

ISSN: 1390-0129

# Revista Politécnica



ESCUELA  
POLITÉCNICA  
NACIONAL

Volumen 35 No 2 Febrero 2015

ISSN: 1390-0129

# Revista Politécnica



Volumen 35 No 2 Febrero 2015

La Revista Politécnica es una publicación semestral de la Escuela Politécnica Nacional que pone al alcance de los sectores académico y productivo los desarrollos científicos y tecnológicos en las áreas de las ingenierías y ciencias.

Está incluida en:

- Latindex: Sistema Regional de información en línea para Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal

Se autoriza la reproducción total o parcial de su contenido siempre y cuando se cite la fuente. Los conceptos expresados son de responsabilidad exclusiva de sus autores.

Contactar con la Coordinación de Edición:

danilo.chávez@epn.edu.ec

oscar.camacho@epn.edu.ec

iliana.carreraf@epn.edu.ec

Teléfono: (+593) 3976000 ext. 5218

Guía para autores:

[http://revistapolitecnica.epn.edu.ec/repo\\_files/autor\\_manual.pdf](http://revistapolitecnica.epn.edu.ec/repo_files/autor_manual.pdf)

## REVISTA POLITÉCNICA

Volumen 35, Número 1  
Febrero 2015

## CONSEJO EDITORIAL



### ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

#### Rector

Jaime Calderón, MBA

#### Vicerrector de Investigación y Proyección Social

Alberto Celi, Ph.D.

#### Vicerrector de Docencia

Tarquino Sánchez, MBA

#### Director de Investigación y Proyección Social

Andrés Rosales, Ph.D.

#### Editor

Danilo Chávez, Ph.D.

#### Co Editor

Oscar Camacho, Ph.D.

Enio Da Silveira, Ph.D.  
Universidad Católica de Río, Brasil.

Carlos Smith, Ph.D.  
University of Florida, Estados Unidos

Gyimah-Brempong Kwabena  
University of Florida, Estados Unidos

José Aguilar, Ph.D.  
Universidad de Los Andes, Venezuela

Gabriel Salazar, Ph.D. Organización  
Latinoamericana de Energía.

Raymundo Forradelas, Ph.D.  
Universidad Nacional del Cuyo,  
Argentina

Ricardo Carelli, Ph.D.  
Universidad Nacional de San Juan,  
Argentina.

Vanderlei Bagnato, Ph.D.  
Universidad de Sao Paulo, Brasil.

Rui Pedro Pinto de Carvalho, Ph.D.  
University of Coimbra, Portugal.

Oscar Ortiz, Ph.D.  
Universidad Nacional de San Juan,  
Argentina

Vicenzo Vespri, Ph.D.  
Università degli studi di Firenze, Italia

Carlos Ávila, Ph.D.  
Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

Gustavo Scaglia, Ph.D.  
Universidad Nacional de San Juan,  
Argentina

Chen Ning, Ph.D.  
Universidad de Mineralogía y  
Tecnología de China, China.

Alex Ruiz Torres, Ph.D.  
Universidad de Puerto Rico, Puerto  
Rico.

Lizandro Solano, Ph.D.  
Universidad de Cuenca, Ecuador

Romel Montufar, Ph.D.  
Pontificia Universidad Católica, Ecuador

Marcos Villacís, Ph.D.  
Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

Andrés Rosales, Ph.D.  
Escuela Politécnica Nacional. Ecuador

Danilo Chávez, Ph.D.  
Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

Oscar Camacho, Ph.D.  
Universidad de los Andes, Venezuela

#### Coordinadora de Edición

Ing. Iliana Carrera

# Sistema De Enfoque Automático Para Una Cámara Térmica, Usando Procesamiento De Imágenes En Matlab

Rodríguez E\*; Toapanta A. \*\*; Rodas A.\*\*\*;

\*Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Quito, Ecuador  
(Tel: 09-99842783; e-mail: eduardo\_santiago2005@hotmail.com)

\*\*Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Quito, Ecuador  
(Tel: 09-84209005; e-mail: ciber\_andita@hotmail.com)

\*\*\*Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Quito, Ecuador  
e-mail: ana.rodas@epn.edu.ec

---

**Resumen:** La Cámara JIR-1136F38 es una cámara térmica, que se encuentra en desventaja frente a las cámaras de alto costo por el hecho de no poseer un sistema de enfoque automático.

En el presente proyecto se ha diseñado y construido un sistema de enfoque automático que basa su funcionamiento en cinco algoritmos de medida de foco, cuatro de ellos comerciales y el último desarrollado y probado por los autores. El proyecto tiene por objetivo principal el posicionamiento correcto del lente de la cámara para la obtención de una imagen nítida a partir de la cual se pueden realizar análisis espectrales y podría servir para determinar cambios, anomalías o alteraciones de equipos o zonas particulares.

**Palabras clave:** Algoritmo, Cámara térmica, Captura, Enfoque, Matlab, Procesamiento de imagen, Radiación infrarroja.

**Abstract:** The JIR-1136F38 is a thermal type camera, but this one is on disadvantage besides modern cameras. It's because JIR-1136F38 camera doesn't have an automatic focus system.

On this project, an automatic focus system has been designed and built. It is based on five focus measurement algorithms. The first four are commercial algorithms and the last one has been developed and proved by the authors of this project. The project's main objective has to do with finding the right position of the camera's lens in order to catch the sharpest image. This image could be used on inspections to determine changes, anomalies or alterations of equipment or particular areas.

**Keywords:** Algorithm, Thermal Camera, Capture, Focus, Matlab, Image Processing, Infrared radiation.

---

## INTRODUCCIÓN

El interés por las imágenes térmicas ha aumentado en los últimos años ya que se ha descubierto la ventaja de captar radiación infrarroja que emite naturalmente un cuerpo para formar una imagen, bien sea en condiciones de luz visible o con la ausencia de ésta.

Las cámaras térmicas captan esta radiación y generan una imagen. Han evolucionado hasta convertirse actualmente en sistemas compactos, con aspecto similar al de una cámara de vídeo o cámara digital normal, son fáciles de utilizar y algunas de ellas poseen la capacidad de enfocar automáticamente un objeto

Un adecuado enfoque en una cámara térmica proporciona una imagen termográfica de alta calidad y permite medir la temperatura con precisión. Con los diferentes avances en el software de termografía, hay muchos parámetros de las imágenes que se pueden ajustar en una imagen guardada para optimizarla y usarla más adelante en informes. Pero en una imagen guardada no se puede cambiar el enfoque. El enfoque es un parámetro óptico y, por lo tanto, no se puede modificar en una imagen guardada [1]. Por estos motivos, un enfoque correcto es uno de los aspectos más importante de una cámara térmica.

El enfoque de la cámara sobre los diferentes objetos siempre necesita una gran cantidad de tiempo, sobre todo si el usuario no tiene mucha experiencia. Un sistema de enfoque automático, se denomina aquel que, sin la intervención del ser humano es capaz de determinar la posición relativa del lente para que la imagen sea nítida. Está compuesto de un sistema

mecánico que permite el movimiento automático del lente y sistemas computacionales y electrónicos.

En la actualidad existen cámaras térmicas sin enfoque automático y varios trabajos relacionados con el desarrollo de algoritmos de enfoque automático, por lo que en el presente trabajo se diseña y construye un sistema automático para la cámara térmica JIR-1136F38 y un software, desarrollado en Matlab, con cinco algoritmos de medida de foco: cuatro de ellos desarrollados y probados en otros proyectos y el último diseñado e implementado por los autores de este trabajo.

## 2. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA ELECTROMECHANICO

### 2.1 Sistema Mecánico

El sistema mecánico la conforman conjuntamente la cámara térmica, el motor DC, el anillo dentado y el piñón acoplado al motor.

#### 2.1.1 Cámara Térmica JIR-1136F38:

Presenta un detector tipo microbolómetro FPA sin refrigeración con una resolución de 384x288, lente F38mm, obturador, tarjeta de circuitos, etc. [2]

Tiene un rango espectral entre 8 y 12 $\mu$ m con una diferencia de temperatura mínima (NETD)  $\leq 100$ mK.

#### 2.1.2 Micro Motor DC:

Para realizar el proceso de enfoque se acopla mecánicamente al obturador, un motor DC que permite que el enfoque sea automático. Con este fin se utiliza un motor Micro Metal Gearmotor Hp con una relación de engranajes de 100:1.

Se escoge este motor ya que cuenta con el suficiente torque para mover el obturador de la cámara y la velocidad adecuada para realizar el proceso de enfoque.

Para el control del motor DC se utiliza el microcontrolador ATMEGA 16, y se utiliza la técnica de modulación por ancho de pulsos PWM (Pulse Width Modulation).

Se utilizan diferentes relaciones de trabajo dependiendo de la función del motor, si es para realizar la captura de imágenes, realizar el proceso de enfoque o mover el lente hacia el extremo y empezar la captura.

#### 2.1.3 Sistema de Acoplamiento:

Para facilitar el acoplamiento del motor con el obturador de la cámara es necesario acoplar un piñón dentado al motor, de la siguiente manera:



Figura 1. Sistema de acoplamiento del motor

Puesto que la altura de los dientes del obturador de la cámara es muy pequeña y resulta difícil un acople ideal con el piñón del motor debido a que los dientes no engranan, se opta por abrazar al obturador con un anillo dentado que posee una altura similar y un paso entre diente y diente igual que el piñón del motor.



Figura 2. Anillo Dentado

Este anillo dentado, de la Fig. 2, posee un peso de 26g, color negro, tamaño de la correa 37 x 0,8 cm y está hecho de caucho.

Se obtiene un sistema de acoplamiento final como se observa en la Fig 3



Figura 3. Sistema de acoplamiento final

### 2.2 Tarjeta Electrónica

Una tarjeta electrónica es la encargada de la comunicación, alimentación, acondicionamiento y contiene los elementos de control.

La tarjeta se divide en dos bloques: el primero constituido por un microprocesador ATmega16 que tiene como entrada un sensor de detección de final de carrera QRD1114. En la salida se cuenta con un driver L293D que controla el micro motor DC. Este bloque recibe y envía datos desde y hacia un computador inalámbricamente mediante el uso de un módulo

Xbee.

El segundo bloque se conforma de la cámara térmica JIR-1136F38, que recibe datos seriales para su configuración inicial desde un computador a través del mismo módulo Xbee. Para poder realizar la comunicación computador-cámara es necesaria una interfaz de comunicación serial denominada MAX 232 la cual cambia los niveles de voltaje. El video análogo se transmite mediante el módulo de transmisión inalámbrica hacia el computador.

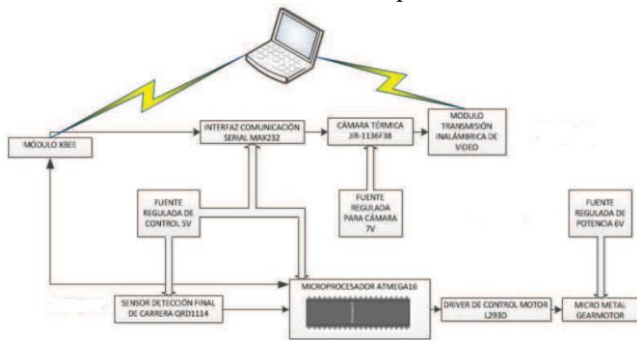


Figura 4. Esquema de conexiones de la tarjeta electrónica.

2.2.1 Microprocesador ATmega 16:

Tiene la función de controlar el motor que realiza el barrido del lente de enfoque para poder realizar la adquisición de imágenes para posterior procesamiento. [3]

Tabla 1. Pines del Atmega16 utilizadas en el proyecto

E/S	PIN	DESCRIPCIÓN
Salida	PB0	Salida A de control del motor DC
Salida	PB1	Salida B de control del motor DC
Entrada	PD0	Recepción de comunicación serial
Salida	PD1	Transmisión de comunicación serial
Entrada	PD2	Interrupción de sensor de final de carrera

2.2.2 Circuito Integrado L293D:

Este circuito brinda la posibilidad de usarlo como puente H para poder invertir el sentido de giro del motor DC. [4]

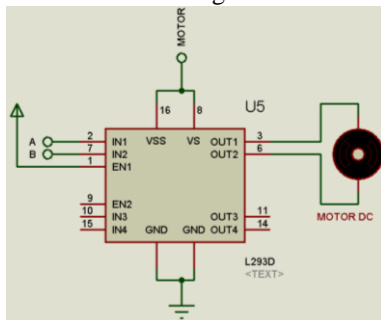


Figura 5. Conexión del driver L293D del proyecto

2.2.3 Sensor de detección de final de carrera:

Previo a la adquisición de imágenes, es necesario llevar el lente de enfoque a la posición inicial de barrido, con el propósito de tomar datos en todo el rango de movimiento del lente. Para determinar si el lente ha llegado a la posición inicial, se usa un detector de final de carrera. En el trabajo presentado se utiliza el sensor óptico reflectivo NPN QRD1114 [5], acondicionado como lo indica la Fig. 6.

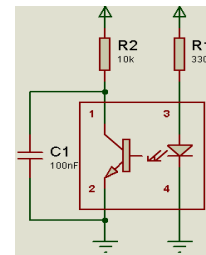


Figura 6. Acondicionamiento del sensor QRD1114

2.2.4 Interfaz de comunicación serial Max232:

Para poder comunicar la PC con la cámara térmica se utilizan los módulos Xbee Explorer USB y el Xbee Regulated, este último recibe datos llevando la señal de 5V a 3.3V, niveles TTL. [6]

Debido a que el puerto serial de la cámara térmica trabaja con niveles RS232 y el módulo Xbee Regulated trabaja con niveles TTL, es necesario el uso la interfaz de comunicación Max232. [7]

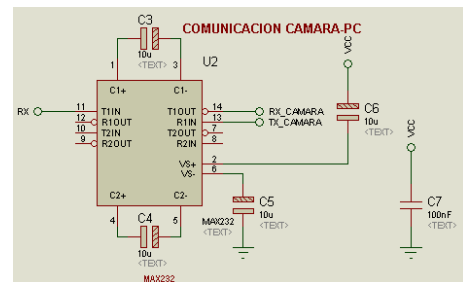


Figura 7. Interfaz de comunicación del proyecto

El protocolo de comunicación con el que trabaja la cámara es el siguiente:

- Baud Rate: 9600
- Bits de paridad: Ninguno
- Bits de inicio: 1
- Bits de datos: 8
- Bits de parada: 1

2.2.5 Fuentes Reguladas:

Existen tres fuentes reguladas de alimentación. La primera entrega 5V a 1 A y tiene como función la alimentación del

microprocesador ATmega 16, el módulo de comunicación Xbee y el sensor óptico de fin de carrera QRD1114.

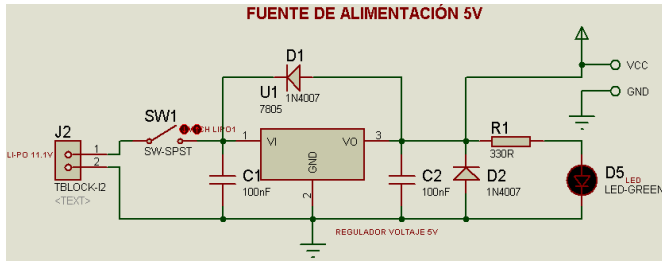


Figura 8. Fuente regulada de alimentación de 5V

La segunda fuente regulada entrega 7V a 1 A y se encarga de alimentar a la cámara JIR-1136F38

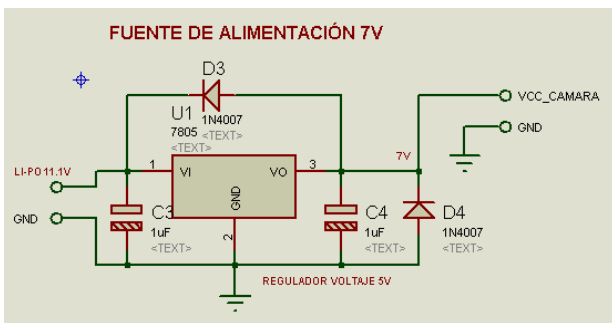


Figura 9. Fuente regulada de alimentación de 7V

La última fuente entrega 6V a 1 A y se conecta la driver L293D que controla el motor.

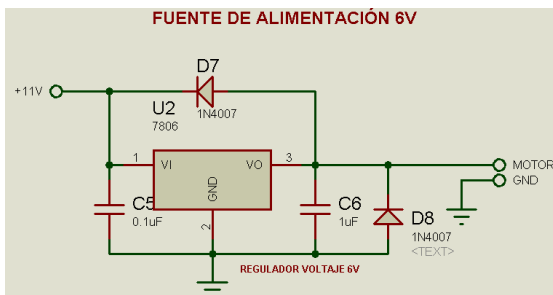


Figura 10. Fuente regulada de alimentación de 6V

### 2.3 Fuente de voltaje.

El prototipo desarrollado requiere de alimentación estable, de larga duración, elevada potencia y bajo peso, razones por las cuales se utilizan baterías de Polímero de Litio, denominadas como Li-Po.

En el presente proyecto la fuente de voltaje que se utiliza es una batería Li-Po de tres celdas, cuyas características más importantes son: [8]

- Marca: ZIPPY

- Modelo: Flightmax Z50003S-20
- Voltaje: 11.1 V
- Capacidad: 5000 mAh
- Peso: 404g



Figura 11. Batería Li-Po de 3 celdas utilizada en el proyecto

La alimentación de voltaje proporcionada por la batería Li-Po de 3 celdas de 11.1 voltios en total, es utilizada para energizar la tarjeta de control, la cámara térmica, el transmisor de video y el motor DC.

## 3. DESARROLLO DEL SOFTWARE

La programación de los algoritmos de enfoque está desarrollada en MATLAB, ya que este software facilita las tareas de adquisición, análisis, interpretación y procesamiento digital de imágenes, debido de la capacidad de manipular matrices que contienen información sobre la imagen adquirida.

### 3.1 Programa Principal:

El programa principal contiene el código en donde se declaran las variables, los parámetros iniciales, se visualiza la imagen y determina el cumplimiento de las condiciones para desarrollar un determinado algoritmo o para realizar una aplicación.

Entre las opciones que contiene el programa principal están: Desplegar pantalla completa, capturar imágenes, enfocar una región de interés, mover el lente, observar la curva de datos de las imágenes, observar todas las imágenes capturas secuencialmente durante el proceso de enfoque, cambiar el color de visualización de la imagen y realizar un acercamiento de los objetos enfocados.

### 3.2. Subrutinas:

El programa contiene diferentes subrutinas que cumplen una importante función en el proceso de enfoque, entre ellas están la subrutina de comunicación encargada de enviar el dato para iniciar el proceso de enfoque y esperar a recibir un dato para iniciar la captura de imágenes, la subrutina de adquisición de imágenes encargada de adquirir una foto del video y convertirla a escala de grises para poder aplicar



ciertas propiedades necesarias para la implementación de los algoritmos, la subrutina de visualización en donde se escoge el color para visualizar la imagen, la subrutina de captura de imágenes en donde se captura cada una de las imágenes y se la almacena en una estructura de datos, la subrutina de barrido en donde se envía un dato para iniciar el movimiento del motor y el inicio de la captura de imágenes, la subrutina de tiempo de enfoque en donde una vez obtenidos los datos de las capturas se determina la imagen con el valor más alto y se obtiene el tiempo que se tuvo cuando la imagen fue capturada, la subrutina de enviar dato en donde se envía el dato que mueve el motor a la posición de mejor medida de foco.

### 3. Algoritmos de Enfoque:

Se diseñaron y programaron cuatro algoritmos de enfoque utilizando las diferentes técnicas de medida de foco: diferenciación de imágenes, medida del contraste de la imagen, funciones en el dominio de la frecuencia y segmentación. En base al análisis de las particularidades, características de programación y tiempo de ejecución, se diseñó y programa un algoritmo desarrollado por los autores del proyecto basado en la detección de bordes de una imagen.

#### a) Algoritmo de Bordes R-T:

Este algoritmo es el desarrollado por los autores, una vez adquirida la imagen, se aplica un detector de bordes con el fin de obtener un conjunto de puntos o líneas conectadas que indican las fronteras de las superficies formadas. Se determina el área formada por el trazo de los límites en cada superficie y se suma todas las áreas obteniendo un área total.

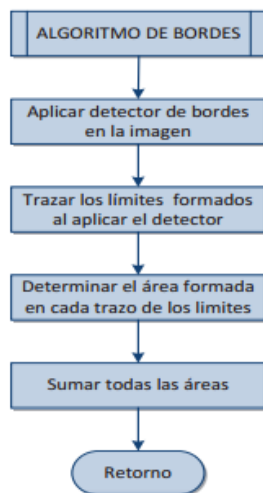


Figura 12. Diagrama de flujo del algoritmo de detección de bordes

El procedimiento para implementar el algoritmo es el siguiente:

Obtener la matriz de bordes BW1 de la imagen aplicando la máscara de Sobel (ecuaciones (1) y (2)), para obtener una nueva imagen de conjunto de puntos o líneas conectadas que indican las fronteras de las superficies formadas.

$$Sx = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$Sy = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

Una vez aplicada la máscara se determinan las regiones formadas. Se utiliza la herramienta `bwboundaries` (BW1,'noholes') para la reconstrucción del contorno, donde BW1 es la imagen obtenida una vez aplicada la máscara. Esta herramienta se basa en el algoritmo de MooreNeighbor Tracing

Al reconstruir el contorno se obtiene una imagen L (ecuación 3) de la cual se calcula el valor del área de cada región, usando la herramienta `area1 = regionprops(L, 'area')`.

$$L = \begin{pmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \dots a_{1,j} & \dots a_{1,n} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & \dots a_{2,j} & \dots a_{2,n} \\ a_{i,1} & a_{i,2} & \dots a_{i,j} & \dots a_{i,n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m,1} & a_{m,2} & \dots a_{m,j} & \dots a_{m,n} \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$area = \begin{pmatrix} b_{1,1} & b_{1,2} & \dots b_{1,j} & \dots b_{1,n} \\ b_{2,1} & b_{2,2} & \dots b_{2,j} & \dots b_{2,n} \\ b_{i,1} & b_{i,2} & \dots b_{i,j} & \dots b_{i,n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{m,1} & b_{m,2} & \dots b_{m,j} & \dots b_{m,n} \end{pmatrix} \quad (4)$$

Se concatenan los datos de la matriz obtenida utilizando la herramienta:

$$areas = cat(1, area1.Area)$$

$$areas = \begin{pmatrix} b_{1,1} \\ b_{2,1} \\ \dots b_{m,1} \\ b_{1,2} \\ \dots b_{m,2} \\ \vdots \\ \dots b_{m,n} \end{pmatrix} \quad (5)$$

El índice de enfoque se obtiene al sumar los valores de las áreas de cada región siendo las áreas de mayor valor las que están en las imágenes con mejor definición de bordes.

$$area = \sum_{i=1, j=1}^{i=n, j=n} b_{i,j} \quad (6)$$

Por tanto al comparar el área total encerrada por los bordes en cada imagen obtenida en los diferentes grados de enfoque, la imagen mejor enfocada y con mayor nitidez será la que tenga el mayor valor de área total.

#### b) Algoritmo de Varianza:

Este algoritmo diferencia el valor promedio de todos los pixeles correspondientes a la imagen con cada uno de ellos. Por tanto, la imagen mejor enfocada es aquella que presenta mayor dispersión, La ecuación que determina la medida del enfoque es la siguiente [9]:

$$FM = \sum_M \sum_N (I(x, y) - \bar{I})^2 \quad (7)$$

Donde  $\bar{I}$  es el valor promedio de los valores de los pixeles de la imagen  $I$ .

#### c) Algoritmo de Frecuencias:

El algoritmo definido como Frecuencias está basado en el análisis del contenido de frecuencias de una imagen, y la relación entre las frecuencias bajas y las frecuencias altas.

Siendo la matriz  $f(x, y)$  los datos de cada imagen, se obtiene la transformada, para poder obtener las magnitudes de los contenidos de frecuencias, y así determinar la matriz de frecuencias.

Para poder obtener la matriz de altas frecuencias es necesario definir la matriz de bajas frecuencias:

$$Mat\_bajas\_freq = [matriz\_freq(i, j) | i = 1...5; j = 1...5] \quad (8)$$

De cada matriz se obtiene un vector de tal forma que para determinar el vector de altas frecuencias se realiza de la siguiente forma:

$$vector\_altas = (vector\_total) - (vector\_bajas) \quad (9)$$

Finalmente se obtiene la proporción del contenido de altas frecuencias en relación con el contenido de bajas frecuencia mediante [10]:

$$radio = \frac{(vector\_altas)}{(vector\_bajas)} \quad (10)$$

#### d) Algoritmo de Boddeke:

El algoritmo de Boddeke utiliza la máscara de convolución  $Bx = [-1 \ 0 \ 1]$  aplicada a lo largo del eje x de la imagen procesada. Así la magnitud del gradiente, obtenida después de aplicar  $Bx$  en cada píxel  $(n, m)$  a través de la imagen, se expresa de la siguiente forma [10]:

$$\nabla Bx(n, m) = f(n+1, m) - f(n-1, m) \quad (11)$$

La imagen con el mayor índice será aquella que tenga mejor grado de enfoque

#### e) Algoritmo de Brenner:

El algoritmo de Brenner calcula la diferencia entre una determinada matriz  $I(x, y)$  y la matriz  $I(x, y)$  desplazada dos pixeles, dicha diferencia es elevada al cuadrado para obtener la medida de foco [9].

$$FM = \sum_M \sum_N |I(x, y+2) - I(x, y)|^2 \quad (12)$$

### 3.1 Programación del microcontrolador Atmega16

El programa sigue un orden sistemático que permite la correcta ejecución de las acciones programadas.

En el programa principal se desarrolla la parte correspondiente al movimiento del motor en sus dos sentidos de giro para lograr captar las imágenes en las diferentes posiciones de medida de foco del lente. Constas de dos condicionales, una para cada sentido. Al cumplirse la condición de sentido horario el motor se mueve hasta que el sensor indica que ha llegado al extremo de movimiento del obturador del lente y envía un número para que se inicie la toma de datos de las imágenes en MATLAB. Al cumplirse la

condición de sentido anti horario el motor se mueve durante un tiempo necesario para llegar al otro extremo de movimiento del obturador tomando datos de las imágenes de extremo a extremo y envía un número a MATLAB para que se detenga la toma de datos.

El programa tiene además una subrutina de interrupción donde se detiene el motor e inicia el movimiento del motor en sentido anti horario y una subrutina de comunicación serial en donde se tiene varias condiciones para mover al motor en sentido horario y anti horario ya sea para el proceso de enfoque, para el reenfoque o para iniciar la captura de imágenes.

### 3.2 Desarrollo de la interfaz gráfica del usuario

El sistema para el enfoque automático de la cámara térmica tiene como complemento la implementación de una interfaz gráfica de usuario, la cual brinda varias opciones, como la visualización de las imágenes tomadas por la cámara en un computador y el archivo de las mismas para un posterior análisis térmico. Esta interfaz, desarrollada en Matlab, permite visualizar a distancia el trabajo de enfoque automático de la cámara, al mismo tiempo que contiene los algoritmos de enfoque programados.

La ventana principal, Fig. 13, contiene dos posibles caminos a tomar: “Continuar” o “Salir”.

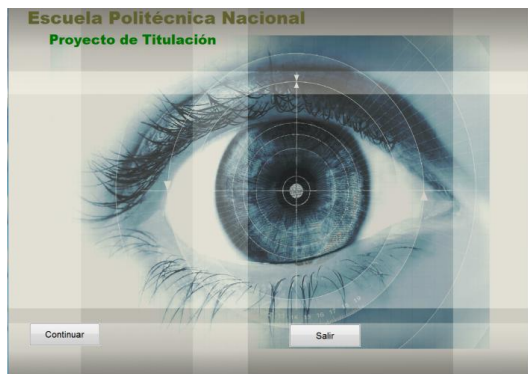


Figura 13. Pantalla de presentación

La opción “Continuar” permite visualizar la pantalla principal en donde se encuentra una subrutina creada para la configuración de la cámara térmica, y el código serial que posibilita quitar la imagen de centro que se muestra por defecto en la cámara.

#### 3.2.1 Pantalla Completa:

La función de pantalla completa despliega la imagen que la cámara se encuentra capturando ocupando la mayor parte del GUI.



Figura 14. Función de pantalla completa

#### 3.2.2 Capturar:

Esta función despliega dos imágenes principales, la primera muestra el video que se está guardando y la segunda muestra la imagen capturada el momento de presionar el botón. Se despliegan tres sub-imágenes ubicadas a la derecha de la ventana principal donde se guardan capturas previas.

Cabe recalcar que el usuario puede regresar a una captura previa presionando el botón VER.

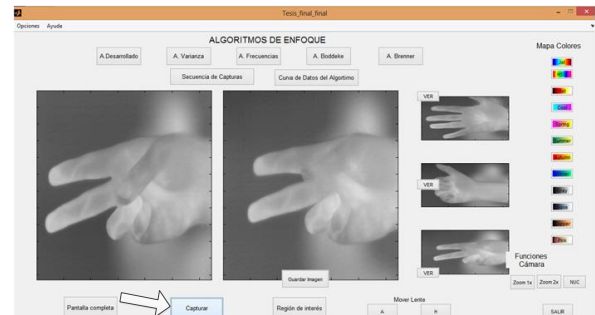


Figura 15. Función Captura

#### 3.2.3 Región de Interés:

Al presionar este botón se despliegan dos imágenes, la primera muestra el video y la segunda permite seleccionar un área de la imagen capturada. Al seleccionar la región deseada el sistema realiza zoom y continúa mostrando el video en ese formato.

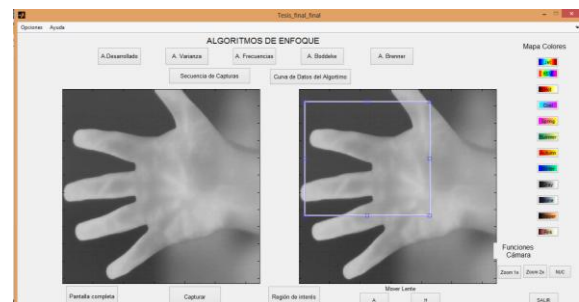


Figura 16. Selección del área de interés

### 3.2.4 Secuencia de Capturas:

Esta función despliega una a una las capturas que se tomaron durante el proceso de enfoque. Esta función permite que el usuario pueda apreciar de mejor forma el enfoque, ya que las imágenes se muestran en un tiempo adecuado para el ojo.

### 3.2.5 Curva de datos del Algoritmo:

Al llamar a esta función se muestran dos imágenes, la primera corresponde al video y la segunda despliega la curva formada por los índices de enfoque que corresponde a cada una de las capturas realizadas durante el barrido.

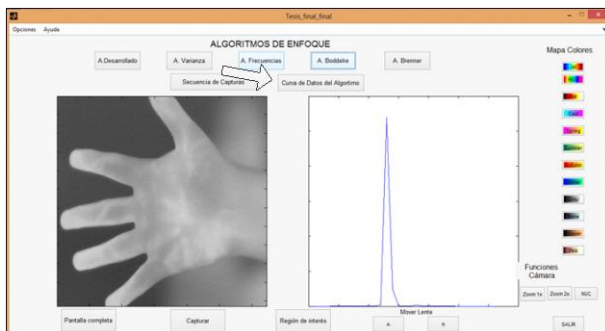


Figura 17. Función Curva de datos del algoritmo

### 3.2.6 Cambios de mapas de colores:

El usuario puede seleccionar entre las doce opciones de mapas de colores que nos ofrece Matlab para visualización de las imágenes. Las escalas de colores que se pueden seleccionar permiten al usuario una mejor percepción de la radiación que está emitiendo el objetivo.

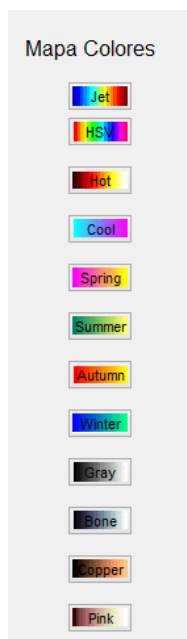


Figura 18. Opciones de Mapas de colores

### 3.2.7 Opciones de Mover lente:

Estas opciones permiten mover el lente de forma remota desde el GUI. El usuario puede seleccionar movimiento Horario o Anti horario. Los movimientos son pequeños y precisos para poder ajustar mejor el enfoque de una imagen en caso de ser necesario.

### 3.2.8 Funciones de la cámara:

Entre las distintas funciones que tiene la cámara se encuentran:

- Zoom x1
- Zoom x2
- NUC

Para poder acercar la imagen, se puede seleccionar la opción Zoom 2x, que permite visualizar el objetivo el doble de su tamaño actual. La opción Zoom 1x, permite que la imagen vuelva a su estado por defecto. La opción NUC permite enviar el comando serial para desaturar el sensor de la cámara.

## 4. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

### 4.1 Pruebas de enlace

Para realizar el control de sistema se usan dos canales de comunicación inalámbrica, uno para el video y otro para datos de control.

Las pruebas determinan la distancia máxima a la cual existe envío y recepción de datos válidos por parte de los dos canales.

Para ambientes externos las pruebas de enlace se realizan en el estadio de la Escuela Politécnica Nacional, en donde se tuvo una distancia máxima de recepción de 140 metros mientras que para ambientes internos se realizan en el pasillo del Edificio de Relación con el Medio, con una distancia máxima de recepción de 60 metros



Figura 19. Distancia de prueba de enlace externo

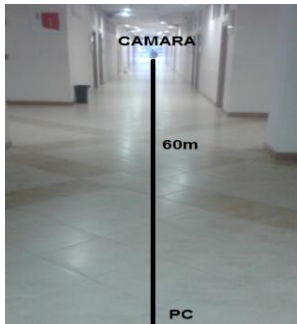


Figura 20. Distancia de prueba de enlace interno

#### 4.1.1 Pruebas de enlace de video:

Para evaluar el enlace de transmisión de imagen se toma en cuenta los siguientes parámetros:

- Visualización en tiempo real
- Calidad de la imagen, es decir poder visualizar una imagen sin distorsión

Se realizaron las pruebas variando la distancia y evaluando la imagen observada en el computador

Tabla 2. Distancia de transmisión de video

Lugar	Distancia Máxima
Ambiente Interno (Laboratorio)	60m
Ambiente Externo (Estadio)	140m

#### 4.1.2 Pruebas de enlace de datos:

Para evaluar el enlace de datos se considera los siguientes parámetros:

- Recepción correcta de los comandos seriales por parte de la cámara.
- Envío y recepción correcta de datos entre el computador y el microcontrolador.

Tabla 3. Distancia de transmisión de datos

Lugar	Distancia Máxima
Ambiente Interno (Laboratorio)	60m
Ambiente Externo (Estadio)	140m

#### 4.2 Pruebas de enfoque

Con el objetivo de poder comparar el desempeño de los diferentes algoritmos implementados se determinaron ciertos criterios de evaluación, los cuales son:

- Efectividad (E)
- Tiempo (T)

- Máximos Falsos (MF)
- Amplitud del pico máximo (AP)

La efectividad es el parámetro más importante e indica si el algoritmo enfoca correctamente el objeto a observar. Puede tener cuatro valores posibles:

E = 1 si el imagen está bien enfocada

E = 0.6 si la imagen necesita de un reenfoque mínimo

E = 0.3 si la imagen necesita de varios reenfoques para estar bien enfocada y

E = 0 si no enfoca

#### 4.2.1 Función de Evaluación:

Con el fin de evaluar los algoritmos se define una función que relaciona los criterios mencionados. Para esto se procede a ponderar cada criterio del 0% al 100% dependiendo de su importancia en el proceso de enfoque, estas ponderaciones son:

- Tiempo de enfoque, se le asigna una ponderación de 20%
- Máximos falsos, se le asigna una ponderación de 60%
- Amplitud del pico máximo, se le asigna una ponderación de 20%

La función de evaluación es la siguiente:

$$FE = E * [0.2 * T + 0.6 * MF + 0.2 * AP] \quad (13)$$

#### 4.2.2 Pruebas Internas:

Las pruebas se realizan en el laboratorio de robótica ubicado en el edificio de Relaciones con el Medio. Se usaron varios objetos de prueba a distintas distancias para determinar la efectividad de los algoritmos en ambientes internos.

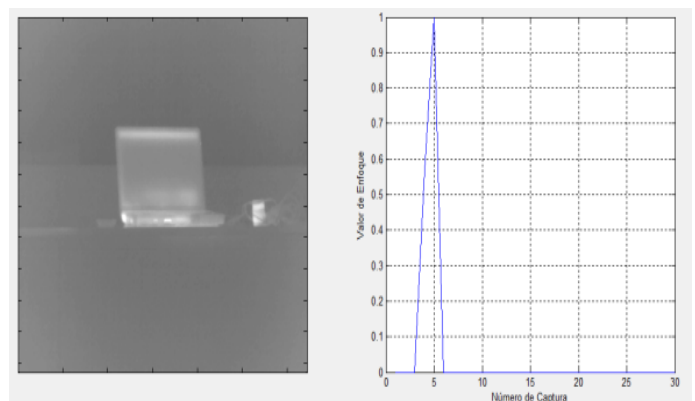


Figura 21. Laptop a 4 metros enfocada con el algoritmo Bordes R-T

**Tabla 4.** Pruebas internas de enfoque en una laptop a 4 metros de distancia

ALGORITMO	Efectividad	Tiempo	Maximos Falsos	Amplitud Pico	FE
Bordes R-T	1	0,9754	1,000	1,000	0,9951
Varianza	1	0,9707	1,000	0,333	0,8608
Frecuencia	0	1,0000	0,125	0,500	0,0000
Boddeke	1	0,8822	1,000	0,500	0,8764
Brenner	1	0,7830	0,333	0,333	0,4233

En este caso el algoritmo de bordes R-T presenta los mejores resultados mientras que el algoritmo de frecuencia da los resultados menos satisfactorios.

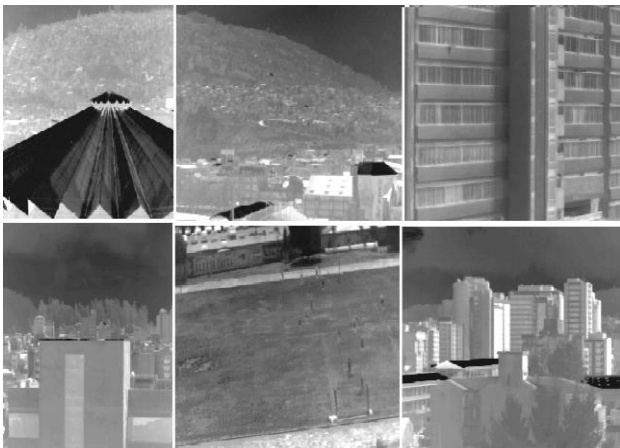
**Tabla 5.** Resultados de evaluación de pruebas internas

ALGORITMO	FUNCIÓN DE EVALUACIÓN (FE)							$\overline{FE}$
	Laptop		Mano		Persona	Agua		
	2m	4m	1m	4m	8m	caliente 4m		
Bordes R-T	0,9926	0,9951	0,9931	0,9970	0,9931	0,9956	0,5101	0,9252
Varianza	0,8180	0,8608	0,3232	0,8932	0,8408	0,8351	0,1657	0,6767
Frecuencia	0,0000	0,0000	0,0000	0,9333	0,0000	0,0000	0,0000	0,1333
Boddeke	0,5003	0,8764	0,4643	0,2017	0,1607	0,5720	0,3623	0,4483
Brenner	0,4110	0,4233	0,4541	0,5901	0,5541	0,8538	0,1662	0,4932

El parámetro FE que la función de evaluación es mayor en el algoritmo de bordes R-T desarrollado en el presente proyecto.

**4.2.3 Pruebas Externas:**

Las pruebas se realizan en la terraza del Edificio de la Facultad de Ciencias de la Escuela Politécnica Nacional. Se usaron varios objetos de prueba a distintas distancias para determinar la efectividad de los algoritmos en ambientes externos, ya que uno de los factores que influyen en el enfoque automático es el nivel de luz.



**Figura 22.** Diferentes objetos utilizados para las pruebas externas

**Tabla 6.** Resultados de evaluación de pruebas externas

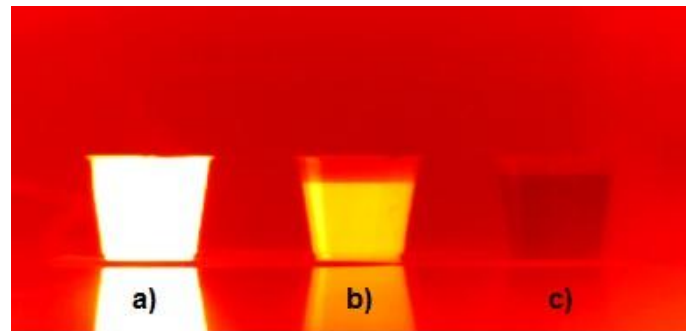
ALGORITMO	FUNCIÓN DE EVALUACIÓN (FE)						$\overline{FE}$
	Coliseo	Concentración	Electrónica	Sistemas	Cancha	Salesiana	
Bordes R-T	0,9947	0,8607	0,8645	0,9951	0,8642	0,4998	0,8465
Varianza	0,8928	0,9259	0,5170	0,9942	0,3150	0,6830	0,7213
Frecuencia	0,9000	0,9333	0,6333	0,5133	0,9333	0,3800	0,7156
Boddeke	0,4981	0,9067	0,5180	0,9739	0,5268	0,4060	0,6382
Brenner	0,4134	0,5121	0,5572	0,5115	0,3582	0,1480	0,4167

**4.3 Pruebas de funcionamiento de la cámara**

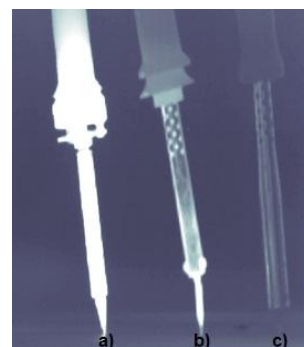
Estas pruebas determinan la capacidad de diferenciar objetos a distintas temperaturas.

**4.4 Pruebas de temperatura:**

Estas pruebas se realizaron utilizando objetos de similares características a distintas temperaturas para apreciar la capacidad de la cámara de detectar radiación infrarroja emitida por los cuerpos en función de su temperatura.



**Figura 23.** Agua Caliente(a), Agua tibia (b) y Agua fría (c)



**Figura 24.** Cautín conectado a 100°C (a), Cautín conectado a 40°C (b) y Cautín desconectado (c)

Se puede apreciar que la cámara puede diferenciar distintos rangos de temperatura que pueden ser útiles para diferentes aplicaciones.

## 6. CONCLUSIONES

Las cámaras térmicas tienen amplias aplicaciones dentro de procesos industriales, mantenimiento eléctrico, aplicaciones como vigilancia o seguimiento. Una cámara sin enfoque difícilmente tendrá las mismas aplicaciones que una cámara con enfoque. El sistema de enfoque diseñado e implementado es un prototipo que brinda a la cámara térmica JIR-1136F38 la oportunidad de ser funcional y es el primer paso para que pueda ampliar su rango de aplicaciones.

El sistema de enfoque diseñado garantiza un correcto enfoque automático logrando una muy buena definición de las imágenes tomadas y presentando, además, una ventaja en cuanto a costo frente a otras cámaras con lentes de enfoque automático.

El algoritmo implementado por los autores del proyecto denominado Bordes R-T utiliza un método menos complicado a diferencia de los otros algoritmos implementados y es muy útil cuando se desea enfocar imágenes de objetos con siluetas bien definidas como por ejemplo una mano, llegando incluso en muchos de los casos a tener la mejor respuesta en cuanto a los criterios de enfoque en comparación con los demás algoritmos.

Las pruebas de enfoque realizadas tanto en ambientes internos como externos permitieron comprobar el funcionamiento del sistema de enfoque. El algoritmo Varianza enfocan la gran mayoría de veces en ambientes internos. Los algoritmos de Frecuencias y Boddeke enfocan la gran mayoría de veces en ambientes externos. El algoritmo Brenner no enfoca satisfactoriamente en la mayoría de pruebas, pero tiene mejores probabilidades de enfoque en ambientes externos. El algoritmo Bordes R-T enfoca tanto en ambientes externos e internos

Para el enlace de imagen existe mayor probabilidad de interferencia conforme aumenta la distancia entre los módulos de transmisión y recepción de video inalámbrico, cualquier movimiento brusco es sinónimo de perturbación de la imagen, lo que significa datos falsos y un enfoque incorrecto.

## REFERENCIAS

- [1] <http://www.voltimum.es/articulos-tecnicos/toda-informacion-enfoque-imagenes-termicas#sthash.8aS8CqJ.dpuf>
- [2] Manual de especificaciones técnicas de la Cámara Térmica JIR-1136F38
- [3] Hoja de Datos, “Atmel ATmega16”, [Online].<http://www.atmel.com/1293d.pdf>
- [4] Texas Instruments. (2002). L293D Quadruple half-H drivers. <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/texasinstruments>
- [5] Hoja de Datos, Fairchild Semiconductor, “Sensor reflexivo QRD1114”
- [6] Xbee; Módulo Xbee. <http://www.xbee.cl/>
- [7] Maxim Integrated Products, “Data sheet, +5V-Powered, Multichannel RS-232 Drivers/Receivers MAX220 – MAX249”
- [8] HobbyKing, Global Warehouse. [http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/\\_\\_8579\\_\\_zippy\\_flightmax\\_5000mah\\_3s1p\\_20c.html](http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/__8579__zippy_flightmax_5000mah_3s1p_20c.html)
- [9] PERTUZ, S., IBÁÑEZ H., “Sistema de Adquisición Automática de Imágenes para Microscopio Óptico”, Proyecto de Titulación, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. 2007. Demo: Real-Time Video Focus Identification and Assessment
- [10] BUENO, M., “Desarrollo de una tecnología sistematizada para la adquisición y análisis de partículas biogénicas”, Proyecto de Titulación, Instituto Politécnico Nacional, Tijuana, México. Abr.2005.

# Convergence to Steady State Solutions of a Particular Class of Fractional Cooperative Systems.

Yangari M.\*

\*Escuela Politécnica Nacional, Departamento de Matemática, Ladrón de Guevara E11-253, Quito, Ecuador

e-mail: miguel.yangari@epn.edu.ec

---

**Resumen:** El objetivo de este artículo es probar que bajo ciertas hipótesis sobre la no linealidad y la condición inicial, la solución de un sistema cooperativo de reacción-difusión fraccionario converge a la solución positiva más pequeña de estado estable. Además, probamos que esta convergencia es exponencial en tiempo y que el exponente de propagación depende del primer valor propio de la derivada del término de reacción y del índice más pequeño de los Laplacianos fraccionarios.

**Palabras claves:** Laplaciano fraccionario, ecuación no lineal de reacción-difusión, sistemas cooperativos, propagación asintótica, solución de estado estable.

**Abstract:** The aim of this paper is to prove that under some appropriate assumptions on the nonlinearity and the initial datum, the solution of the fractional reaction-diffusion cooperative system converge to the smallest positive steady solution. Also, we prove that this convergence is exponential in time and that the exponent of propagation depends on the principal eigenvalue of the derivative of reaction term and on the smallest index of the fractional laplacians.

**Keywords:** Fractional Laplacian, nonlinear reaction-diffusion equation, cooperative systems, asymptotic propagation, steady state solution.

---

## 1. INTRODUCTION

Reaction-diffusion models have found widespread applicability in a surprising number of real-world models, including areas as, chemistry, biology, physics and engineering. But not only physical phenomena can be the result of a diffusive models. Stochastic processes in mathematical finance are often modeled by a Wiener process or Brownian motion, which lead to diffusive models. The simplest reaction-diffusion models are of the form

$$u_t - \Delta u = f(u) \quad (1)$$

where  $f$  is a nonlinear function representing the reaction kinetics. One of the most important examples of particular interest for us include the Fisher-KPP equation for which  $f(u) = u(1 - u)$ . The nontrivial dynamics of these systems arises from the competition between the reaction kinetics and diffusion.

At a microscopic level, diffusion is the result of the ran-

dom motion of individual particles, and the use of Laplacian operators in the model rests on the key assumption that this random motion is an stochastic Gaussian process. However, a growing number of works have shown the presence of anomalous diffusion processes, as for example Lévy processes, thus, reaction-diffusion equations with fractional Laplacian instead of standard Laplacian appear in physical models when the diffusive phenomena are better described by Lévy processes allowing long jumps, than by Brownian processes, see for example [10] for a description of some of these models. The Lévy processes occur widely in physics, chemistry and biology and recently these models that give rise to equations with the fractional Laplacians have attracted much interest.

The reaction diffusion equation (1) with Fisher-KPP nonlinearity has been the subject of intense research since the seminal work by Kolmogorov, Petrovskii, and Piskunov [8]. Of particular interest are the results of Aronson and Weinberger [1] which describe the evolution of the compactly supported data. They showed that for a compactly supported initial value  $u_0$ , the movement of the fronts are

---

Submitted 24 November 2014; Accepted February 2015. The author thanks Professor J.-M. Roquejoffre for fruitful discussions.



linear in time. In addition, there exists a critical speed  $c^* = 2\sqrt{f'(0)}$  for which the problem (1) admits planar traveling wave solutions connecting 0 and 1, that is, solutions of the form  $u(t, x) = \phi(x - ct)$ , which move with speeds  $c \geq c^*$ .

Moreover, Berestycki, Hamel and Roques [2] prove existence and uniqueness results for the stationary solution associated to (2) and they then analyze the behavior of the solutions of the evolution equation for large times. These results are expressed by a condition on the sign of the first eigenvalue of the associated linearized problem with periodicity condition.

In the fractional case, the anomalous diffusion problems is focussed to the study of large-time behavior of the solution of the Cauchy problem for fractional reaction-diffusion equations

$$\begin{cases} \partial_t u + (-\Delta)^\alpha u = f(u), & t > 0, x \in \mathbb{R}^d, \\ u(0, x) = u_0(x), & x \in \mathbb{R}^d, \end{cases} \quad (2)$$

with  $\alpha \in (0, 1)$  in one spatial dimension, where  $(-\Delta)^\alpha$  denote the fractional Laplacian. The nonlinearity  $f$  is assumed to be in the Fisher-KPP class. More precisely, the nonlinearity is assumed to have two zeros, an unstable one at  $u = 0$  and a stable one at  $u = 1$ .

Regarding (2) with  $\alpha \in (0, 1)$  and Fisher-KPP nonlinearity, in connection with the discussion given above for the case  $\alpha = 1$ , in the recent papers [4] and [5], Cabré and Roquejoffre show that for compactly supported initial value, or more generally for initial values decaying like  $|x|^{-d-2\alpha}$ , where  $d$  is the dimension of the spatial variable, the speed of propagation becomes exponential in time with a critical exponent  $c_* = f'(0)(d + 2\alpha)^{-1}$ , they also show that no traveling waves exists for this equation, all results in great contrast with the case  $\alpha = 1$ . Additionally we recall the earlier work in the case  $\alpha \in (0, 1)$  by Berestycki, Roquejoffre and Rossi [3], where it is proved that there is invasion of the unstable state by the stable one, also in [3], the authors derive a class of integro-differential reaction-diffusion equations from simple principles. They then prove an approximation result for the first eigenvalue of linear integro-differential operators of the fractional diffusion type, they also prove the convergence of solutions of fractional evolution problem to the steady state solution when the time tends to infinity.

The study of propagation fronts was also done in reaction diffusion systems, in this line, Lewis, Li and Weinberger in [9], studied spreading speeds and planar traveling waves for a particular class of cooperative reaction diffusion systems with standard diffusion by analyzing traveling waves and the convergence of initial data to wave solutions. It is shown that, for a large class of such cooperative systems, the spreading speed of the system is characteri-

zed as the slowest speed for which the system admits traveling wave solutions. Moreover, the same authors in [11] establish the existence of a explicit spreading speed  $\sigma^*$  for which the solution of the cooperative system spread linearly in time, when the time tends to  $+\infty$ .

Follow the line, when the standard Laplacians are replaced for instance by the fractional Laplacian with different indexes in a reaction diffusion cooperative systems, [6] states that the propagation speed of the solution is exponential in time with an exponent depending on the smallest index of the fractional Laplacians and of the principal eigenvalue of the matrix  $DF(0)$  where  $F$  is the nonlinearity associated to the fractional system.

The aim of this paper is to prove that under some appropriate assumptions on the nonlinearity and the initial datum, the solution of the fractional reaction-diffusion cooperative systems converge to the smallest positive steady solution. Also, we prove that this convergence is exponential in time with the exponent given in [6]. More precisely, we focus on the large time behavior of the solution  $u = (u_i)_{i=1}^m$ , for  $m \in \mathbb{N}^*$ , to the fractional reaction-diffusion system:

$$\begin{cases} \partial_t u_i + (-\Delta)^{\alpha_i} u_i = f_i(u), & t > 0, x \in \mathbb{R}^d, \\ u_i(0, x) = u_{0i}(x), & x \in \mathbb{R}^d, \end{cases} \quad (3)$$

for all  $i \in \llbracket 1, m \rrbracket := \{1, \dots, m\}$ , where

$$\alpha_i \in (0, 1] \quad \text{and} \quad \alpha := \min_{\llbracket 1, m \rrbracket} \alpha_i < 1.$$

The operator  $(-\Delta)^{\alpha_i}$  is the Fractional Laplacian defined by

$$(-\Delta)^{\alpha_i} u(x) = C(d, \alpha_i) P.V. \int_{\mathbb{R}^d} \frac{u(x) - u(y)}{|x - y|^{d+2\alpha_i}} dy$$

where the principal value is taken as the limit of the integral over  $\mathbb{R}^d \setminus B_\varepsilon(x)$  as  $\varepsilon \rightarrow 0$  and  $C(d, \alpha)$  is a constant that depends on  $\alpha_i$ . Note, when  $\alpha_i = 1$ , then  $(-\Delta)^{\alpha_i} = -\Delta$ . As general assumptions, we impose, for all  $i \in \llbracket 1, m \rrbracket$ , the initial condition  $u_{0i}$  to be nonnegative, non identically equal to 0, continuous and to satisfy

$$u_{0i}(x) = O(|x|^{-(d+2\alpha_i)}) \quad \text{as} \quad |x| \rightarrow +\infty. \quad (4)$$

We also assume that for all  $i \in \llbracket 1, m \rrbracket$ , the function  $f_i \in C^1(\mathbb{R}^m)$  satisfies  $f_i(0) = 0$  and that system (3) is cooperative, which means:

$$\partial_j f_i > 0, \quad \text{on} \quad \mathbb{R}^m, \quad \text{for all } j \in \llbracket 1, m \rrbracket, j \neq i. \quad (5)$$

For what follows and without loss of generality, we suppose that  $\alpha_{i+1} \leq \alpha_i$  for all  $i \in \llbracket 1, m-1 \rrbracket$  so that  $\alpha = \alpha_m < 1$ . Before to continue, we need some additional hypotheses on the nonlinearity  $F = (f_i)_{i=1}^m$ , hence, for all  $i \in \llbracket 1, m \rrbracket$ .

(H1) The principal eigenvalue  $\lambda_1$  of the matrix  $DF(0)$  is positive,

(H2)  $F$  is concave,  $DF(0)$  is a symmetric matrix and  $\frac{\partial f_i(0)}{\partial u_i} > 0$  for all  $i \in \llbracket 1, m \rrbracket$ .

(H3) There exists  $\Lambda > 1$  such that, for all  $s = (s_i)_{i=1}^m \in \mathbb{R}_+^m$  satisfying  $|s| \leq \Lambda$ ,

$$Df_i(0)s - f_i(s) \leq c_\delta |s_i|^{1+\delta},$$

(H4) For all  $s = (s_i)_{i=1}^m \in \mathbb{R}_+^m$  satisfying  $|s| \geq \Lambda$ , we have  $f_i(s) \leq 0$ ,

(H5)  $F = (f_i)_{i=1}^m$  is globally Lipschitz on  $\mathbb{R}^m$ ,

where the constant  $c_\delta$  is positive and independent of  $i \in \llbracket 1, m \rrbracket$  and

$$\delta \geq \frac{2}{d+2\alpha}.$$

To state the main result, we consider  $\phi$  the positive constant eigenvector of  $DF(0)$  associated to the first eigenvalue  $\lambda_1$ . Thus  $\lambda_1 > 0$  and  $\phi > 0$  satisfy

$$\begin{aligned} (L - DF(0))\phi &= -\lambda_1\phi \\ \phi &> 0, \quad \|\phi\| = 1 \end{aligned}$$

where  $L = \text{diag}((-\Delta)^{\alpha_1}, \dots, (-\Delta)^{\alpha_m})$ . Now, let consider the autonomous system

$$\begin{aligned} \partial_t \chi_\varepsilon(t) &= F(\chi_\varepsilon(t)) \\ \chi_\varepsilon(0) &= \varepsilon\phi \end{aligned} \quad (6)$$

thus, there exists  $\varepsilon' > 0$  such that, for each  $\varepsilon \in (0, \varepsilon')$  we can find a constant  $u_\varepsilon^+ > 0$  satisfying  $\chi_\varepsilon(t) \nearrow u_\varepsilon^+$  as  $t \rightarrow +\infty$ , also  $F(u_\varepsilon^+) = 0$ . We define

$$u^+ = \inf_{\varepsilon \in (0, \varepsilon')} u_\varepsilon^+$$

since  $F$  is continuous, we deduce that  $F(u^+) = 0$ , therefore  $u^+$  is a constant steady state solution of (4). Also, since the function  $F$  is positive in a small positive values close to zero, we have that  $u^+ > 0$ . Before to state the main result, in which we prove that the solution of (3) converge to  $u^+$  exponentially fast in time, we assume that the initial condition  $u_0$  satisfies

$$u_0 \leq u^+ \quad \text{in } \mathbb{R}^d \quad (7)$$

**Theorem 1.1** Let  $d \geq 1$  and assume that  $F$  satisfies (5) and (H1) to (H5). Let  $u$  be the solution to (3) with  $u_0$  satisfying (4) and (7). If  $c < \frac{\lambda_1}{d+2\alpha}$ , then

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} \inf_{|x| \leq e^{ct}} |u_i(t, x) - u_i^+| = 0$$

for all  $i \in \llbracket 1, m \rrbracket$ .

## 2. STEADY STATE SOLUTION

Recall that the operator  $A = -\text{diag}((-\Delta)^{\alpha_1}, \dots, (-\Delta)^{\alpha_m})$  is sectorial (see [7]) in  $(L^2(\mathbb{R}^d))^m$ , with domain  $D(A) = H^{2\alpha_1}(\mathbb{R}^d) \times \dots \times H^{2\alpha_m}(\mathbb{R}^d)$ . Thus, since  $u_0 \in (L^2(\mathbb{R}^d))^m$ , the Cauchy Problem (3) has a unique sectorial solution  $u \in C((0, \infty), D(A)) \cap C([0, \infty), (L^2(\mathbb{R}^d))^m)$  and  $\frac{du}{dt} \in C((0, \infty), (L^2(\mathbb{R}^d))^m)$ .

We prove Theorem 1.1 through a sequence of lemmas. Let  $B_R(0)$  be the open ball of  $\mathbb{R}^d$ , with center 0 and radius  $R$ , also, we denote  $B_R(0)^c = \mathbb{R}^d \setminus B_R(0)$ . Now, let us call  $u^R$  the unique solution of the elliptic system

$$\begin{aligned} (-\Delta)^{\alpha_i} u_i^R &= f_i(u^R), & \text{in } B_R(0) \\ u^R &= 0 & \text{on } B_R(0)^c \\ u^R &> 0 & \text{on } B_R(0) \end{aligned} \quad (8)$$

for all  $i \in \llbracket 1, m \rrbracket$ .

**Lemma 2.1** Let  $\varepsilon > 0$  and assume that  $F$  satisfies (5) and (H1) to (H3). There exists  $R > 0$  such that the solution  $v^R$  of the system

$$\begin{aligned} \partial_t v_i^R + (-\Delta)^{\alpha_i} v_i^R &= f_i(v^R), \quad t > 0, x \in B_R(0) \\ v^R(t, x) &= 0 \quad \text{on } [0, \infty) \times B_R(0)^c \\ 0 < v^R(0, x) &\leq \min(\varepsilon, u^R), \quad \text{on } B_R(0). \end{aligned} \quad (9)$$

satisfies

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} v^R(t, x) = u^R(x) \quad \forall x \in B_1(0)$$

**Proof:** Let  $\phi^R$  be the positive eigenvalue associated to  $\lambda_R$  in the ball  $B_R(0)$ , thus  $\phi^R$  and  $\lambda_R$  satisfy

$$\begin{aligned} (L - DF(0))\phi^R &= \lambda_R\phi^R \quad \text{in } B_R(0) \\ \phi^R &> 0 \text{ in } B_R(0), \quad \phi^R = 0 \text{ in } B_R(0)^c, \quad \|\phi^R\| = 1 \end{aligned}$$

Now, following the computations in [3], by (H2), we can deduce that  $\lambda_R$  given by the minimum of

$$\frac{\frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \int_{\mathbb{R}^d} \left( \int_{\mathbb{R}^d} \frac{(\phi_i(x) - \phi_i(y))^2}{|x-y|^{d+2\alpha}} dy \right) dx}{\sum_{i=1}^m \int_{B_R(0)} \phi_i(x)^2 dx} - \frac{\int_{B_R(0)} [DF(0)\phi(x)] \cdot \phi(x) dx}{\sum_{i=1}^m \int_{B_R(0)} \phi_i(x)^2 dx}$$

taken over all functions  $\phi \in C^1(B_R(0)) \cap C(\bar{B}_R(0))$ ,  $\phi \neq 0$ , vanishing on  $\partial B_R(0)$  and extended by 0 outside  $B_R(0)$ , where the minimum is uniquely (up to a multiplicative constant) attained by the principal eigenfunction  $\phi^R$ , converges to  $-\lambda_1$  when  $R$  goes to infinite, moreover, by

hypothesis (H1) we have that  $\lambda_1 > 0$ , thus, we can find  $R > 0$  large enough such that  $\lambda_R < 0$ .

Since  $u^R$  and  $v^R$  satisfy (8) and (9) in the ball  $B_R(0)$ ,  $u^R = v^R = 0$  in  $B_R(0)^c$  and  $v^R(0, \cdot) \leq u^R(\cdot)$  in  $\mathbb{R}^d$ , then, by the maximum principle, we have that  $v^R(t, x) \leq u^R(x)$  for all  $t > 0$  and  $x \in \mathbb{R}^d$ .

Let  $w^R$  be the solution of

$$\begin{aligned} \partial_t w_i^R + (-\Delta)^{\alpha_i} w_i^R &= f_i(w^R), \quad t > 0, x \in B_R(0) \quad (10) \\ w^R(t, x) &= 0 \quad \text{on } [0, \infty) \times B_R(0)^c \\ w^R(0, x) &= k\phi^R(x), \quad \text{on } B_R(0). \end{aligned}$$

Taking  $k > 0$ , we deduce

$$f_i(k\phi^R) \geq kDf_i(0)\phi^R - ck^{1+\delta}(\phi_i^R)^{1+\delta}$$

Therefore, it follows from the above inequality and by the definition of  $\phi^R$  that

$$(-\Delta)^{\alpha_i} k\phi_i^R - f_i(k\phi^R) = k\phi_i^R (\lambda_R + ck^\delta(\phi_i^R)^\delta) \leq 0$$

in  $B_R(0)$ , for all  $i \in \llbracket 1, m \rrbracket$ , taking  $k$  small enough and since  $\lambda_R < 0$ . Then  $k\phi^R$  is a subsolution of (8) in the ball  $B_R(0)$ . Thus  $w^R$  is nondecreasing in time  $t$ . Moreover, taking  $k > 0$  small if necessary,  $w^R(0, x) \leq v^R(0, x)$  in  $\mathbb{R}^d$ , thus

$$w^R(t, x) \leq v^R(t, x), \quad \forall t > 0, x \in B_R(0)$$

Finally, one has

$$w^R(t, x) \leq v^R(t, x) \leq u^R(x), \quad \forall t > 0, x \in B_R(0)$$

Since  $w^R$  is nondecreasing in time  $t$ , standard elliptic estimates imply that  $w^R$  converges locally to a stationary solution  $w^\infty (\leq u^R)$  of (10). But since  $u^R$  is the unique solution of (8), we conclude that  $v^R(t, x) \rightarrow u^R(x)$  in  $B_R(0)$  and then, we conclude the convergence in  $B_1(0)$ .

**Remark 2.1** Let us note that for each  $y \in \mathbb{R}^d$ , if  $x \in B_1(y)$  then  $x - y \in B_1(0)$ . Thus taking  $\sigma = (\sigma)_{i=1}^m > 0$ , as a consequence of Lemma 2.1, there exist  $R > 0$  and  $T_\sigma > 0$  that not depend of  $y$ , such that, for all  $t \geq T_\sigma$

$$|v_i^R(t, x - y) - u_i^R(x - y)| \leq \sigma_i \quad \forall x \in B_1(y)$$

for each  $i \in \llbracket 1, m \rrbracket$ .

The proof of Theorem 1.1 essentially relies on the following property in which we prove that any steady state solution of (3) is bounded from below away from zero.

**Lemma 2.2** Let  $d \geq 1$  and assume that  $F$  satisfies (5) and (H1) to (H3). Let  $v$  be any positive, bounded, continuous solution of

$$(-\Delta)^{\alpha_i} v_i = f_i(v), \quad \forall i \in \llbracket 1, m \rrbracket \quad (11)$$

Then, there exists  $\varepsilon > 0$  small enough such that  $v \geq \varepsilon\phi$  in  $\mathbb{R}^d$ .

**Proof:** In what follows, we prove that there exists a constant vector  $k > 0$  such that  $v \geq k$  in  $\mathbb{R}^d$ . Let  $y \in \mathbb{R}^d$  be any arbitrary fixed vector, we note that  $v(\cdot + y)$  continue satisfying (11), moreover, for each  $R > 0$ , there exists a constant  $k_{y,R} > 0$  such that  $v(x + y) \geq k_{y,R}$  for all  $x \in B_R(0)$ .

Now, let consider the system

$$\begin{aligned} \partial_t w_i^R + (-\Delta)^{\alpha_i} w_i^R &= f_i(w^R), \quad t > 0, x \in B_R(0) \quad (12) \\ w^R(t, x) &= 0 \quad \text{on } [0, \infty) \times B_R(0)^c \\ 0 < w^R(0, x) &\leq \min(k_{y,R}, u^R), \quad \text{on } B_R(0)^c \end{aligned}$$

Since  $v(\cdot + y) \geq w^R(0, \cdot)$  in  $\mathbb{R}^d$ , by the maximum principle, we have that

$$v(x + y) \geq w^R(t, x) \quad \forall (t, x) \in [0, \infty) \times \mathbb{R}^d \quad (13)$$

Now, by Lemma 2.1, there exists  $R > 0$  large enough such that  $w^R(t, x)$  converges to  $u^R(x)$ , as  $t \rightarrow +\infty$  for all  $x \in B_1(0)$ . Hence, taking the limit when  $t$  tends to  $+\infty$  in (13), we have that

$$v(x + y) \geq u^R(x) \quad \forall x \in B_1(0)$$

Furthermore, taking  $x = 0$  and since  $y \in \mathbb{R}^d$  is arbitrary, we conclude

$$v(y) \geq u^R(0) := k \quad \forall y \in \mathbb{R}^d$$

Finally, we take  $\varepsilon > 0$  small enough such that  $k \geq \varepsilon\phi$ .

In the following result we state a relation between the stationary solution in the ball  $B_R(0)$  and the stationary solution in the whole space.

**Lemma 2.3** Let  $d \geq 1$  and assume that  $F$  satisfies (5) and (H1) to (H3). Let  $u^R$  be the solution of the system

$$\begin{aligned} (-\Delta)^{\alpha_i} u_i^R &= f_i(u^R), \quad \forall x \in B_R(0) \quad (14) \\ u^R &= 0 \quad \text{on } \mathbb{R}^d \setminus B_R(0) \\ u^R &> 0 \quad \text{on } B_R(0) \end{aligned}$$

then,  $u^R$  converges to  $u^+$  as  $R \rightarrow +\infty$ , locally on compact sets.

**Proof:** Let  $R < R'$  and  $x \in B_{R'} \setminus B_R$ , thus  $u^R(x) = 0$ ,  $f_i(u^R) = 0$  and  $(-\Delta)^{\alpha_i} u_i^R(x) \leq 0$ , then we have that  $u^R$  is a subsolution of (14) on  $B_{R'}$ , hence, we conclude  $u^R \leq u^{R'}$  and therefore the sequence  $\{u^R\}$  is nondecreasing in  $R$ . Moreover, since  $u^+$  is a supersolution of (14) for all  $R > 0$ , we have that  $u^R \leq u^+$  for all radius  $R$ . Hence, the sequence  $\{u^R\}$  is nondecreasing, bounded and by elliptic estimates converges in compact sets to a positive solution  $v \leq u^+$  of (11). Now, since  $F(u^+) = 0$ , then  $u^+$  satisfies the system (11) and by Lemma 2.2, there exists  $\varepsilon > 0$  such that  $v \geq \varepsilon\phi$  in  $\mathbb{R}^d$ . Thus, we deduce that  $v(x) \geq \chi_\varepsilon(t)$  for

all  $t \geq 0$  and  $x \in \mathbb{R}^d$ , where the function  $\chi_\varepsilon$  satisfies (6). Therefore, taking  $t \rightarrow +\infty$  and by the definition of  $u^+$ , we deduce that

$$v(x) \geq u_\varepsilon^+ \geq u^+, \quad \forall x \in \mathbb{R}^d$$

Since  $v \leq u^+$ , we conclude that  $v \equiv u^+$ .

**Remark 2.2** As a consequence of Lemma 2.3, for each  $\sigma = (\sigma)_{i=1}^m > 0$  and  $y \in \mathbb{R}^d$ , there exists  $R_\sigma > 0$  that not depends of  $y$ , such that, for all  $R \geq R_\sigma$

$$|u_i^R(x - y) - u_i^+| \leq \sigma_i \quad \forall x \in B_1(y)$$

for each  $i \in \llbracket 1, m \rrbracket$ .

### 3. PROOF OF MAIN RESULT

Now, we can prove our main result.

**Proof of Theorem 1.1:** First, since  $u_0(x) \leq u^+$  and  $u^+$  satisfies the equation (3), by the maximum principle, we deduce that  $u(t, x) \leq u^+$ . Now, let  $c < \frac{\lambda_1}{d+2\alpha}$ , we take  $c < c_1 < c_2 < \frac{\lambda_1}{d+2\alpha}$  fixed, thus by Theorem 1.1 of [6], there exists  $\tau > 0$  and  $\varepsilon = (\varepsilon_i)_{i=1}^m$ , such that

$$u_i(s, x) > \varepsilon_i, \quad \text{for all } s \geq \tau \text{ and } |x| \leq e^{c_2 s} \quad (15)$$

where  $u = (u_i)_{i=1}^m$  is the solution of (3).

Let  $\sigma > 0$ , by the Remarks 2.1 and 2.2, we can find  $R_\sigma > 0$  and  $T_\sigma > 0$  large enough such that for  $R \geq R_\sigma$  and  $s \geq T_\sigma$ , we have

$$|v_i^R(s, x - y) - u_i^R(x - y)| \leq \frac{\sigma_i}{2} \quad (16)$$

and

$$|u_i^R(x - y) - u_i^+| \leq \frac{\sigma_i}{2} \quad (17)$$

for all  $y \in \mathbb{R}^d$ ,  $x \in B_1(y)$  and  $i \in \llbracket 1, m \rrbracket$ . In what follows, taking  $R \geq R_\sigma$  and  $\tau$  large if necessary such that

$$R < e^{c_2 \tau} - e^{c_1 \tau}, \quad e^{c_1 T_\sigma} < e^{(c_1 - c)\tau}$$

we consider  $y \in \{z : |z| + R \leq e^{c_2 s}\}$  with  $s \geq \tau$ . Then by (15),  $v^R(0, \cdot - y)$  defined on  $B_R(y)$  as in the Lemma 2.1 is a subsolution of (3) for times larger than  $s$  and for all  $x \in \mathbb{R}^d$ . Thus, by the maximum principle and (16), we have that

$$u_i(\omega + s, x) \geq u_i^R(x - y) - \frac{\sigma_i}{2}$$

for all  $\omega \geq T_\sigma$  and  $x \in B_1(y)$ . Moreover, since  $R \geq R_\sigma$  and taking  $\omega = T_\sigma$ , by (17)

$$u_i(s + T_\sigma, x) \geq u_i^+ - \sigma_i, \quad \text{for all } x \in B_1(y)$$

Furthermore, since  $\{z : |z| \leq e^{c_1 s}\}$  is a compact set, we can find a finite number of vectors  $y_1, \dots, y_k$ , such that  $\bigcup_{i=1}^k B_1(y_i)$  cover  $\{z : |z| \leq e^{c_1 s}\}$ . Thus, we have

$$u_i(s + T_\sigma, x) \geq u_i^+ - \sigma_i \quad \text{for all } |x| \leq e^{c_1 s}$$

Then, taking  $t = s + T_\sigma \geq \tau + T_\sigma$

$$u_i(t, x) \geq u_i^+ - \sigma_i \quad \text{for all } |x| \leq e^{-c_1 T_\sigma} e^{c_1 t}$$

thus, we conclude the proof taking  $\tau_\sigma := \tau + T_\sigma$  and by election of  $\tau$ , we have that

$$u_i(t, x) \geq u_i^+ - \sigma_i \quad \text{for all } |x| \leq e^{ct}.$$

### REFERENCES

- [1] D.G. Aronson and H.F. Weinberger, Multidimensional nonlinear diffusions arising in population genetics, Adv. Math. 30, 1978, pp. 33-76.
- [2] H. Berestycki, F. Hamel and L. Roques, Analysis of the periodically fragmented environment model. I. Species persistence, J. Math. Biol 51, 2005, pp. 75-113.
- [3] H. Berestycki, J.-M. Roquejoffre, and L. Rossi, The periodic patch model for population dynamics with fractional diffusion, Discrete Contin. Dyn. Syst. Ser. S 4, 2011, pp. 1-13.
- [4] X. Cabré and J. Roquejoffre. Propagation de fronts dans les équations de Fisher KPP avec diffusion fractionnaire. C. R. Math. Acad. Sci. Paris 347, 2009, pp. 1361-1366.
- [5] X. Cabré and J. Roquejoffre. The influence of fractional diffusion in Fisher-KPP equation. Commun. Math. Phys 320, 2013, pp 679-722.
- [6] A-C. Coulon and M. Yangari. (2014, Sept.), Exponential propagation for fractional reaction-diffusion cooperative systems with fast decaying initial conditions, 2014, Available: <http://arxiv.org/pdf/1405.5113v2.pdf>.
- [7] D. Henry, Geometric Theory of Semilinear Parabolic Equations, Springer-Verlag, New York, 1981, pp. 49-62.
- [8] A.N. Kolmogorov, I.G. Petrovsky and N.S. Piskunov, Étude de l'équation de la diffusion avec croissance de la quantité de matière et son application à un problème biologique, Bull. Univ. État Moscou Sér. Inter. A 1, 1937, pp. 1-26.
- [9] B. Li, H. Weinberger and M. Lewis. Spreading speeds as slowest wave speeds for cooperative systems. Math. Biosci. 196, 2005, pp. 82-98.

- [10] R. Mancinelli, D. Vergni, and A. Vulpiani. Front propagation in reactive systems with anomalous diffusion, *Phys. D* 185, 2003, pp. 175-195.
- [11] H.F. Weinberger, M. Lewis and B. Li. Analysis of linear determinacy for spread in cooperative models. *J. Math. Biol.* 45, 2002, pp. 183-218.

# Controlador de Modos Deslizantes basado en Predictor de Smith y Modelo de Segundo Orden para Procesos con Elevado Retardo

De La Cruz, F.\*; Camacho O.\*\*

\*Universidad Nacional Experimental Politécnica "Antonio José de Sucre". Vicerrectorado Barquisimeto  
Departamento de Ingeniería Electrónica, Barquisimeto, Venezuela  
e-mail: fdlcruz@unexpo.edu.ve

\*\* Investigador Prometeo. Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Quito, Ecuador.  
Universidad de Los Andes, Facultad de Ingeniería. Mérida, Venezuela  
e-mail: camacho1959@gmail.com

**Resumen:** Se presenta un nuevo procedimiento para el desarrollo de un controlador de modos deslizantes basado en un Predictor de Smith para procesos con elevado tiempo muerto, a partir del modelo de segundo orden más tiempo muerto (SOMTM) de un proceso y una superficie deslizante de tipo PID. El controlador posee una estructura fija y se presenta un conjunto de ecuaciones de sintonización basado en los parámetros del modelo. Se describe el procedimiento para la obtención del modelo SOMTM que servirá de base para el desarrollo del controlador. El procedimiento de diseño se ilustra mediante dos ejemplos numéricos y la simulación de los sistemas muestra el adecuado desempeño y la robustez del controlador.

**Palabras clave:** Control de modos deslizantes, predictor de Smith, robustez, tiempo muerto, retardo, modelo SOMTM.

**Abstract:** A new approach for the development of a Smith Predictor based Sliding Mode Controller for processes with elevated dead time is presented. A PID sliding surface and a second order deadtime (SOPDT) model have been used to synthesize the controller. The approach results in a fixed controller structure with a set of tuning equations as a function of the parameters of the model. The design procedure is illustrated by two numerical examples and simulation systems shows the proper performance and robustness of the controller

**Keywords:** Sliding Mode Control, Smith predictor, robustness, deadtime, delay, SOPDT model.

## 1. INTRODUCCIÓN

En el diseño de controladores muchas veces se encuentran problemas relacionados con la no-exactitud del modelo de la planta, las perturbaciones externas o la existencia de no linealidades en el proceso. Una de las no-linealidades más comunes es el tiempo muerto o retardo de transporte, que afecta el comportamiento de la planta, haciendo que su análisis sea más complicado. Este retardo puede ser causado por el transporte de masa o energía de un lugar a otro, tiempos de procesamiento o acumulación de pequeños retardos en sistemas conectados en serie, entre otros [8]. Para los procesos que exhiben tiempo muerto, cada acción ejecutada en la variable manipulada del proceso sólo afectará a la variable controlada después del tiempo muerto del proceso. Debido a esto, es más difícil de analizar y diseñar controladores para sistemas de tiempo muerto.

En la actualidad se han hecho propuestas para el análisis, diseño e implementación de sistemas que permitan realizar esquemas y estrategias de control que afronten la no-linealidad del tiempo muerto y dar mejoras a las respuestas de dichos sistemas, además de darle un mejor desempeño y una mejor robustez ante perturbaciones en el proceso. Estas

estrategias son conocidas como compensadores de tiempo muerto.

El primer compensador de tiempo muerto, y quizás el más utilizado, fue creado en 1957, por O. J. Smith [14], quien presentó un esquema de control para sistemas de una sola entrada y una sola salida (SISO), el cual tiene el potencial de mejorar el control de lazo con tiempo muerto. Este esquema de control es conocido actualmente como el Predictor de Smith y es una de las técnicas más conocidas y utilizadas en la práctica para controlar sistemas de elevado retardo o tiempo muerto [10]. La manera de sintonizar el controlador en la estructura del PS influye notablemente en el comportamiento global del sistema. Si la técnica de sintonización utilizada no es la adecuada, se obtendrán respuestas muy pobres y el sistema que contiene al PS será subutilizado, es decir, varias de las propiedades o ventajas aportadas en teoría por el PS serán total o parcialmente anuladas.

Por otro lado, el control de modo deslizante (Sliding Mode Control o SMC) es un procedimiento robusto y simple para desarrollar controladores de procesos lineales y no lineales. La idea detrás del control de modo deslizante consiste en definir una superficie (superficie deslizante) a lo largo de la cual el proceso pueda deslizarse hacia su valor final deseado. Esto se logra por medio de una ley de control que forma parte del diseño de un controlador de modo deslizante (Sliding Mode Controller) o SMCr [2].

Varios autores han propuesto modificaciones o técnicas de ajuste específicas para controladores que forman parte de la

Autor para correspondencia: fdlcruz@unexpo.edu.ve, +58-416-6746583. Campus UNEXPO. Av. Corpahuaico. Barquisimeto 3002. Venezuela.

estructura tipo PS, tanto para obtener sistemas robustos como para reducir el número de parámetros de ajuste [8], [10], [11]. Una de ellas consiste en la utilización de un controlador de modo deslizante en la estructura del PS tanto para procesos integrantes [4] como no integrantes [11][3]. El SP funciona bien en la compensación del tiempo muerto y el SMCr es un controlador de comprobada robustez, por lo tanto, combinando y preservando las buenas propiedades de ambas técnicas y mejorando las deficiencias del SP, se presenta en este artículo un controlador robusto para procesos con retardo elevado: el controlador de modo deslizante basado en Predictor de Smith basado en un modelo de segundo orden más tiempo muerto SP2-SMCr.

Este trabajo se organiza como sigue: La sección 2 introduce los conceptos básicos del controlador de modo deslizante y de la arquitectura del SP. La sección 3 cubre el desarrollo del SP2-SMCr basado en un modelo de segundo orden más tiempo muerto. La sección 4 muestra resultados de simulaciones donde también se prueba la robustez. Las conclusiones se presentan en la sección 5.

## 2. ASPECTOS TEÓRICOS

### 2.1. Predictor de Smith

Según lo indicado antes, el SP es un esquema popular para la compensación del tiempo muerto. La Fig. 1 muestra la arquitectura del SP, donde  $G_c(s)$  representa el controlador mientras que la función de transferencia del proceso es  $G_p(s)$ . En paralelo al proceso existe un modelo de dicho proceso  $G_m(s)$  que consiste en una función de transferencia estable racional  $G(s)$  y de un tiempo muerto,  $t_0$  y puede expresarse según (1).

$$G_m(s) = G(s) e^{-t_0 s} \quad (1)$$

En esta estructura se realimenta la predicción de la salida del proceso calculada usando un modelo de la planta sin retardo  $G(s)$  para aumentar el desempeño del sistema. La diferencia entre las salidas del proceso y del modelo,  $e_m(t) = y(t) - y_m(t)$ , se realimenta para corregir errores de modelado y perturbaciones de la carga. La función de transferencia de lazo cerrado es:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G_c(s)G_p(s)}{1 + G_c(s)G(s) + G_c(s)[G_p(s) - G_m(s)]} \quad (2)$$

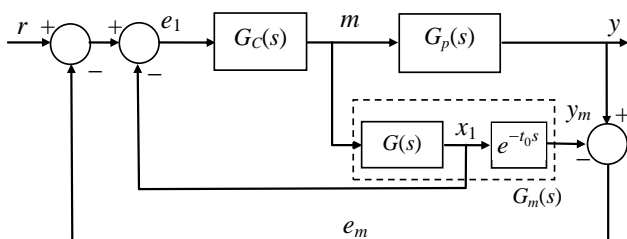


Figura 1. Predictor de Smith

Cuando existe un modelado de la planta perfecto, lo cual significa que  $G_m(s) = G_p(s)$ , la función de transferencia de lazo cerrado se reduce a la expresión indicada en (3).

$$\frac{Y(s)}{R(s)} \cong \frac{G_c(s)G_p(s)}{1 + G_c(s)G(s)} \quad (3)$$

Esto también implica que  $e_m(t) = y(t) - y_m(t) = 0$  y, por tanto, la realimentación consiste sólo de la salida del modelo sin retardo. De esta manera, el tiempo muerto se aísla y se compensa [16], y así, puede ser ignorado para los propósitos del diseño del controlador, ya que el mismo no aparece en la ecuación característica del sistema. Sin embargo el PS es poco robusto y puede presentar inestabilidad debido a errores de modelado y además, en procesos integrantes, una perturbación constante en la carga da lugar a un error de estado estacionario.

### 2.2 Control de modos deslizantes

El Control de Modo Deslizante (SMC) es una técnica derivada del control de estructura variable (*Variable structure control*, VSC), el cual fue estudiado originalmente por Utkin [17]. Un controlador diseñado usando el método de SMC es robusto y sencillo particularmente atractivo debido a su capacidad de controlar sistemas no lineales y sistemas variantes en el tiempo [2],[13].

El diseño basado en SMC consiste en definir una superficie a lo largo de la cual el proceso pueda deslizarse hacia su valor final deseado; La Fig. 2 representa el objetivo de SMC. La estructura del lazo de control permanece fija hasta que el estado cruza  $S(t) = 0$  y entonces ajustada para que el estado se deslice a lo largo de esta superficie. Por tanto, es necesario definir la superficie deslizante  $S(t)$ , la cual representa un comportamiento global deseado, por ejemplo, estabilidad y desempeño en el seguimiento y que usualmente se formula como una función lineal del estado del sistema. Esta superficie puede representarse como:

$$S(t) = f(r(t), x_m(t), e_m(t), \lambda, n) \quad (4)$$

Donde  $r(t)$  es la señal de referencia,  $x_m(t)$  es la salida del modelo,  $e_m(t)$  es el error del modelado,  $n$  es el orden del modelo y  $\lambda$  es un parámetro de sintonización [3].

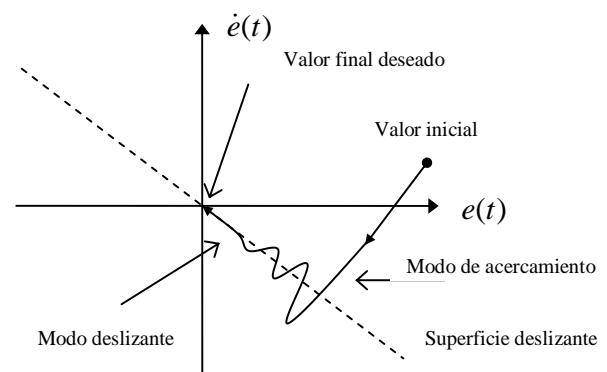


Figura 2. Interpretación gráfica de SMC.

El objetivo de control es asegurar que la variable controlada sea igual a la referencia en todo momento, es decir que el error y sus derivadas sean iguales a cero. Una vez que el valor de referencia se alcanza,  $S(t)$  toma un valor constante y el problema de seguimiento de la referencia se reduce a satisfacer la condición deslizante:

$$\frac{dS(t)}{dt} = 0 \quad (5)$$

Una vez que se haya seleccionado la superficie deslizante, la atención se debe dirigir a diseñar la ley del control que conduce la variable controlada a su valor de referencia y satisface la condición deslizante. La ley del control de SMC,  $M(t)$ , consiste en dos porciones aditivas; una parte continua,  $U_C(t)$ , y una parte discontinua,  $U_D(t)$ . Eso es:

$$M(t) = U_C(t) + U_D(t) \quad (6)$$

La parte continua es responsable de mantener la variable sobre la superficie deslizante. La parte discontinua incorpora un elemento no lineal que incluye el elemento de conmutación de la ley del control. Esta parte del controlador es discontinuo a través de la superficie deslizante y es responsable de que la variable alcance la superficie. Para suavizar la discontinuidad, se emplea la función sigma o de saturación de la forma:

$$U_D(t) = K_D \frac{S(t)}{|S(t)| + \delta} \quad (7)$$

donde  $K_D$  es el parámetro de sintonización responsable del modo de acercamiento.  $\delta$  es un parámetro de ajuste usado para reducir una indeseada oscilación de alta frecuencia alrededor del punto deseado de equilibrio conocida como *chattering* que implica elevada actividad de control que normalmente no es tolerada por los actuadores y que también puede excitar la dinámica de alta frecuencia ignorada en el modelado del sistema [2]. En resumen, la ley del control da lugar a un movimiento rápido para llevar el estado sobre la superficie deslizante, y un movimiento lento para proseguir hasta que se alcanza un estado deseado.

El diseño de un controlador de modo deslizante (SMCr) depende del modelo del proceso. Camacho y Smith [2] desarrollaron un método sencillo y práctico diseñar un SMCr basado en un modelo de primer orden más tiempo muerto (POMTM) del proceso real.

### 2.3 Caracterización de un proceso usando un modelo de segundo orden más tiempo muerto

Para diseñar o sintonizar controladores, es necesario contar con información del comportamiento dinámico del proceso, normalmente en forma de un modelo de orden reducido (primero o segundo orden, más tiempo muerto). La identificación de los parámetros de estos modelos (ganancia, tiempo muerto y constantes de tiempo), puede hacerse a partir de la respuesta del proceso a un cambio escalón en la entrada, denominada curva de reacción del proceso (ver Fig. 3).

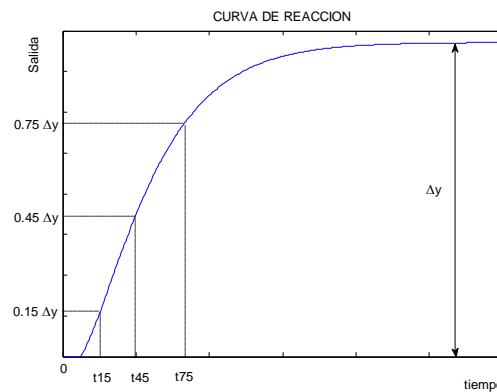


Figura 3. Curva de reacción del proceso

Existen varios métodos para la determinación de estos parámetros, y se basan en la determinación de los tiempos requeridos para alcanzar dos o tres puntos específicos en la gráfica de la respuesta del proceso. Existen métodos de dos puntos que permiten obtener un modelo de primer orden más tiempo muerto (POMTM) o de tres puntos para conseguir un modelo de segundo orden, más tiempo muerto (SOMTM) [1]. El método de Stark considera de tres puntos, los cuales corresponden a los tiempos para que la respuesta del sistema alcance 15% ( $t_{15}$ ), 45% ( $t_{45}$ ) y 75% ( $t_{75}$ ) del cambio en la salida del sistema ( $\Delta y$ ) a un cambio escalón en la entrada ( $\Delta u$ ), tal como se muestra en la figura 3, para obtener un modelo SOMTM de la forma:

$$\frac{Y(s)}{M(s)} = \frac{K \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} e^{-t_0 s} \quad (8)$$

En este método, las siguientes ecuaciones permiten obtener las constantes  $K$ ,  $\zeta$  y  $\omega_n$  así como el tiempo muerto  $t_0$  del modelo:

$$x = \frac{t_{45} - t_{15}}{t_{75} - t_{15}} \quad (9)$$

Luego

$$\zeta = \frac{0.0805 - 5.547(0.475 - x)^2}{x - 0.356} \quad (10)$$

Si  $\zeta \leq 1.0$ , entonces:

$$f_2(\zeta) = 0.708(2.811)^\zeta \quad (11)$$

Si  $\zeta > 1.0$ , entonces:

$$f_2(\zeta) = 2.6\zeta - 0.6$$

Así, se tiene que

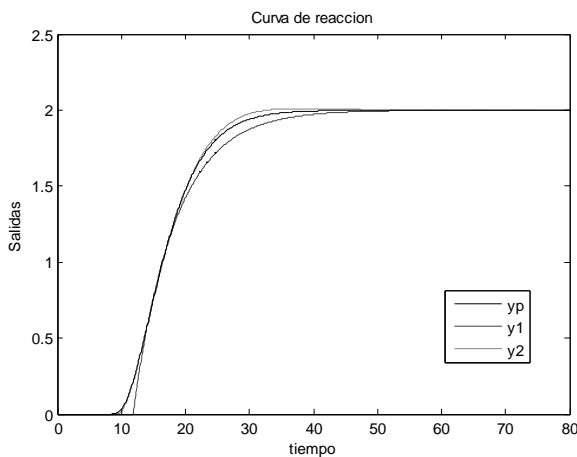
$$\omega_n = \frac{f_2(\zeta)}{t_{75} - t_{15}} \quad (12)$$

Además

$$f_3(\zeta) = 0.922(1.66)^\zeta \quad (13)$$

$$t_0 = t_{45} - \frac{f_3(\zeta)}{\omega_n} \quad (14)$$





**Figura 4.** Curvas de reacción del proceso original (yp), del modelo POMTM (y1) y del modelo SOMTM (y2)

Finalmente, la ganancia está dada por el cambio total en la salida ( $\Delta y$ ) dividido por el cambio en la entrada ( $\Delta u$ ):

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta u} \quad (15)$$

Para ilustrar este método, considérese un proceso con la función de la transferencia  $G_1(s)$ , el cual ha sido estudiado en [9] y otros trabajos.

$$G_1(s) = \frac{2}{(4s+1)(3s+1)(2s+1)} e^{-8.5s} \quad (16)$$

El modelo POMTM  $G_{11}(s)$  obtenido por el método de Smith de dos puntos, utilizado frecuentemente en la literatura y descrito en detalle en [1], está dado por

$$G_{11}(s) = \frac{2}{(6.6s+1)} e^{-11.8s} \quad (17)$$

El modelo SOMTM correspondiente  $G_{12}(s)$ , obtenido usando el método de Stark de tres puntos, es

$$G_{12}(s) = \frac{0.095}{(s^2 + 0.375s + 0.0475)} e^{-5.86s} \quad (18)$$

En la Fig. 4 se presentan las respuestas a una entrada escalón unitario de ambos modelos y se comparan con la respuesta del proceso original. Se verifica lo expresado en [1] que “un modelo de segundo orden bien identificado será siempre mejor que un modelo de primer orden aunque éste obtenga buenos resultados”.

#### 2.4 Controlador de Modo Deslizante Basado en Predictor de Smith

El controlador de modo deslizante basado en predictor de Smith (SPSMCr) propuesto usa la arquitectura estándar del SP mientras que el controlador se basa en un controlador de modo deslizante (SMCr). Se obtiene así un controlador robusto y que compensa procesos con retardo elevado.

Varios trabajos presentan controladores de modo deslizante basado en predictor de Smith [3],[4],[6],[11] y todos ellos emplean un modelo POMTM para el desarrollo del SMCr. En

este trabajo se utiliza un modelo SOMTM para desarrollar el controlador de modo deslizante basado en Predictor de Smith o SP2-SMCr.

Para desarrollar este controlador se considera el diagrama de bloques del predictor de Smith mostrado en la figura 1, donde la función de transferencia del modelo  $G_m(s)$  es

$$G_m(s) = G(s) e^{-t_0 s} = \frac{K_1 \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta \omega_n s + \omega_n^2} e^{-t_0 s} \quad (19)$$

Si no hay diferencia entre el proceso y el modelo, se tiene que la función de transferencia sin retardo es

$$G(s) = \frac{X_1(s)}{M(s)} = \frac{K_1 \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta \omega_n s + \omega_n^2} \quad (20)$$

Y por tanto

$$X_1(s) = M(s) \frac{K_1 \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta \omega_n s + \omega_n^2} = \frac{K M(s)}{s^2 + a_1 s + a_2} \quad (21)$$

Donde  $K = K_1 \omega_n^2$ ,  $a_1 = 2\zeta \omega_n$  y  $a_2 = \omega_n^2$ . Ya que el tiempo muerto  $t_0$  ha sido aislado usando una estructura SP, se puede ignorar en el diseño del controlador. Entonces, transformando (21) en forma de ecuación diferencial:

$$\frac{d^2 x_1(t)}{dt^2} + a_1 \frac{dx_1(t)}{dt} + a_2 x_1(t) = K m(t) \quad (22)$$

y

$$\frac{d^2 X_1(t)}{dt^2} = -a_1 \frac{dX_1(t)}{dt} - a_2 X_1(t) + K m(t) \quad (23)$$

Según Slotine y Li [13], la superficie deslizante puede ser de la forma

$$S(t) = \left( \frac{d}{dt} + \lambda \right)^n \int e(t) dt \quad (24)$$

donde  $e(t)$  es el error de seguimiento y el coeficiente  $\lambda$  es un parámetro de sintonización. Ya que (20) es una función de transferencia de segundo orden, entonces  $n = 2$  y  $S(t)$  puede ser expresada como

$$S(t) = \frac{de_1(t)}{dt} + \lambda_1 e_1(t) + \lambda_0 \int_0^t e_1(t) dt \quad (25)$$

Donde  $e_1(t)$  es la diferencia entre el valor de referencia o set-point,  $r(t)$ , y el valor de la salida de un modelo del proceso sin retardo,  $x_1(t)$ , cuando se considera un modelo perfecto, o sea,  $e_1(t) = r(t) - x_1(t)$ . La ecuación (25) representa una

superficie PID. Se desea que  $\frac{dS(t)}{dt} = 0$ , y por ello se tiene

$$\frac{dS(t)}{dt} = \frac{d^2 e_1(t)}{dt^2} + \lambda_1 \frac{de_1(t)}{dt} + \lambda_0 e_1(t) = 0 \quad (26)$$

Asumiendo un error de modelado igual a cero,  $e_1(t) = r(t) - x_1(t)$  y

$$\frac{d^2 r(t)}{dt^2} - \frac{d^2 x_1(t)}{dt^2} + \lambda_1 \frac{dr(t)}{dt} - \lambda_1 \frac{dx_1(t)}{dt} + \lambda_0 e_1(t) = 0 \quad (27)$$

Descartando en (27) las derivadas del valor de referencia  $r(t)$ , de acuerdo con lo expresado en [2], se llega a

$$\frac{d^2 x_1(t)}{dt^2} = -\lambda_1 \frac{dx_1(t)}{dt} + \lambda_0 e_1(t) \quad (28)$$

Igualando (23) y (28) se obtiene

$$-a_1 \frac{dx_1(t)}{dt} - a_2 x_1(t) + K m(t) = -\lambda_1 \frac{dx_1(t)}{dt} + \lambda_0 e_1(t) \quad (29)$$

Resulta así la siguiente ecuación de control para este controlador SP2-SMCr

$$m(t) = \frac{1}{K} \left[ (2\zeta\omega_n - \lambda_1) \frac{dx_1(t)}{dt} + \lambda_0 e_1(t) + \omega_n^2 x_1(t) \right] + K_D \frac{S(t)}{|S(t)| + \delta} \quad (30)$$

donde

$$S(t) = \text{sign}(K) \left[ -\frac{dx_1(t)}{dt} + \lambda_1 e_1(t) + \lambda_0 \int_0^t e_1(t) dt \right] \quad (31)$$

La función  $\text{sign}(K)$  en (31), fue incluida en la ecuación de la superficie deslizante para garantizar la acción apropiada del controlador para el sistema dado.

Se debe cumplir en (30) que  $\lambda_1 \leq 2\zeta\omega_n$  y  $\lambda_0 \leq \lambda_1^2 / 4$  para asegurar una superficie deslizante críticamente o sobreamortiguada. Partiendo de la recomendación de [2] y con base a las simulaciones realizadas se seleccionaron

$$\lambda_1 = 2\zeta\omega_n \quad (32)$$

$$\lambda_0 = \frac{\lambda_1^2}{8} \quad (33)$$

Los parámetros  $K_D$  y  $\delta$  tienen relación con la velocidad del sistema, el sobrepaso y el *chattering*. Basado en procedimientos previos [2][4] donde se usó el algoritmo de búsqueda Nelder-Mead, los parámetros de ajuste de la parte discontinua del controlador son:

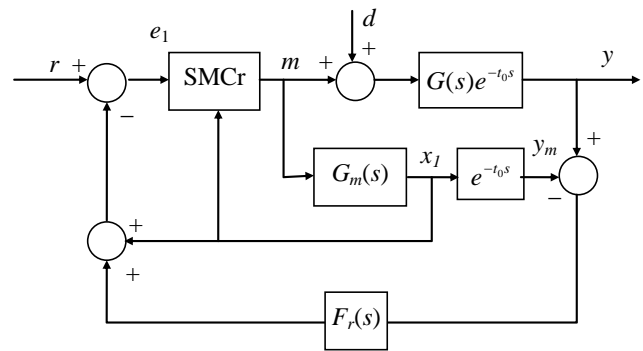
$$K_D = \frac{0.75}{|K|} \left( \frac{\lambda_1}{\lambda_0} \right)^{0.76} \quad (34)$$

$$\delta = 0.68 + 0.12(|K| K_D \lambda_1) \quad (35)$$

Los errores de modelado del tiempo muerto pueden llevar al SP a la inestabilidad. Una solución simple a este problema es usar un filtro  $F_r(s)$  de ganancia unitaria en el lazo de realimentación de la salida [10]. Dicho filtro puede ser definido como el filtro de primer orden dado en (36) con un único parámetro  $T_f$  relacionado con  $t_0$ .

$$F_r(s) = \frac{1}{sT_f + 1} \quad (36)$$

El valor de  $T_f$  puede ser seleccionado como  $T_f = 0.5 t_0$  lo cual proporciona una buena solución para errores de tiempo muerto de hasta 30% [10].



**Figura 5.** Controlador de modos deslizante basado en predictor de Smith y modelo de segundo orden, SP2-SMCr

Finalmente, el diagrama de bloques del SP2-SMCr corresponde al indicado en la Fig. 5.

### 3. EJEMPLOS Y SIMULACIONES

Para ilustrar el desempeño de SP2-SMCr, se presentan a continuación dos ejemplos. En ambos casos, un escalón unitario se aplica a la entrada del sistema en  $t = 0$  y una perturbación constante de amplitud  $d = 0.1$  en la entrada del proceso, se introduce en el instante  $t = 100$ .

#### 3.1. Ejemplo 1

Considérese un proceso con la función de la transferencia  $G_1(s)$ , el cual ha sido estudiado en [9] y otros trabajos.

$$G_1(s) = \frac{2}{(4s+1)(3s+1)(2s+1)} e^{-5s} \quad (37)$$

El modelo SOMTM correspondiente, obtenido usando el método de Stark de tres puntos sobre la curva de reacción es:

$$G_{1m}(s) = \frac{0.095}{(s^2 + 0.375s + 0.0475)} e^{-5.86s} \quad (38)$$

Por tanto  $K = K_1 \omega_n^2 = 0.095$ ,  $a_1 = 2\zeta\omega_n = 0.375$  y  $a_2 = \omega_n^2 = 0.0475$ . Así, Los parámetros de ajuste del SP2-SMCr se muestran en la tabla 1.

**Tabla 1.** Parámetros de ajuste de los controladores

	$\lambda_1$	$\lambda_0$	$K_D$	$\delta$
$G_1(s)$	0.375	0.018	80.8	1.03
$G_2(s)$	4.65	2.71	0.36	1.31

La Fig. 6 muestra la salida del proceso para una entrada escalón unitario y para una perturbación constante  $d=0.1$  en  $t=100$ , en los casos cuando el tiempo muerto del modelo es exacto ( $t_0$  nominal) y cuando existe un error de -20% en el mismo.

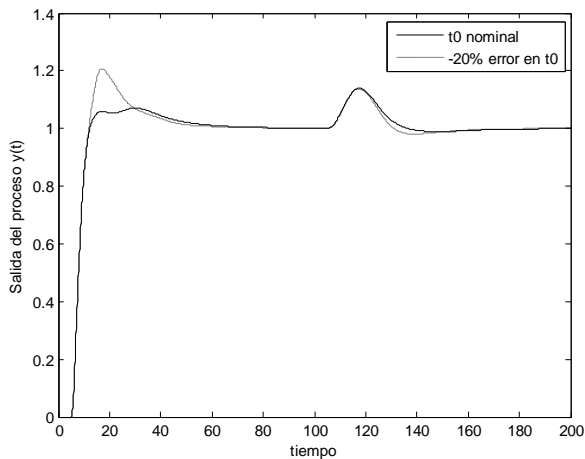


Figura 6. Respuestas del sistema para  $G_1(s)$ .

### 3.2. Ejemplo 2

Considérese un proceso con la función de la transferencia  $G_2(s)$ , el cual ha sido estudiado en [10] y [11].

$$G_2(s) = \frac{1}{(s+1)(0.5s+1)(0.25s+1)(0.125s+1)} e^{-10s} \quad (39)$$

El modelo SOMTM correspondiente, obtenido usando el método de Stark es:

$$G_{2m}(s) = \frac{3.12}{(s^2 + 4.65s + 3.12)} e^{-10.5s} \quad (40)$$

Por tanto  $K = K_1 \omega_n^2 = 3.12$ ,  $a_1 = 2\zeta\omega_n = 4.65$  y  $a_2 = \omega_n^2 = 3.12$ . Así, Los parámetros de ajuste del controlador se muestran en la tabla 1. La Fig. 7 muestra la salida del proceso cuando no existe error en el tiempo muerto ( $t_0$  nominal) y cuando existe un error de -20% en el mismo, para las mismas entradas del ejemplo anterior.

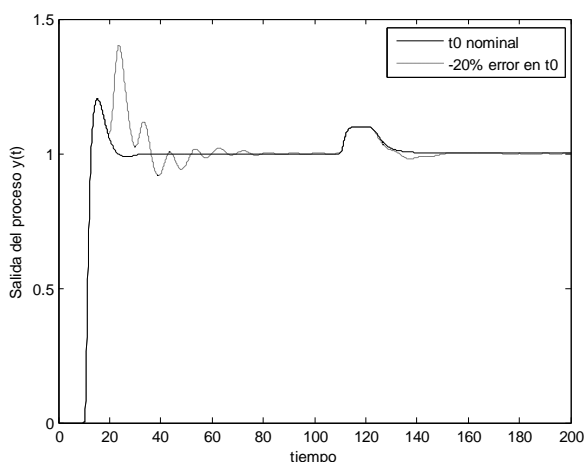


Figura 7. Respuestas del sistema para  $G_2(s)$ .

## CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó el desarrollo y las ecuaciones de sintonización de un controlador de modos deslizantes basado en un esquema de predictor de Smith, un modelo de segundo orden más tiempo muerto del proceso a controlar y una superficie deslizante de tipo PID. Se utilizó además un filtro de primer orden en el lazo de realimentación de la salida para proporcionar robustez al controlador ante errores de modelado. El controlador posee ecuaciones de sintonización simples derivadas de los parámetros del modelo SOMTM de proceso que se obtiene mediante un procedimiento basado en la respuesta en lazo abierto debida a un escalón unitario de entrada o curva de reacción. Los ejemplos presentados ilustraron el procedimiento de diseño y mostraron el excelente desempeño de controlador, inclusive ante errores de modelado del -20% del tiempo muerto.

## RECONOCIMIENTO

Oscar Camacho agradece al Proyecto Prometeo de la Secretaría de Educación Superior, Ciencia Tecnología e Innovación de la República del Ecuador, por su patrocinio para la realización de este trabajo.

## REFERENCIAS

- [1] V. Alfaro. Identificación de Procesos Sobreamortiguados Utilizando Técnicas de Lazo Abierto. *Revista Ingeniería* 11(1,2) pp. 11-25, Universidad de Costa Rica. 2001.
- [2] O. Camacho, C. Smith. Sliding mode control: an approach to regulate nonlinear chemical processes. *ISA Transactions*, 39, pp. 205-218, 2000.
- [3] O. Camacho, C. Smith, W. Moreno. Development of an Internal Model Sliding Mode Controller. *Industrial Engineering Chemical Resources*, 42, pp. 568-573. 2003.
- [4] O. Camacho, F. De la Cruz. Smith Predictor Based-Sliding Mode Controller For integrating Process with Elevated Deadtime. *ISA Transactions*. 43 (2) pp. 257-270. 2004.
- [5] O. Camacho, R. Rojas. A General Sliding Mode Controller for Nonlinear Chemical Processes. *Transactions of the ASME*, 122, pp. 650-655, 2000.
- [6] O. Camacho, R. Rojas. An approach of sliding mode control for dead time systems. *WSEAS Transactions on Circuits and Systems*. 4 pp. 789-793, 2004.
- [7] O. Camacho, R. Rojas, and W. García. Variable Structure Control Applied to Chemical Processes with Inverse Response. *ISA Transactions*, 38, pp. 55-72, 1999.
- [8] J. A. Herrera-Cuartas, J. Peláez-Restrepo, N. A. Correa-Rojas. Análisis del Predictor de Smith Modificado. *Tecno Lógicas*. Edición Especial, pp. 339-352. 2013
- [9] I. Kaya. Tuning Smith Predictor Using Simple Formulas Derived from Optimal Responses. *Ind. Eng. Chem. Res.* 40 pp. 2654-2659. 2001.
- [10] J. E. Normey-Rico, E. F. Camacho. Control of Dead-time Processes. Springer. 2007.

- [11] J. Martínez. Estudio Comparativo de Estrategias de Control Para Sistemas Con Retardo: Desempeño, Estabilidad y Robustez. Tesis de Maestría, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela. 2004.
- [12] B. B. Musmade, R. K. Munje, B. M. Patre. Design of Sliding Mode Controller to Chemical Processes for Improved Performance. *International Journal of Control and Automation*. 4(1) pp. 15-31, 2011.
- [13] J. J Slotine, W. Li, *Applied Nonlinear Control*. Prentice-Hall, New Jersey, 1991.
- [14] O. J. Smith. Closed control of loops with dead-time. *Chemical Engineering Progress*, 53 pp. 217-219, 1957.
- [15] D. M. Stark, en Mollenkamp, R.A. - *Introduction to Automatic Process Control*, Instrument Society of America, 1984.
- [16] K. K. Tan, T. H. Lee, and F. M. Leu, Predictive PI versus Smith control for dead-time compensation, *ISA Transactions*, 40, pp. 17-29. 2001.
- [17] V. I. Utkin. Variable structure systems with sliding modes. *IEEE Trans. Automat. Control.*, AC-22(2), pp. 212 -222 1977.
- [18] K. Watanabe, M. Ito. A process-model control for linear systems with delay. *IEEE Trans. on Automatic Control*, 26(6), pp. 1261-1269. 1981.

# Implementación de Tecnología Zigbee en una Red Modbus para Aplicaciones Inalámbricas en Automatización Industrial

Tarhan M.; De la Cruz F.; Díaz-Granados M.

*Universidad Nacional Experimental Politécnica "Antonio José de Sucre". Vicerrectorado Barquisimeto  
Departamento de Ingeniería Electrónica, Barquisimeto, Venezuela  
e-mail: maria.tarhan@gmail.com; fdlcruz@unexpo.edu.ve; mdiaz@unexpo.edu.ve*

**Resumen:** Zigbee es un estándar que define un conjunto de especificaciones para redes inalámbricas de sensores a corta distancia y baja velocidad de transmisión. La tecnología Zigbee tiene a las redes industriales como uno de sus principales objetivos, pero en muchos casos, se requiere la coexistencia con las redes industriales existentes. En este trabajo, se presenta el diseño y construcción de sistema de adquisición de datos basado en dicha tecnología. Una pasarela Modbus-Zigbee, basada en microcontrolador, se comunica en una red cableada Modbus con un Controlador lógico programable (PLC). El PLC realiza las solicitudes al microcontrolador mediante protocolo de comunicaciones Modbus RTU y el microcontrolador direcciona, mediante comandos AT, un módulo coordinador Zigbee que conforma, a su vez, una red inalámbrica con dos módulos remotos transmisores/receptores Zigbee conectados a sensores industriales, uno con salida analógica y otro de tipo digital. La pasarela recibe los datos de los módulos remotos y traduce la información al protocolo Modbus para luego ser enviada al PLC. De esta manera, no se requiere modificar los programas del PLC y se preservan los sensores existentes.

**Palabras claves:** Autómata programable, PLC, redes industriales, Modbus, redes inalámbricas, Zigbee.

**Abstract:** ZigBee is a standard that defines a set of specifications for wireless sensor networks, at short range and low transmission speed. ZigBee technology has industrial networks as one of its primary targets, but in many cases, coexistence with existing industrial networks is required. In this paper, the design and construction of data acquisition system based on this technology is presented. A Modbus-Zigbee based microcontroller gateway communicates on a Modbus wired network with a Programmable Logic Controller (PLC). The PLC makes requests to the microcontroller via Modbus RTU protocol and the microcontroller routes, through AT commands, a Zigbee coordinator module, which in turn creates a wireless network with two remote transmitters/receivers Zigbee modules connected to industrial analog and digital sensors. The gateway receives data from the remote modules and translates the information to the Modbus protocol before being sent to the PLC. Thus, it is not necessary to modify the PLC programs and existing sensors are preserved.

**Keywords:** Programmable Logic Controller, PLC, industrial networks, Modbus, wireless networks, Zigbee.

## 1. INTRODUCCIÓN

En las aplicaciones automatizadas, los autómatas o controladores lógicos programables (PLC) tienen cada vez un papel más importante gracias al desarrollo de nuevas tecnologías y a la necesidad de mayor seguridad y control en los procesos. Debido a la gran variedad de procesos a controlar, cada vez se requieren equipos que brinden un control y supervisión eficiente, pero que también sean capaces de adaptarse al proceso, es decir, que brinden flexibilidad al mismo como simplificación de tareas y optimización del proceso.

Actualmente la mayoría de los procesos de automatización en el entorno industrial [1], en aplicaciones domóticas, monitoreo ambiental [19] e inclusive en la agricultura [20], están implementando la tecnología inalámbrica, debido a la eficiencia en cuanto a la comunicación con equipos remotos,

a su confiabilidad y a la reducción de costos de cableado y conexión, logrando comunicarse a través de distintos protocolos entre equipos.

El uso de las redes inalámbricas en los procesos supervisados y controlados por PLC es cada vez más común. Entre los distintos protocolos inalámbricos se encuentran la tecnología Bluetooth y la tecnología Zigbee entre otras, donde la tecnología Zigbee cada vez es más utilizada en los procesos de automatización [1] esto ya que la tecnología Zigbee posee más bondades para este tipo de aplicaciones que la tecnología Bluetooth, principalmente debido a mayores velocidades de comunicación (250 kbits/s de la tecnología Zigbee versus 3 kbits/s de Bluetooth), mayor cantidad de nodos, hasta 65535 en comparación con los 8 nodos de Bluetooth, menor consumo eléctrico, mayor rango de alcance (hasta 100 metros), entre otros.

En este artículo se presenta la implementación de tecnología inalámbrica Zigbee para monitorizar las variables de dos sensores remotos, comunicándose con un módulo

Autor para correspondencia: fdlcruz@unexpo.edu.ve, +58-416-6746583. Campus UNEXPO. Av. Corpahuaico. Barquisimeto 3002. Venezuela.

inalámbrico principal, basado en microcontrolador, el cual a su vez se comunicará mediante el protocolo de comunicaciones Modbus con un PLC, tomando solicitudes para la supervisión y monitorización del proceso.

Este trabajo se organiza como sigue: La sección 2 introduce los conceptos básicos del protocolo Zigbee. La sección 3 presenta detalles del diseño y construcción del prototipo desarrollado. La sección 4 describe los resultados experimentales y aplicaciones y, finalmente, la sección 5 corresponde a las conclusiones.

## 2. PROTOCOLO ZIGBEE

En este trabajo se presenta una pasarela basada en microcontrolador que traduce la información entre los dos protocolos de comunicación presentes:

- Protocolo de comunicaciones Modbus RTU (Remote Terminal Unit).
- Protocolo de comunicaciones inalámbricas Zigbee.

Modbus es un protocolo de mensajería de la capa de aplicación, posicionado en el nivel 7 del modelo OSI, que proporciona comunicación maestro-esclavo entre dispositivos conectados a diferentes tipos de buses o redes. Modbus es el estándar de comunicación serial de facto de la industria desde 1979, y permite comunicarse a millones de dispositivos de automatización [11]. Modbus funciona siempre en modo maestro-esclavo (cliente-servidor), siendo el maestro quien controla en todo momento las comunicaciones con los esclavos, cuyas direcciones van desde 1 hasta 247 (dirección de 8 bits). Los esclavos se limitan a retornar los datos solicitados o a ejecutar la acción indicada por el maestro. Modbus especifica el procedimiento que el maestro y el esclavo utilizan para intercambiar datos, el formato de estos datos, y como se tratan los errores. No especifica estrictamente el tipo de red de comunicaciones a utilizar, por lo que se puede implementar sobre redes basadas en Ethernet, RS-485, RS-232, etc.

Las comunicaciones Modbus se pueden realizar en modo ASCII o en modo RTU. En modo ASCII los bytes se envían codificados en ASCII, es decir, que por cada byte a transmitir se envían dos caracteres ASCII (2 bytes) con su representación hexadecimal. Cuando los dispositivos son configurados para comunicarse en una red Modbus, usando el modo RTU, cada byte de 8 bits en un mensaje contiene dos dígitos hexadecimales de 4 bits, donde cada mensaje debe ser transmitido en un flujo continuo de datos. La estructura del entramado Modbus está dada por el campo de dirección (1 byte), seguido del campo función (1 byte), luego el campo de datos (N bytes según la función a realizar) y finalmente el fin de trama (2 bytes), dado por el campo de control de error, CRC (Cyclical Redundancy Checking) un método de comprobación de redundancia cíclica que controla el contenido del mensaje completo. Ver Fig 1.

DIRECCIÓN ESCLAVO (1 byte)	CÓDIGO FUNCIÓN (1 byte)	DATOS (N bytes)	CRC (2 bytes)
----------------------------------	-------------------------------	--------------------	------------------

**Figura 1.** Trama del mensaje Modbus RTU

Los códigos de las principales funciones que se realizan usando el protocolo Modbus se listan en la tabla 1.

**Tabla 1.** Principales funciones Modbus

Función	Descripción
01	Lectura de variable digital
02	Lectura de entrada digital
03	Lectura de registro interno
04	Lectura de registro de entrada
05	Escritura de variable digital
06	Escritura de registro interno
15	Escritura múltiple de variables digitales
16	Escritura múltiple de registros internos

Zigbee es un protocolo de comunicaciones inalámbricas (basado en el estándar IEEE 802.15.4) desarrollado por la Zigbee Alliance [21], para las aplicaciones que requieren comunicaciones seguras con baja tasa de envío de datos y maximización de la vida útil de sus baterías. Las redes con módulos Zigbee abarcan un gran abanico de aplicaciones en diversas áreas, como son: sistema inteligente de transporte, sistema de detección de minas, sistemas de monitorización de signos vitales en tiempo real, control de procesos en forma remota, como monitoreo de equipos petroleros, monitoreo de turbinas de viento, conectividad para las instalaciones de energía solar [6], entre otras.

Las comunicaciones Zigbee se realizan en la banda libre de 2.4 GHz, a través de una única frecuencia, es decir, de un canal. Normalmente puede escogerse un canal de entre 16 posibles. La velocidad de transmisión de datos de una red Zigbee es de hasta 256 kbps. [16]. Una red Zigbee la pueden formar hasta 65.535 nodos (se emplean 16 bits en el caso de dirección corta)

Para conformar la red de este trabajo, se emplearon los módulos Xbee de Digi International [4] que utilizan el protocolo Zigbee. Son transmisores/receptores por radiofrecuencia por lo que envían o reciben datos en cualquier dirección hacia o desde otro módulo respectivamente. Los módulos Xbee permiten enlaces seriales de señales TTL en distancias de 30 metros en interiores, 100 metros en exteriores con línea de vista y hasta 1.5 Km con los módulos Pro. Estos módulos cuentan con convertidores A/D internos, los cuales son de 10 bits y su tasa de muestreo van de 1 a 65535 ms. También poseen salidas PWM, que sirven para representar señales analógicas, entradas RTS y CTS para control de flujo, entradas digitales, "DIN" y "DOUT" (Data in y Data out, respectivamente) para comunicación serial, entrada para el voltaje de referencia del convertidor, entre otras características.

Existen trabajos que mencionan el empleo del protocolo Zigbee en aplicaciones de monitorización en tiempo real pero usando un microcontrolador para controlar el proceso [7][13]

o una computadora para monitorizar mediante Zigbee un proceso controlado en forma independiente [20] pero no hay disponible en la literatura la descripción detallada de un sistema inalámbrico basado en protocolo Zigbee para supervisar un proceso industrial controlado por PLC con comunicación Modbus.

### 3. DISEÑO DEL PROTOTIPO

Para la conversión de protocolos se diseñó un módulo basado en microcontrolador que es capaz de tomar la información de la trama de petición de Modbus, direccionarla y configurar mediante comandos AT el módulo Xbee coordinador para obtener la información desde los sensores conectados a la red Zigbee y ajustar la trama de datos que recibe el Xbee a la trama de respuesta que requiere Modbus. En la Fig. 2, se muestra el diagrama general del sistema.

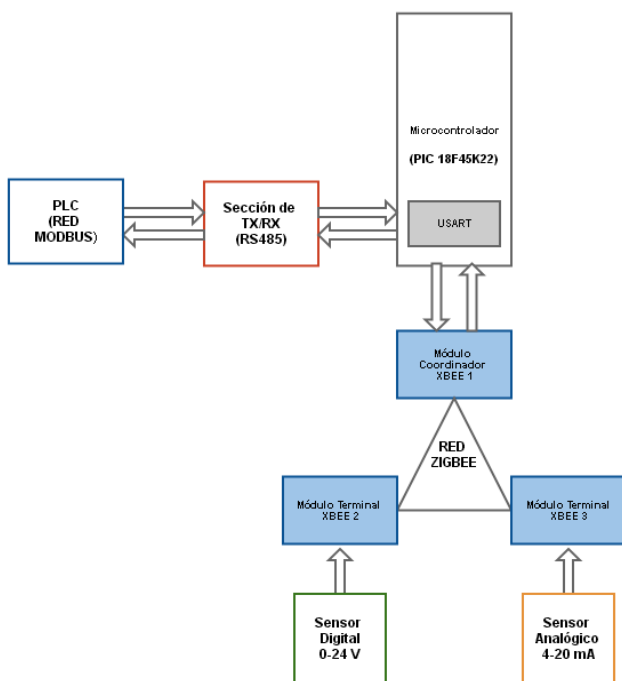


Figura 2. Diagrama general del sistema

#### 3.1. Sección de transmisión y recepción (Tx/Rx)

El módulo cuenta con una interfaz de comunicaciones RS-485, la cual está conformada por un MAX485 de Maxim Integrated [8] que permite la comunicación entre el estándar de Modbus RTU y la tecnología TTL del microcontrolador. Para el circuito de Tx/Rx, se basó en la configuración proporcionada por el fabricante en la hoja de datos, donde se indican los valores de los componentes (resistores) y la conexión necesaria para garantizar la correcta transmisión y recepción de datos. El módulo MAX485 se ajustó para una comunicación semiduplex donde realiza la transmisión o recepción de acuerdo a los parámetros requeridos, es decir, mediante un pin de habilitación conectado al microcontrolador se establece la transmisión o la recepción

de la información. En la Fig. 3 se puede observar el esquema de conexiones del módulo MAX485.

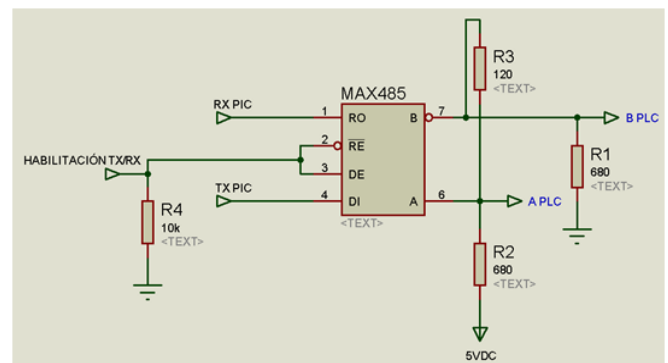


Figura 3. Diagrama de conexiones de la interfaz RS485.

#### 3.2. Pasarela Modbus-Zigbee

Para la conversión de protocolos se diseñó un módulo basado en microcontrolador que es capaz de tomar la información de la trama de petición de Modbus, direccionarla y configurar mediante comandos AT el módulo Xbee coordinador para obtener la información desde los sensores conectados a la red Zigbee y ajustar la trama de datos que recibe el Xbee a la trama de respuesta que requiere Modbus. Se empleó un microcontrolador 18F45K22 de Microchip Technology [9], el cual fue seleccionado debido a la cantidad de puertos seriales por hardware que posee. Así se garantiza la eficiencia del manejo de datos debido a las interrupciones asociadas a los mismos. La programación del microcontrolador contempla tres rutinas principales: rutina de inicio, recepción de datos Modbus y configuración del módulo Xbee.

##### 3.2.1. Rutina de inicio

Esta rutina se realiza cada vez que se energiza el dispositivo. En ésta se realizan la configuración de entradas y salidas del microcontrolador, la configuración de los puertos seriales para establecer la comunicación entre el microcontrolador y el PLC y la comunicación entre el microcontrolador y el módulo coordinador Xbee. También realiza las configuraciones iniciales de los módulos Xbee, la captura y procesamiento de la trama Zigbee así como los datos de los sensores, extraídos de la trama recibida por el módulo coordinador. El microcontrolador accede a la rutina de inicialización cada 30 segundos para actualizar la información proporcionada por los sensores.

##### 3.2.2. Recepción de datos Modbus

Una vez establecida la configuración inicial del programa y realizada la captura de datos de los sensores, se tiene la rutina de comunicación Modbus, la cual se encarga de esperar peticiones del PLC por el puerto serial, así como el análisis de la trama, su almacenamiento y procesamiento.

El control de trama se realiza mediante el cálculo del CRC (cálculo de redundancia cíclica) donde se compara el CRC de la trama recibida con el CRC calculado, si ambos son iguales no existe pérdida de datos por lo tanto se procede a realizar el procesamiento de la solicitud y enviar la trama de respuesta al

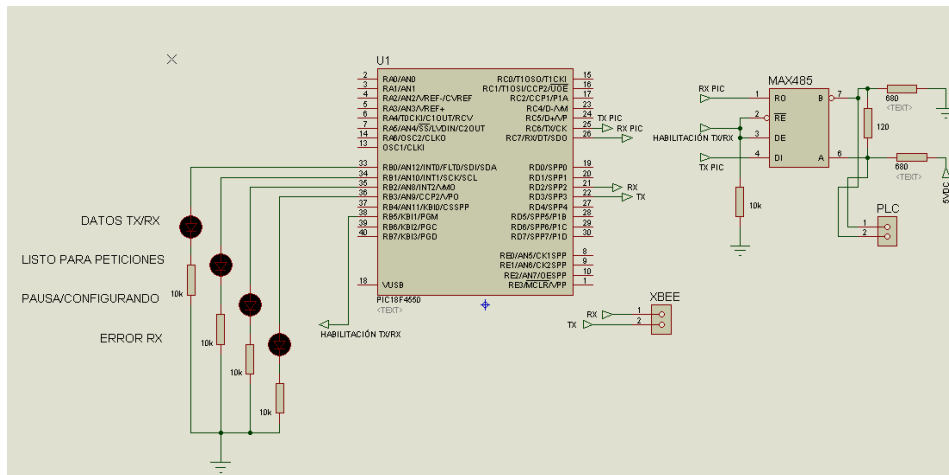


Figura 4. Esquema de conexiones de la pasarela Modbus-Zigbee.

Maestro (PLC); si no son iguales se procede a esperar una nueva petición.

### 3.2.3. Configuración del módulo Xbee

El módulo Xbee se configura mediante comandos AT, donde se indica la dirección del módulo Xbee terminal del cual tomará los datos del sensor. Cuando se reciben las tramas de datos, se procede a almacenarlas en un buffer para luego procesarlas y la identificación de la trama, se procede a calcular el CRC y finalmente guardar estos bytes en un vector para su futura transmisión.

### 3.3. Red Zigbee

La red Zigbee está conformada por un nodo coordinador, y dos nodos terminales. El nodo coordinador se conecta mediante los pines de transmisión y recepción al microcontrolador y los nodos terminales mediante acondicionadores a un sensor analógico y otro digital. Para la configuración de la red se trabajó con el programa XCTU de Digi [5], mediante el módulo USB Explorer. Este módulo se conecta a la computadora mediante un cable USB que permite la conexión de Xbee a la interfaz del programa XCTU para realizar configuraciones del módulo y para tener acceso a la información serial trabajada por el Xbee. Cada nodo terminal se configuró mediante el programa XCTU. Los nodos terminales enviarán la información del sensor asociado al nodo coordinador el cual solo será configurado mediante comandos AT por el microcontrolador dependiendo de la solicitud del usuario.

En la Fig. 4, se puede observar el esquema de conexiones del módulo principal, conformado por el microcontrolador 18F45K22, la interfaz de comunicaciones RS485 y el conjunto de LED que proporcionan información del funcionamiento del módulo durante las pruebas realizadas. De manera general, el funcionamiento está dado de la siguiente manera: Al inicializar el módulo, el LED “PAUSA/CONFIGURANDO” permanece activo, esto indica que el módulo está configurando y tomando la información de cada módulo Xbee. Este LED se activará siempre que el

almacenar los datos obtenidos del sensor en un registro. Para la comprobación de la trama se realiza de manera similar al cálculo del CRC, en este caso, calculando el *checksum* de trama y comparándolo con el valor de la trama recibida. Luego de esto, se procede a conformar el vector de la trama de respuesta, donde se indicará la dirección, función, bytes de datos y control de errores para finalmente ser enviados. En la trama de respuesta en los bytes de datos almacenados en el registro se tiene la información de los datos tomados del sensor y en conjunto con módulo entre en pausa para actualizar la información proporcionada por los módulos Xbee, aproximadamente cada 30 segundos. Luego de haber realizado la captura de la información de los módulos, el LED “LISTO PARA PETICIONES” se activará e indicará que el módulo está listo para recibir solicitudes. Luego de esto, cada solicitud Modbus recibida por el módulo será indicada mediante el led Datos Tx/Rx. El LED “ERROR RX” se activará cuando exista un error en la recepción de tramas Modbus.

### 3.4. Acondicionamiento de señales

Se empleó el sensor analógico de temperatura y humedad modelo THD-DD1C marca Autonics [2], el cual posee una salida normalizada de 4-20 mA para un rango de temperatura de  $-19.9^{\circ}\text{C}$  a  $60^{\circ}\text{C}$ . Para adecuar esta salida a los rangos de voltaje trabajado por el módulo Xbee se obtuvo, mediante una resistencia de  $250\ \Omega$ , una salida de voltaje en el rango de 1-5 Vdc. Para conectar esta señal de voltaje al pin D1 del módulo Xbee de tal manera que el módulo pueda convertir señales analógicas, se debe tener conectado el voltaje de referencia del modulo a un voltaje apropiado ( $0 < V_{ref} < V_{cc} = 3.3\ \text{Vdc}$ ). Por esto, se realizó una atenuación de voltaje, donde la salida de 1 a 5 Vdc pasará a ser de 0 a 3.3 Vdc. Para atenuar los niveles de voltaje, se trabajó con amplificadores operaciones, para este caso el amplificador LM324, el cual posee cuatro amplificadores en una pastilla de 14 pines. El circuito atenuador acoplado a las resistencias de conversión de corriente a voltaje se muestra en la Fig. 5. Se utilizó el sensor digital de proximidad capacitivo modelo CR30-15DN de Autonics [2], el cual maneja una salida (ON-OFF) normalizada de 0-24 Vdc. Para adecuar esta salida a los



rangos de voltaje trabajado por el módulo Xbee se obtuvo mediante un divisor de tensión una salida de 0-5 Vdc.

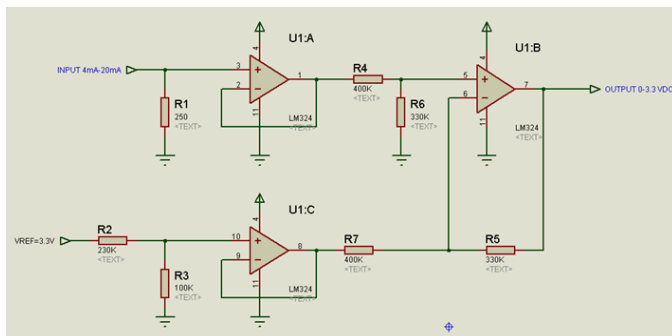


Figura 5. Circuito acondicionador de corriente de la salida del sensor de temperatura.

#### 4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Para la prueba del sistema, se realizó el monitoreo de dos variables, temperatura y nivel del tanque de desechos de una maqueta de un invernadero industrial existente en el Laboratorio de Automatización Industrial del Departamento de Ingeniería Electrónica de la Universidad Nacional Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre”. Vicerrectorado Barquisimeto en Venezuela.

La maqueta representa el proceso de preparación de la mezcla para el riego, mediante dos ingredientes, A y B, así como el control de temperatura y humedad del invernadero. El proceso cuenta con un sensor de temperatura y humedad Autonics THD-DD1C, una lámpara incandescente de 100 W, un electro ventilador de 110 V y un nebulizador o fogger para garantizar las condiciones de clima deseadas. También se tiene un sensor de proximidad capacitivo, el cual detecta si el tanque de agua posee el nivel mínimo requerido para encender la bomba de control de humedad por nebulización. Una representación simplificada de la maqueta se muestra en la Fig.6.

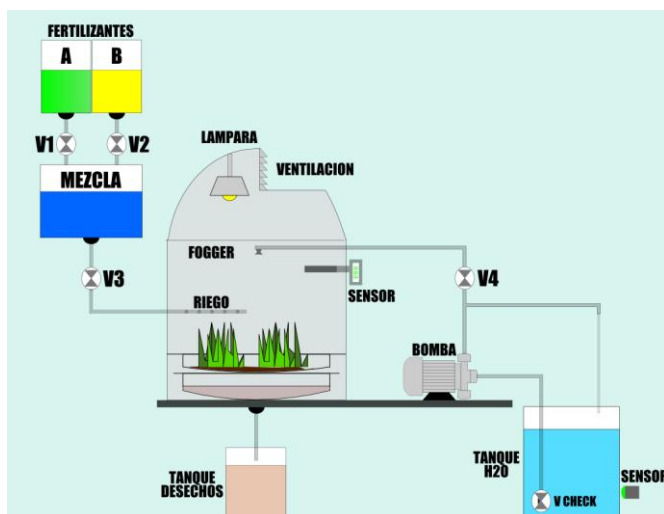


Figura 6. Esquema de la maqueta de invernadero.

El PLC se encarga del control de toda la maqueta que incluye preparación de mezcla, riego y control de temperatura y humedad. Para la prueba del sistema de adquisición de datos desarrollado, solo se tomó en cuenta la señal de salida de temperatura del analógico y el estado del sensor capacitivo.

#### 4.1. Configuración y prueba de los módulos Xbee

La red de módulos Xbee está conformada por un módulo coordinador y dos módulos terminales. El módulo coordinador es configurado mediante comandos AT [3] por el microcontrolador para así tomar la información de los módulos terminales. Cada módulo terminal tiene una dirección de destino fija, a la cual estarán enviando el estado de sus entradas mediante una trama API constantemente. El módulo coordinador cambiará su dirección para recibir de cualquiera de los dos módulos. Cada módulo terminal se configuró mediante el software XCTU donde se le asignó a cada uno su dirección de origen, dirección de destino, cantidad de muestras a enviar, tasa de muestreo y la respectiva configuración de las velocidades de transmisión. Para el módulo coordinador se realizó la configuración de las velocidades de transmisión ya que el direccionamiento final lo realizará el microcontrolador. Luego de configurar los tres módulos mediante el software XCTU, se procedió a probar el envío de trama y a verificar el estado de sus entradas, esto también a través del software XCTU. La comunicación inalámbrica Zigbee es transparente para el usuario, por lo que no es conveniente para el usuario conocer la información de datos consecutivos en un sistema de tiempo real. Luego de verificar el correcto funcionamiento de los módulos remotos, se procedió a la implementación del código de programación basado en microcontrolador para el direccionamiento del módulo coordinador y la captura por puerto serial de las tramas enviadas por los módulos terminales. Mediante el almacenamiento de los vectores de datos en la memoria EEPROM del microcontrolador se pudo visualizar el correcto tratamiento de las tramas recibidas. Para ello, se empleó el circuito depurador PICKit3 [10] de Microchips que permite programación y depuración de programas del microcontrolador 18F45K22. En la Fig. 7, se muestran las tramas (mostradas en código hexadecimal) procesadas por el microcontrolador al configurar el módulo principal y recibir las tramas de los módulos.

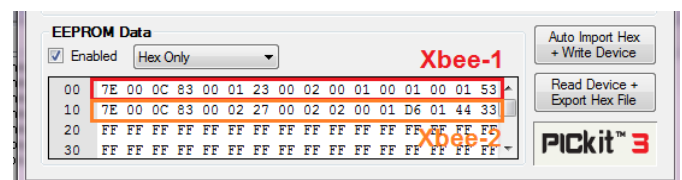


Figura 7. Software PICKit3, lectura de EEPROM del microcontrolador

El primer byte 0x7E ( $7E_{16}$ ) indica el comienzo del *frame* o trama. Los dos bytes siguientes 0x000C indican el largo de la trama de datos (*frame data*). El cuarto byte 0x83 corresponde a direccionamiento de 16 bits. Los siguientes bytes incluyen dirección de origen, potencia de la señal, máscara de canal,

etc. Los bytes 14° y 15° contienen los valores de los sensores (0001=ON para el digital y 0x0144 para el analógico). El último byte corresponde al *checksum*.

#### 4.2. Configuración y pruebas Modbus RTU

Para realizar las pruebas con la red Modbus, se realizó el programa que se encarga de efectuar las solicitudes Modbus RTU desde el PLC al microcontrolador. Se implementó la rutina de recepción, análisis y procesamiento de trama. Se configuraron velocidad de transmisión de 19200 kbps, 1 bit de parada y paridad par tanto en el PLC como en el microcontrolador. Una vez hecho esto, el microcontrolador recibe la petición Modbus de parte del PLC y solicita la información al Xbee coordinador. Este tiene los datos que recibe constantemente de los módulos remotos y los reenvía al microcontrolador. De las tramas recibidas (figura 7) el microcontrolador extrae la información correspondiente a los datos o valores de los sensores, es decir los bytes 14° y 15°, conforma la trama Modbus (figura 1), calcula el CRC y envía la respuesta al PLC. Finalmente, se verificó la correcta lectura de los datos de los sensores, usando el protocolo Modbus RTU, desde el PLC Twido monitoreando las variables de la maqueta del invernadero a través de la terminal gráfica Magelis. Se verificó la correcta recepción del valor de temperatura comparando el valor mostrado en el visualizador (display) incorporado en el sensor THD-DD1C y el valor mostrado en la pantalla Magelis. Igualmente, el estado del sensor capacitivo fue detectado por el PLC y visualizado en la pantalla al variar manualmente el nivel del depósito de agua.

### 5. CONCLUSIONES

Se logró una comunicación inalámbrica entre el PLC y los sensores remotos, mediante la utilización de los módulos Xbee y la creación de una Red Zigbee permitiendo así ampliar el campo de monitoreo y supervisión de variables remotas dentro de una aplicación de tipo industrial. Se realizó la transmisión/recepción de información entre el PLC y la pasarela a través de una red Modbus cableada y posteriormente con dos sensores remotos a través de una red inalámbrica Zigbee. La lectura de los datos de los sensores fue transparente al PLC, es decir, no fue necesario modificar el programa del PLC para solicitar los datos de los esclavos a través de la red Modbus, y ni sustituir los sensores empleados.

### REFERENCIAS

- [1] Altamiranda, N. Diseño e implementación de un sistema de supervisión inalámbrica para motores AC. Trabajo especial de grado. Universidad Politécnica "Antonio José de Sucre" UNEXPO, Venezuela. 2012.
- [2] Autonics Corporation. Sensors and Controllers. México. 2013 [Online] Disponible en <http://autonics.com.mx/index.php>.
- [3] Digi. Xbee Command Reference Tables. 2012. [Online] Disponible en: [http://examples.digi.com/wp-content/uploads/2012/07/XBee\\_ZB\\_ZigBee\\_AT\\_Commands.pdf](http://examples.digi.com/wp-content/uploads/2012/07/XBee_ZB_ZigBee_AT_Commands.pdf)
- [4] Digi International, Inc. Xbee/Xbee-Pro RF Modules Data Sheet. 2009. [Online] Disponible en: [ftp1.digi.com/support/documentation/90000982\\_P.pdf](ftp1.digi.com/support/documentation/90000982_P.pdf)
- [5] Digi International, Inc. XCTU. 2014. [Online] Disponible en: [www.digi.com/products/wireless-wired-embedded-solutions/zigbee-rf-modules/xctu](http://www.digi.com/products/wireless-wired-embedded-solutions/zigbee-rf-modules/xctu)
- [6] Digi International, Inc. Learning center: Industry Standars, Digi Thecnologies and Applications. Disponible en: <http://www.digi.com/learningcenter/>
- [7] Durán, C., Iturriago, A. Automatización de un sistema de suministro de agua potable A través de la tecnología zigbee Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada Volumen 1 N° 17. 2011 [Online] Disponible en [http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portalIG/home\\_17/recursos/01\\_general/14062013/ali\\_iturriago.pdf](http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portalIG/home_17/recursos/01_general/14062013/ali_iturriago.pdf)
- [8] Maxin Integrated. Max485. 2014. [online] Disponible en: <http://www.maximintegrated.com/en/products/interface/transceivers/MAX485.html>
- [9] Microchip Technology. PIC18(L)F2X/4XK22 Data Sheet. 2012 [Online] Disponible en: [ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/41412F.pdf](http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/41412F.pdf)
- [10] Microchip Technology. PICkit 3 In-Circuit Debugger. [online] Disponible en: [www.microchip.com/PIC164130](http://www.microchip.com/PIC164130)
- [11] Modbus Over Serial Line: Specification and Implementation Guide V1.02. 2006 [Online] Disponible en: [www.modbus.org/docs/Modbus\\_over\\_serial\\_line\\_V1\\_02.pdf](http://www.modbus.org/docs/Modbus_over_serial_line_V1_02.pdf).
- [12] Oyarce, A. Guía de Usuario: Xbee Series 1. 2008 [Online] Disponible en: [www.olimex.cl/pdf/Wireless/ZigBee/XBee-Guia\\_Usuario.pdf](http://www.olimex.cl/pdf/Wireless/ZigBee/XBee-Guia_Usuario.pdf).
- [13] Pullés-Boudet, J.A., Pino-Escalona, A. Bonzon-Henríquez, J.E., Escalona-Costa, O. Desarrollo de aplicaciones de monitorización en tiempo real con el empleo del protocolo inalámbrico Zigbee para sistemas de calentamiento de agua con energía solar. Ciencia en su PC, N° 3, Cuba, 2010, pp. 41-57
- [14] Schneider Electric. Controladores Programables Twido. Guía de referencia de Hardware. 2009.
- [15] Schneider Electric. TwidoSuite V2.3 Guía de Programación. (2011).
- [16] Schneider Electric. Magelis XBT GT, XBT GK, XBT GH Guía de hardware. 2013.
- [17] Schneider Electric. Magelis XBTGT, XBTGK HMI Controller. Guía de programación. 2013
- [18] Stevanovic, D. Zigbee/IEEE 802.15.4 Standard. 2007. [Online] Disponible en: [www.cse.yorku.ca/~dusan/Zigbee-Standard-Talk.pdf](http://www.cse.yorku.ca/~dusan/Zigbee-Standard-Talk.pdf)
- [19] Yu C., Liu Y., Wang C. Research on Zigbee Wireless Sensors Network Based on Modbus Protocol. Wireless Sensor Network, Vol. 1 No. 1, 2009, pp. 43-47. [Online] Disponible en: [www.scirp.org/journal/wsn/](http://www.scirp.org/journal/wsn/).
- [20] Zhang Q., Yang X., Zhou Y., Wang L., Guo X. A wireless solution for greenhouse monitoring and control system based on Zigbee technology. Journal of Zhejiang University Science A. Vol 8, No. 10,

pp 1584-1587. 2007. [Online] Disponible en:  
[www.zju.edu.cn/jzus/openxt.php?doi=10.1631/jzus.2007.A1584](http://www.zju.edu.cn/jzus/openxt.php?doi=10.1631/jzus.2007.A1584)

[21] Zigbee Alliance. Zigbee Specifications, v1.0r13. 2006. [Online]  
Disponible en: [www.zigbee.org](http://www.zigbee.org).

# Modelo Dinámico de una Planta de Generación con Chimenea Solar

Imbaquingo C.\*; Domínguez X.\*\*

\*Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Quito, Ecuador

e-mail: carlos.imbaquingo@epn.edu.ec

\*\*Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Quito, Ecuador

e-mail: xavier.dominguez@epn.edu.ec

---

**Resumen:** Una Planta de Generación de Chimenea Solar (SCPP) produce energía eléctrica gracias a que un conjunto de turbinas aprovechan la energía cinética del viento, producto de la diferencia de presiones entre la base y la cima de una chimenea que se encuentra rodeada y unida herméticamente a un colector que absorbe la irradiación solar, provocando que el aire en su interior que circula desde el perímetro abierto del colector hacia la cima de la chimenea se caliente, incrementando de esta manera el efecto de flotabilidad del aire.

En este documento se presenta una propuesta de diseño de una SCPP en donde se estudia su desempeño de acuerdo a las condiciones ambientales, los materiales, el tamaño y dimensiones de la planta y el espacio que ocupan las turbinas, representado como la relación entre las áreas transversales de la chimenea y el conjunto de secciones de transición colector-chimenea. Basado en esta idea se analiza el comportamiento de la planta de dimensiones conocidas en estado estable para deducir los puntos de máxima potencia, posteriormente se estudia la respuesta del sistema en estado transitorio con el fin de obtener un modelo dinámico de la SCPP. Finalmente se propone un método de control para mantener a la planta en el punto de máxima potencia bajo diferentes niveles de irradiación.

**Palabras claves:** Chimenea Solar, Energía Solar Térmica, Energía Renovable.

**Abstract:** A Solar Chimney Power Plant (SCPP) produces energy through a set of wind turbines. The wind is created due to drop pressure between the base and the top of the Chimney that is surrounded and sealed hermetically by a solar irradiation collector. The wind, which moves from the opened collector border to the top of the chimney, is heated. Thus, the air buoyancy effect is increased. It is herein detailed a SCPP design which analyzes its performance, considering environmental conditions, materials, power plant size and cross sectional area of the turbines. A relationship is established between the cross sectional area of the set of turbines and the chimney cross sectional area. Having defined this idea, it is analyzed the SCPP behavior in steady state to derive the peak power points. Next, in order to establish a SCPP model dynamic, it is evaluated the transient response of the system. Finally, a control system is proposed to achieve working on the peak power points.

**Keywords:** Solar Chimney Power Plant, Solar thermal Energy, Renewable Energy.

---

## 1. INTRODUCCIÓN

Una Planta de Generación de Chimenea Solar (SCPP por sus siglas en inglés) combina tres conocidas y antiguas tecnologías: el efecto invernadero, el efecto succión de una chimenea y molinos de viento. En consecuencia, una SCPP está conformada por un colector de cubierta de vidrio, una chimenea y turbinas de viento, como se aprecia en la Figura 1.

---

Artículo recibido el 15 de Diciembre, 2014; revisado XX julio de 2014. (Escriba la fecha en que presentó su documento para su revisión).

La irradiación solar es la responsable del incremento de temperatura del aire bajo la cubierta del colector, el cual se encuentra abierto en el perímetro para permitir el flujo de aire del ambiente hacia la planta. En el medio del colector se encuentra una chimenea vertical con grandes entradas de aire en la base cuya unión con el colector es hermética.

El aire caliente se eleva debido a que es más ligero que el frío, y conjuntamente por la diferencia de presiones entre la base y la cima de la chimenea se produce el efecto succión, produciendo así la salida de aire caliente

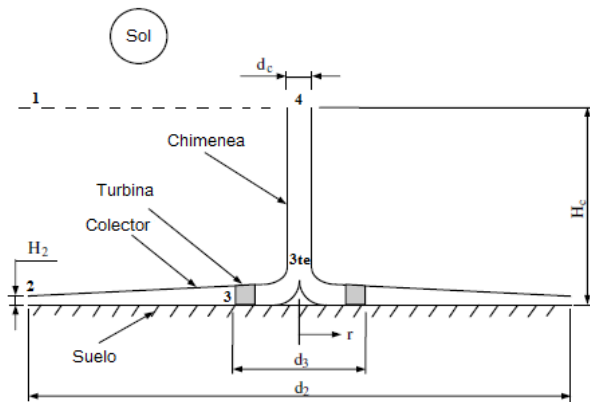


Figura 1. Esquema de una SCPP [1]

por la cima de la chimenea e ingreso de aire frío por el perímetro del colector. Es decir que la irradiancia solar provoca al final una corriente de aire ascendente en la chimenea y de forma radial en el colector. La energía que contiene este flujo de aire es aprovechada por turbinas de viento colocadas en la base que generan energía mecánica rotativa y posteriormente energía eléctrica.

La SCPP tiene notables ventajas con respecto a las otras tecnologías de producción de energía de acuerdo a Bernardes [2], las cuales se citan a continuación:

- El colector utiliza irradiancia directa y difusa.
- El suelo proporciona almacenamiento térmico natural.
- La poca cantidad de equipos mecánicos asegura su fiabilidad.
- No se utiliza un sistema de enfriamiento de agua.
- El área que cubre el colector puede ser utilizada para la agricultura.
- Para la construcción se utiliza materiales simples y tecnologías conocidas.
- Los países no miembros de la OECD pueden implementar esta tecnología sin esfuerzos tecnológicos costosos.

### 1.1 Colector

El efecto invernadero se produce debajo de la cubierta de vidrio o plástico que conforma el colector, cuya altura se incrementa de forma radial desde el perímetro hasta la base de la chimenea de modo que el aire se desvía hacia el movimiento vertical con mínimas pérdidas de fricción. La cubierta permite el paso de las componentes de irradiancia de corta longitud de onda, y retiene las

componentes de mayor longitud de onda, provocando que el suelo bajo el colector se caliente y transfiera su energía al flujo de aire radialmente por encima de él desde el exterior hacia la chimenea [3].

### 1.2 Chimenea

La chimenea propiamente dicha es la máquina térmica. Se trata de un cilindro con bajas pérdidas por fricción debido a su óptima relación superficie-volumen.

El empuje ascendente del aire caliente del colector es aproximadamente proporcional al aumento de la temperatura del aire  $\Delta T$  en el colector y al volumen de la chimenea. En SCPP de gran escala se consiguen valores de  $\Delta T = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ , lo cual produce velocidades ascendentes de  $15\text{ m/s}$ .

La eficiencia de la chimenea, es decir la conversión de la energía térmica en cinética, es prácticamente independiente del aumento de la temperatura del aire  $\Delta T = T_3 - T_2$ ; es esencialmente determinado por la altura de la chimenea  $H_c$  y la temperatura del ambiente  $T_2$  (Figura 1) a nivel del suelo, mientras menor es la temperatura  $T_2$  mejor eficiencia; es por eso que la SCPP aprovecha el bajo aumento de la temperatura durante la noche. Sin embargo, comparando las eficiencias del colector y las turbinas, la eficiencia de la chimenea es relativamente baja. Para mejorar el desempeño de la SCPP la altura de la chimenea debe ser considerable [3].

### 1.3 Turbinas

Las turbinas de una SCPP se encuentran canalizadas, y de forma análoga a una planta hidroeléctrica se convierte la presión del aire en energía rotacional. La potencia de salida lograda es proporcional al producto entre el caudal y la caída de presión en la turbina.

Se realiza control por paso de pala durante la operación para regular la potencia de salida de acuerdo al flujo y velocidad variable del aire. Si la superficie plana de las palas es perpendicular al flujo de aire, la turbina no gira, en su defecto si las palas son paralelas al flujo de aire y permite al aire fluir a través sin problemas, no existe caída de presión en la turbina por lo tanto tampoco existe movimiento de las palas [3].

### 1.4 Análisis del Ciclo Termodinámico

Para el siguiente análisis se considera el ciclo ideal desarrollado en [4], en donde se considera que todos los componentes y procesos no presentan pérdidas. En la Figura 2 se presenta el ciclo ideal de acuerdo a las referencias de la Figura 1.

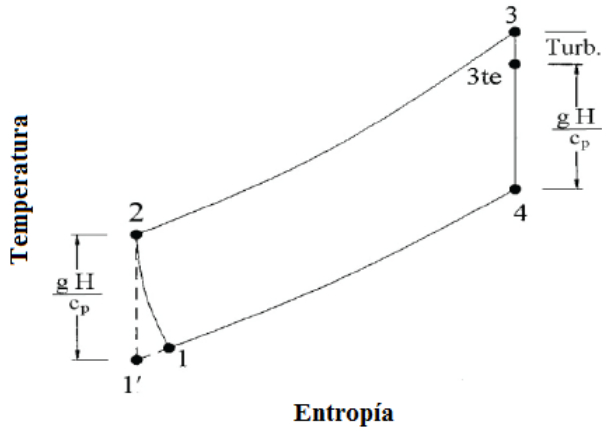


Figura 2. Ciclo Termodinámico de la SCPP [4]

La eficiencia de la planta se define por medio de la relación entre la potencia de salida y la energía solar disponible

$$\eta = \frac{P_{out}}{\dot{Q}}, \quad (1)$$

en donde la potencia solar disponible es

$$\dot{Q} = \dot{m}c_p(T_3 - T_2) = \dot{m}c_p\Delta T_{23}. \quad (2)$$

Parte de la energía en el proceso de expansión es utilizada para que el aire fluya ascendentemente en la chimenea (3te-4):

$$P_{3-4} = \dot{m}c_p(T_3 - T_4), \quad (3)$$

$$P_{3te-4} = \dot{m}c_p(T_{3te} - T_4) = \dot{m}\Delta h = \dot{m}gH_c, \quad (4)$$

considerando un gradiente adiabático

$$-\frac{dT}{dz} = \frac{g}{c_p}, \quad (5)$$

la variación de la entalpía en el proceso 3te-4 es el mismo que en el proceso 1'-2

$$\Delta h = gH_c = c_p(T_2 - T_1'), \quad (6)$$

de lo cual se puede obtener la potencia de salida

$$P_{out} = \dot{m}c_p(T_3 - T_4) - \dot{m}c_p(T_2 - T_1'). \quad (7)$$

Al definir una constante  $c = T_2/T_1' = T_3/T_4$ , y al sustituir las ecuaciones 2, 6, 7 en 1 se obtiene la eficiencia ideal de la planta.

$$\eta_c = 1 - \frac{1}{c} = \frac{gH_c}{c_p T_2}. \quad (8)$$

### 1.5 Principio Físico de la SCPP

Con el objetivo de comprender las interrelaciones de la planta, se presenta a continuación las dependencias fundamentales y la influencia de los parámetros esenciales para calcular la potencia generada de acuerdo a Schlaich [3].

El rendimiento general de la planta se define como el producto de los rendimientos individuales de los componentes de la SCPP

$$\eta = \eta_{coll} \cdot \eta_c \cdot \eta_{wt}, \quad (9)$$

donde  $\eta_{coll}$  es el rendimiento del colector, es decir la efectividad con la cual la irradiancia solar es convertida en energía térmica.  $\eta_c$  es el rendimiento de la chimenea y describe la efectividad con la cual la cantidad de energía térmica entregada por el colector es convertida en energía cinética.  $\eta_{wt}$  representa el rendimiento de las turbinas de viento.

El rendimiento del colector puede ser definido como la relación entre el flujo de energía térmica de salida del colector como aire caliente  $\dot{Q}$  y la irradiancia solar  $G$  que incide sobre la superficie del colector  $A_{coll}$ ,

$$\eta_{coll} = \frac{\dot{Q}}{A_{coll} \cdot G}, \quad (10)$$

donde el flujo de energía térmica en estado estable puede ser expresado como el producto del flujo de masa  $\dot{m}$ , el calor específico  $c_p$  y la diferencia de temperatura entre la entrada y salida del colector

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T, \quad (11)$$

donde

$$\dot{m} = \rho_{coll} \cdot v_c \cdot A_c, \quad (12)$$

$\rho_{coll}$ : densidad del aire a temperatura  $T_2 + \Delta T$  en la salida del colector o entrada de la chimenea,

$v_{coll} = v_c$ : velocidad del aire a la salida del colector o entrada de la chimenea,

$A_c$ : sección transversal de la chimenea,

de lo cual se deduce el rendimiento del colector

$$\eta_{coll} = \frac{\rho_{coll} \cdot v_c \cdot A_c \cdot c_p \cdot \Delta T}{A_{coll} \cdot G}. \quad (13)$$

Además, de acuerdo al balance térmico en el colector

$$\dot{Q} = \alpha \cdot A_{coll} \cdot G - \beta \cdot \Delta T \cdot A_{coll} \quad (14)$$

$\alpha$ : representa el coeficiente de absorción efectiva del colector.  $\beta$  es un valor de corrección de pérdidas, teniendo en cuenta las emisiones y las pérdidas por convección.

Por lo tanto el rendimiento del colector puede también ser expresado como

$$\eta_{coll} = \alpha - \frac{\beta - \Delta T}{G}. \quad (15)$$

Finalmente se deduce una expresión de la velocidad de salida del colector  $v_{coll}$  en función de la variación de temperatura  $\Delta T$

$$v_{coll} = \frac{\alpha \cdot A_{coll} \cdot G - \beta \cdot \Delta T \cdot A_{coll}}{\rho_{coll} \cdot A_c \cdot c_p \cdot \Delta T}, \quad (16)$$

esta ecuación de balance es independiente de la altura del colector debido a que se desprecian tanto las pérdidas por fricción y el almacenamiento de energía térmica en el suelo.

La chimenea convierte el flujo de energía térmica producida en el colector en energía cinética y potencial (caída de presión en la turbina). La ligera columna de aire de la chimenea se encuentra conectada con la atmósfera interna del colector y la cima de la chimenea, de tal manera que se produce una succión debido a la diferencia de presiones entre la base y la cima de la chimenea

$$\Delta p_{tot} = g \int_0^{H_c} (\rho_e - \rho_c) dH, \quad (17)$$

donde

$g$ : aceleración de la gravedad,

$H_c$ : altura de la chimenea,

$\rho_e$ : densidad del aire del ambiente,

$\rho_c$ : densidad del aire en la chimenea,

$\Delta p_{tot}$  aumenta con la altura de la chimenea y se puede dividir en una componente estática y dinámica, despreciando las pérdidas por fricción

$$\Delta p_{tot} = \Delta p_s + \Delta p_d. \quad (18)$$

A partir de lo anterior, la potencia debido al flujo resultante en la SCPP se define como

$$P_{tot} = \Delta p_{tot} \cdot v_c \cdot A_c, \quad (19)$$

y el rendimiento de la chimenea

$$\eta_c = \frac{P_{tot}}{\dot{Q}}, \quad (20)$$

finalmente se deduce

$$\Delta p_{tot} = \rho_{coll} \cdot g \cdot H_c \cdot \frac{\Delta T}{T_2}, \quad (21)$$

de acuerdo a la ecuación 21 se puede mencionar que la SCPP es análoga a una hidroeléctrica, en donde el gradiente de presión está dado por

$$\Delta p = \rho_{H_2O} \cdot g \cdot H, \quad (22)$$

por tal motivo la SCPP es llamada la Hidroeléctrica del Desierto.

Los aerogeneradores colocados en la base de la chimenea convierten el flujo de aire en energía rotacional. La caída de presión  $\Delta p_s$  en la turbina puede ser expresada de acuerdo a la ecuación de Bernoulli como

$$\Delta p_s = \Delta p_{tot} - \frac{1}{2} \rho_c \cdot v_c^2, \quad (23)$$

que también puede ser interpretada a partir de la ecuación 18. En consecuencia, la potencia útil  $P_{wt}$  en la turbina es

$$P_{wt} = v_c \cdot A_c \cdot \Delta p_s, \quad (24)$$

de forma análoga con la potencia eléctrica  $P_e = E \cdot I$ , el caudal  $\dot{V} = v_c \cdot A_c$  corresponde a la intensidad de corriente  $I$  y el gradiente de presión  $\Delta p_s$  a la diferencia de potencial  $E$ .

## 2. MODELO FÍSICO

### 2.1 Diseño en base a $R_d$

En una SCPP existen dos tipos de disposición de las turbinas de acuerdo a la ubicación de su eje con respecto al suelo. El primero consiste en un arreglo de turbinas alrededor de la parte externa de la base de la chimenea con eje paralelo al plano horizontal, es decir el suelo. La segunda disposición hace referencia a una o conjunto de turbinas en la parte interna de la base de la chimenea con eje perpendicular al suelo, como se muestra en la Figura 3.

Para objeto del estudio presentado en este documento se considera lo expuesto por Fluri [6], quien menciona que

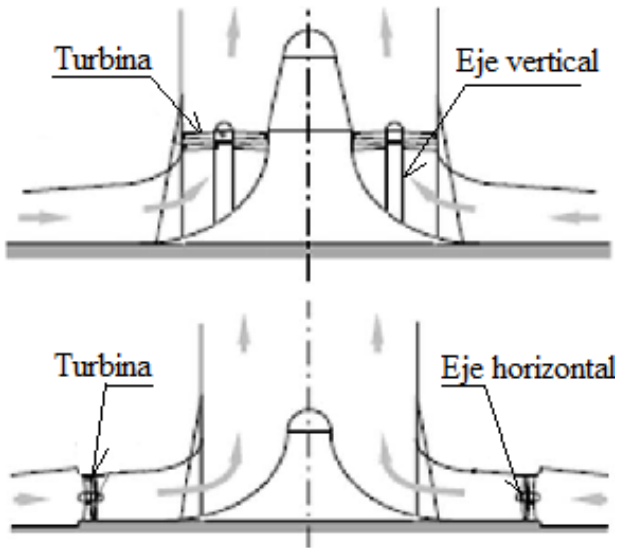


Figura 3. Ubicación de las Turbinas en una SCPP [5]

la relación entre la suma de áreas transversales donde se ubican las turbinas y el área transversal de la chimenea, determina la cantidad de flujo de aire en la SCPP

$$R_d = \frac{\text{Área transversal total del conjunto de turbinas}}{\text{Área transversal de la Chimenea}}, \quad (25)$$

en consecuencia, esta relación tiene mayor margen de variación al utilizar la configuración de turbinas con eje horizontal.

Para un nivel dado de irradiancia, se asume que el flujo másico no depende de las condiciones ambientales y es constante, a menos que se produzca una restricción al paso del aire. Esta restricción la generan las turbinas al ocupar un espacio en la base de la chimenea. Por el hecho de realizar un control de paso de pala, las turbinas



Figura 4. SCPP de estudio.

actúan como un mecanismo de sección variable, similar al cierre o apertura de una válvula que en este caso permite o no el paso del flujo de aire.

Al disminuir la sección variable el tiempo de residencia del aire en el colector se prolonga lo que aumenta la elevación de la temperatura del aire mientras fluye a través del colector; en consecuencia incrementa el efecto de flotabilidad y el almacenamiento térmico en el suelo, mejorando el desempeño de la planta durante la noche, no obstante se producen mayores pérdidas por convección y emisiones infrarrojas en el colector.

Para simular el efecto del control de paso de pala de las turbinas, se plantea utilizar las mismas condiciones ambientales en diferentes modelos cuya única diferencia es la sección transversal donde se ubican las turbinas; de esta manera se consigue diferentes cantidades de flujo másico al permitir o no el paso del aire.

Tabla 1. Dimensiones de la SCPP de análisis

Radio del colector	180 m
Altura externa del colector	1 m
Altura interna del colector	2.5 m
Diámetro de la Chimenea	9.6 m
Altura de la Chimenea	100 m

En este estudio se utiliza una planta con dimensiones similares a la construida en Manzanares, España, entre 1982 y 1983, con la modificación de disminuir la altura de la chimenea y compensando este cambio mediante la ampliación del área del colector. En la Tabla 1 se detallan las dimensiones tomadas para el diseño de la SCPP en Inventor, como se muestra en la Figura 4.

Tabla 2. Relación de Áreas  $R_d$

Radio Chimenea [m]	Radio Turbina [ $m^2$ ]	Área Chimenea [ $m^2$ ]	Área Turbina [ $m^2$ ]	$R_d$
4,8	0,25	72,38	0,20	0,1
4,8	0,36	72,38	0,40	0,2
4,8	0,44	72,38	0,60	0,3
4,8	0,51	72,38	0,80	0,4
4,8	0,57	72,38	1,01	0,5
4,8	0,62	72,38	1,21	0,6
4,8	0,67	72,38	1,41	0,7
4,8	0,72	72,38	1,61	0,8
4,8	0,76	72,38	1,81	0,9
4,8	0,80	72,38	2,01	1,0
4,8	0,84	72,38	2,21	1,1

Se escoge un diámetro de chimenea y una altura interna del colector que proporcione un amplio rango de  $R_d$ . En



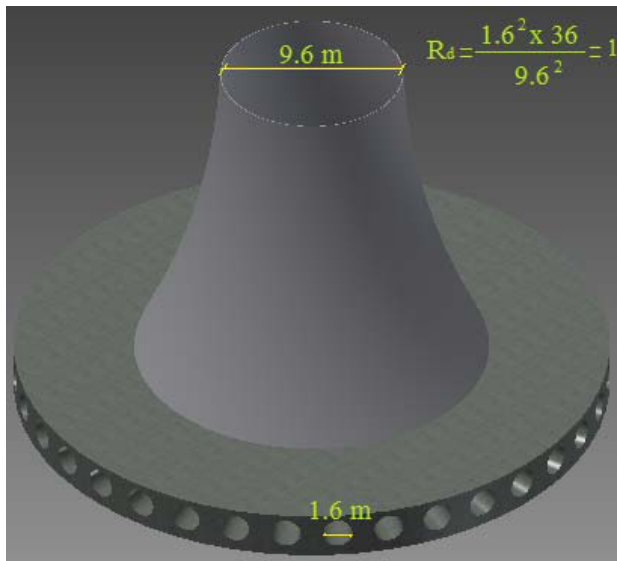


Figura 5. Disposición de turbinas y cálculo de la relación Rd

la Figura 5 se representa la disposición de las turbinas y un ejemplo de cálculo de la relación  $R_d$ . En la Tabla 2 se resumen los valores de  $R_d$  utilizados en este análisis.

## 2.2 Condiciones de Frontera

Para establecer las condiciones de frontera, se analiza el desempeño de la planta en estado estable bajo diferentes niveles de irradiancia. Considerando como base del análisis a la SCPP de Manzanares, se toman los valores de algunas constantes utilizados en ella. Estos valores son detallados en la Tabla 3.

Tabla 3. Constantes Utilizadas

$\beta$	$6 \text{ W/m}^2\text{K}$
$\alpha$	0.75
$\eta_{coll}$	0.62

Los niveles de irradiancia y temperatura ambiente son obtenidos de la base de datos del Sistema de Información Geográfica Fotovoltaica PVGIS, tomando como punto de análisis el sector de Manzanares durante el mes de Julio en el horario de 8h00 a 12h00. Utilizando estos datos y con ayuda de las ecuaciones de la sección 1.4 se determina la irradiancia absorbida y el incremento de temperatura  $\Delta T$  en el colector, los resultados se aprecian en la Tabla 4 en donde  $G$  y  $T_2$  representan los datos del PVGIS.

El diseño de esta planta, realizada en Inventor, pasa a ser evaluada por medio de una herramienta computacional

de elementos finitos CFXDesign de Autodesk, bajo las condiciones de frontera expresadas por Roozbeth [7] y considerando los resultados de la Tabla 4.

Tabla 4. Resultados a diferentes niveles de Irradiancia

$G$ [ $\text{W/m}^2$ ]	$\dot{Q}$ [ $\text{W/m}^2$ ]	$\Delta T$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$T_2$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$T_3$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]
1.000	620	21,7	30,5	52,2
909	564	19,7	28,6	48,3
805	499	17,4	27,3	44,7
718	445	15,6	26,4	42,0
618	383	13,4	25,4	38,8
510	316	11,1	24,5	35,6

La pared de la chimenea se considera adiabática. La presión barométrica estática de la entrada del colector es la presión sobre la superficie terrestre, mientras que la presión de la salida de la chimenea es aquella correspondiente a 100 [m] de altura la cual se obtiene mediante la ecuación 26. Las condiciones se enumeran en la Tabla 5.

$$P_a = e^{-h/9731.4} \quad (26)$$

Tabla 5. Condiciones de Frontera

Sector	Variable	Función
Superficie del Suelo	Temperatura	$T = f(r) \text{ } ^{\circ}\text{C}$
Pared de la Chimenea	Calor	$Q = 0 \text{ W/m}^2$
Entrada del Colector	Presión	$P_s = 0 \text{ } P_a$
Salida de la Chimenea	Presión	$P_s = -1154 \text{ } P_a$

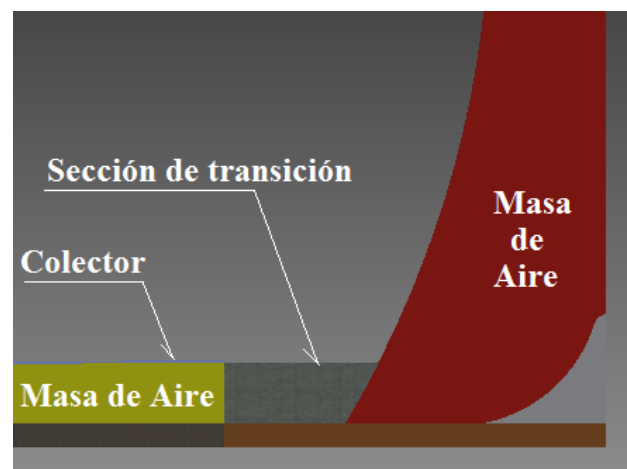


Figura 6. Sección de planta que abarca una turbina, vista lateral

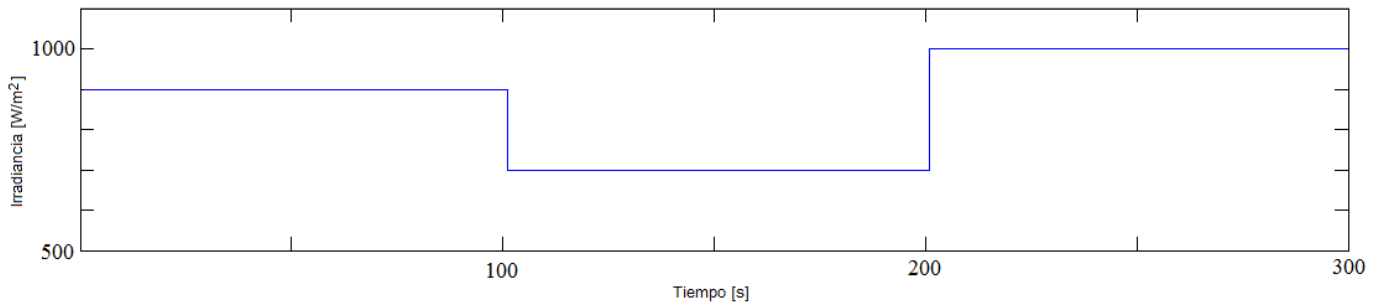


Figura 7. Irradiancia como entrada paso

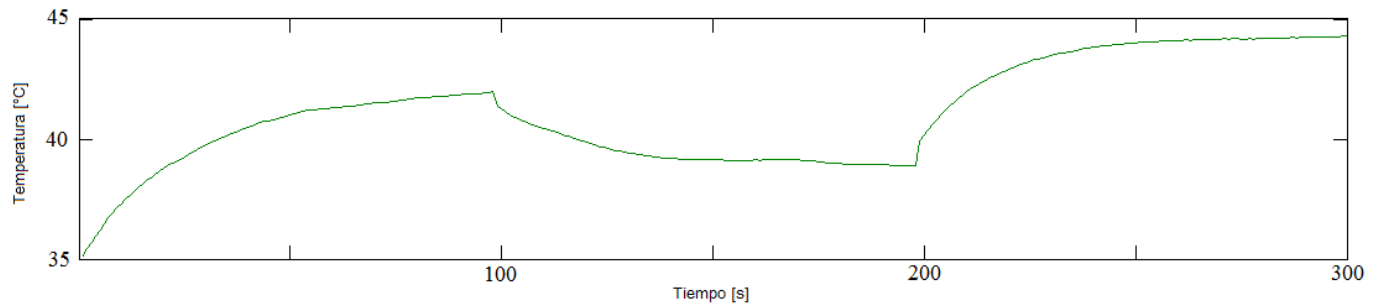


Figura 8. Temperatura media del aire dentro del colector

Para satisfacer la condición de  $T = f(r)$  se discretiza la superficie del suelo en 9 partes, similar al estudio planteado por Hamdan [8], cada una de ellas con una temperatura que aumenta desde la entrada del colector hasta la entrada de la chimenea. Los valores de temperatura de cada parte de superficie de suelo dependerá de la irradiancia incidente que se encuentra entre 500 a 1000  $W/m^2$ .

El uso de la relación  $R_d$  tiene como propósito determinar el punto de máxima potencia. El flujo de masa de aire varía de forma ascendente cuando lo hace de la misma forma la relación  $R_d$ , manteniendo en este estudio el área transversal de la chimenea constante y el de las turbinas variable.

Cabe mencionar que la planta es un sistema totalmente simétrico, por ende se considera la sección de planta que abarca una turbina, como se muestra en la Figura 6, en donde la sección de transición representa la salida del colector o entrada de la chimenea y lugar de ubicación de la turbina es decir la sección variable.

### 2.3 Estado Transitorio

Para determinar el modelo dinámico de la planta se utiliza el análisis transitorio con el método de elementos finitos que brinda CFDesign.

Partiendo del resultado en estado estable, a cada nivel de irradiancia le corresponde un nivel de temperatura en la superficie del suelo dentro del colector, considerando sus nueve divisiones de acuerdo a la función  $T = f(r)$ . Para realizar el estudio en estado transitorio se expone a la planta a tres entradas paso de irradiancia, lo cual implica tres niveles de temperatura en la superficie del suelo dentro del colector.

En condiciones iniciales la planta se encuentra expuesta a 500  $W/m^2$ , luego se introducen los tres niveles de irradiancia diferentes con una duración de 100 s cada una como se muestra en la Figura 7. A continuación se registra la temperatura media del aire dentro del colector como variable de salida, con un periodo de muestreo de 1 s como se observa en la Figura 8. Este procedimiento se realiza para los once valores de  $R_d$  de la Tabla 2. Los datos obtenidos son procesados en la herramienta de identificación de MatLab para conseguir el modelo dinámico del sistema, es decir la función de transferencia que define a la SCP. En este caso la entrada del sistema es la irradiancia que incide sobre el colector y la salida la temperatura media dentro del colector.

El objetivo del control es encontrar una relación de áreas  $R_d$ , para que a cierto nivel de irradiancia la temperatura media del colector alcance una temperatura media de referencia, y así garantizar una velocidad de viento con la cual se consiga la máxima potencia.

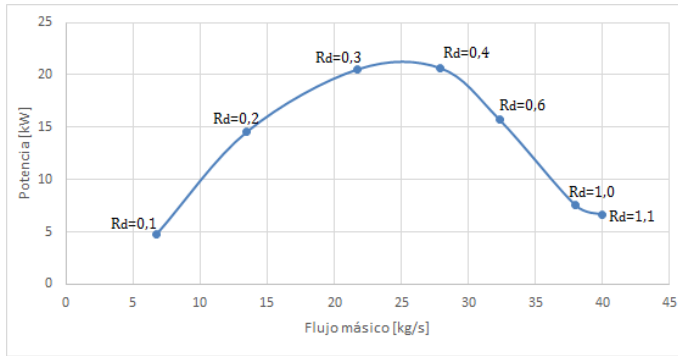


Figura 9.  $P = f(\dot{m})$ , para  $500 \text{ W/m}^2$

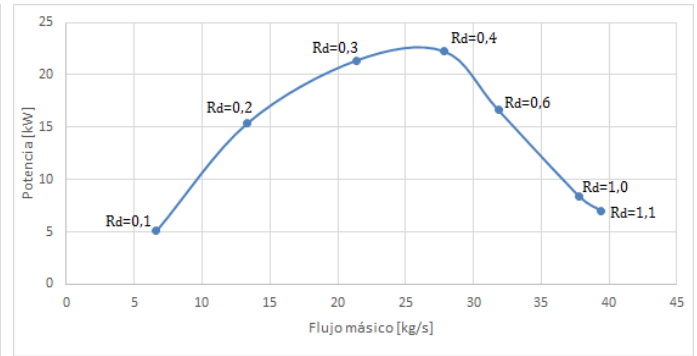


Figura 11.  $P = f(\dot{m})$ , para  $900 \text{ W/m}^2$

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Punto de Máxima Potencia

Para encontrar el punto de máxima potencia se toma como referencia lo realizado por Li [9], quien determina la potencia disponible del aire en la SCPP en función del flujo másico.

En este estudio, para replicar lo expuesto por Li se considera la relación de áreas  $R_d$  como una válvula que controla el flujo másico de aire. Bajo las mismas condiciones de frontera se analiza el desempeño de la SCPP en estado estable para varios valores de  $R_d$ , en otras palabras, al modificar la relación  $R_d$  a una cierta hora del día con un nivel de irradiancia determinado se obtiene diferentes valores de potencia, ya que el flujo másico del aire varía con respecto a la temperatura media del aire dentro del colector.

En las Figuras 9, 10, 11 y 12 se presentan los resultados por turbina de la potencia en función del flujo másico para cuatro niveles de irradiancia, cuando se modifica la relación de áreas  $R_d$ .

La potencia máxima se encuentra en general entre el rango de 0,3 a 0,4 de  $R_d$  para un nivel de irradiancia de 500 a

1000  $\text{W/m}^2$ , lo cual implica que las palas en esta configuración de SCPP deben mantener una posición dentro de este rango. Esto proporciona la primera consideración de control de la planta.

#### 3.2 Modelo Dinámico

En el análisis de la respuesta transitoria de la planta, se utilizan aquellos datos en el rango de 0,3 y 0,4 de  $R_d$  para encontrar la función de transferencia  $F(s)$  de la SCPP.

Para escoger la  $F(s)$  se considera que la planta responde de acuerdo a las características de un sistema térmico, por ende su respuesta es lenta, la cual se encuentra en el orden de los minutos.

Además, en el análisis de estado estable para una SCPP con un  $R_d = 0,4$  y un nivel de irradiancia de  $1000 \text{ W/m}^2$ , la temperatura media del aire en el colector óptima es de  $47,47 \text{ }^\circ\text{C}$ . Haciendo uso de estos datos se consigue determinar la función de transferencia

$$F(s) = \frac{0.0006055}{s + 0.0124}. \quad (27)$$

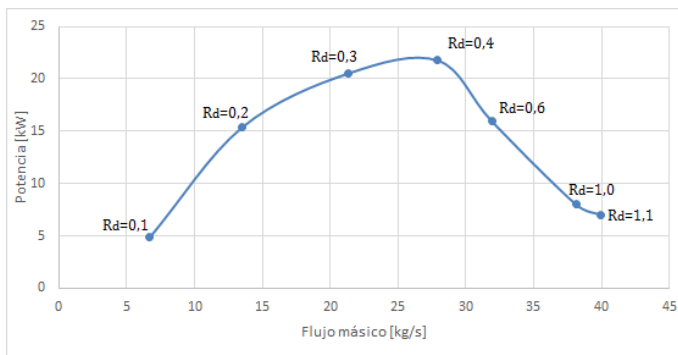


Figura 10.  $P = f(\dot{m})$ , para  $700 \text{ W/m}^2$

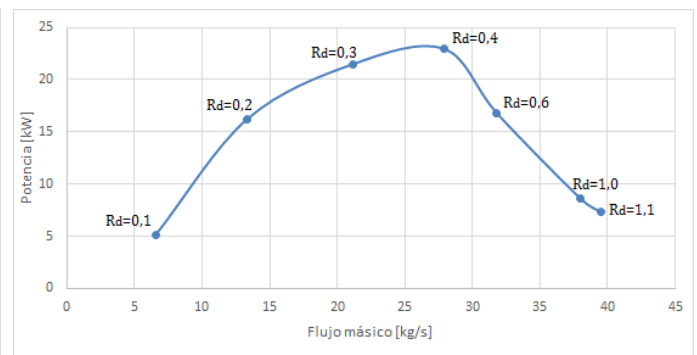


Figura 12.  $P = f(\dot{m})$ , para  $1000 \text{ W/m}^2$

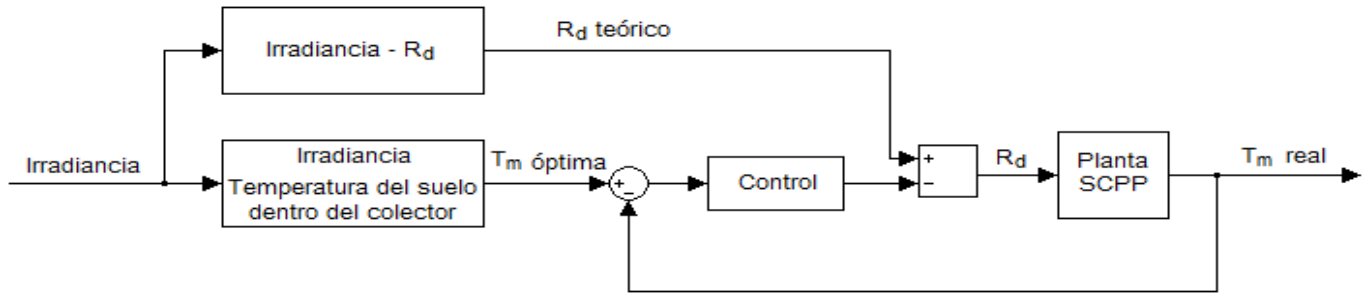


Figura 13. Control en lazo cerrado de la SCPP

En conclusión se determina que para un nivel de irradiancia de  $1000 \text{ W/m}^2$  y un  $R_d = 0,4$  se consigue el punto de máxima potencia, no obstante para niveles inferiores de irradiancia se necesita una relación  $R_d$  menor para incrementar la temperatura media del aire en el colector y finalmente conseguir el punto de máxima potencia.

#### 4. ANÁLISIS DE CONTROL

En la Tabla 6 se resumen los resultados para los cuales la SCPP objeto de este estudio trabaja en el punto de máxima potencia.

Tabla 6. Valores Óptimos de Trabajo

Irradiancia [ $\text{W/m}^2$ ]	Relación de Áreas $R_d$	Temperatura media en el Colector [ $^{\circ}\text{C}$ ]
500	0,35	33,46
700	0,37	39,07
900	0,38	43,83
1000	0,40	47,47

En la Figura 13 se presenta el esquema del sistema de control, en donde la irradiancia pasa a ser evaluada por dos bloques. El primero proporciona un valor de la relación  $R_d$  teórico para la cual la SCPP debe alcanzar la máxima potencia, y el segundo indica al sistema la temperatura media óptima del aire en el colector. Este valor de temperatura es comparado con la temperatura real, y el error resultante es procesado por un controlador. Si la temperatura de salida es menor a la de consigna, el sistema de control provoca una reducción del valor de la relación  $R_d$ ; de esta manera el tiempo de permanencia del aire en el colector aumenta y con ello su temperatura; de esta manera aumenta la diferencia de presiones y en consecuencia la velocidad del viento.

#### 5. CONCLUSIONES

Se ha conseguido una breve apreciación del modo y principio de funcionamiento de una SCPP, con lo cual se propone ciertos criterios simples a considerar a la hora del diseño de este tipo de planta, como lo es la relación de áreas  $R_d$ . Además se ha planteado un método de control que garantice el funcionamiento de la planta en el punto de máxima potencia expuesta por Li [9].

Se demostró que la sección variable no solo sirve para controlar el flujo del aire, sino para aumentar la temperatura del mismo. En una planta real este aumento de temperatura también se produce en el suelo, y de esta manera se almacena energía térmica que es aprovechada en horario nocturno; sin embargo también se generan pérdidas desde el colector por emisiones infrarrojas.

Para este particular caso, las palas de las turbinas deben ocupar un espacio en el área transversal al paso del flujo másico dentro del rango  $0.3 \leq R_d \leq 0.4$ . Cabe resaltar que este resultado no es general y un estudio similar debe realizarse para cada tipo de SCPP con dimensiones diferentes, es decir, las dimensiones de las palas, el espacio de la transición colector-chimenea y el diámetro de la chimenea se encuentran relacionados.

Por disponibilidad se utilizaron datos ambientales de verano de Manzanares - España, no obstante este tipo de planta trabajaría en óptimas condiciones en sectores del planeta con niveles de radiación poco variables entre los días del año, es decir sobre o cercanas a la línea ecuatorial.

En un estudio posterior los resultados adquiridos en este análisis deben ser comparados con un desarrollo práctico, en donde se cuente con turbinas y una planta real de dimensiones de laboratorio, sin olvidar el criterio de diseño que corresponde la relación  $R_d$ .

Uno de los inconvenientes de la SCPP es su baja eficiencia, es por eso que varios estudios se han realizado para

mejorar su desempeño o explotar los límites de funcionamiento. La mejora de los materiales, configuraciones y dimensiones de la planta, sistemas de almacenamiento de energía térmica y de control se han considerado en estudios realizados por diferentes universidades y centro de investigaciones del mundo.

#### REFERENCIAS

- [1] T.P. Fluri, J.P. Pretorius. Cost analysis of solar chimney power plants. *Solar Energy*, 83(2):246 – 256, 2009.
- [2] M. A. Dos Santos Bernardes. Solar chimney power plants – developments and advancements. *Solar Energy*, pages 172 – 186, 2010.
- [3] Schlaich Jorg. *The Solar Chimney. Electricity from the Sun*. Axel Menges, 1995.
- [4] A. Cervone, D. Zaccagnini Romito, E. Santini. Design of solar chimney power plant for mediterranean countries. *SClean Electrical Power*, pages 480 – 484, 2011.
- [5] T.P. Fluri, T.W. Von BackstrÄPm. Performance analysis of the power conversion unit of a solar chimney power plant. *Solar Energy*, 82(11):999 – 1008, 2008.
- [6] Fluri Thomas Peter. *Turbine Layout for and Optimization of Solar Chimney Power Conversion Units*. University of Stellenbosch, 2008.
- [7] Roozbeh Sangi, Majid Amidpour, Behzad Hosseini-zadeh. Modeling and numerical simulation of solar chimney power plants. *Solar Energy*, 85(5):829 – 838, 2011.
- [8] Mohammad O Hamdan. Analysis of solar chimney power plant utilizing chimney discrete model. *Renewable Energy*, 56:50 – 54, 2013.
- [9] Jing-yin Li, Peng-hua Guo, Yuan Wang. Effects of collector radius and chimney height on power output of a solar chimney power plant with turbines. *Renewable Energy*, 47:21 – 28, 2012.

## Predicción de Caudales Basados en Redes Neuronales Artificiales (RNA) para Períodos de Tiempo Sub Diarios

**Veintimilla J.\*; Cisneros F.\*\***

*\*Universidad de Cuenca, Departamento de Ciencias de la Computación, Cuenca, Ecuador  
e-mail: jaime.veintimilla@ucuenca.edu.ec*

*\*\*Universidad de Cuenca, Departamento de Ciencias de la Computación, Cuenca, Ecuador  
e-mail: felipe.cisneros@ucuenca.edu.ec*

---

**Resumen:** La aplicación de modelos matemáticos en el manejo de cuencas hidrográficas tiene requerimientos exigentes de información y en su mayoría no han sido desarrollados para ser aplicados en regiones de montaña. Por esta razón es necesario buscar e implementar modelos que no tengan estos requerimientos y que permitan establecer relaciones entre los datos de entrada y los de salida en una cuenca hidrográfica. Técnicas informáticas de inteligencia artificial permiten establecer relaciones entre los datos de entrada y los de salida en una cuenca hidrográfica. En este paper se evalúa diferentes modelos de Redes Neuronales Artificiales (RNA) con el fin de seleccionar uno e implementarlo, con esto se pretende obtener la posibilidad de manipular cada una de las conexiones del modelo de la red neuronal para buscar una convergencia rápida y la minimización del margen de error. Una vez que el modelo sea calibrado, se pretende realizar la predicción de caudales para intervalos de tiempo inferiores a 24 horas. Además se plantea desarrollar un prototipo para un sistema de transmisión de la información de las estaciones de lluvia, remotamente ubicadas.

**Palabras claves:** RNA, Backpropagation, OHO HWO

**Abstract:** The application of mathematical models in watershed management is demanding information requirements and have mostly not been developed for application in mountained regions. For this reason it is necessary to seek and implement models that do not have these requirements and to establish relationships between the input and output in a river basin. Computer artificial intelligence techniques allow to establish relationships between the input and output in a river basin. In this paper different models of Artificial Neural Networks (ANN) to select one and implement it is evaluated with this is to obtain the ability to manipulate each of the connections model of neural network for rapid convergence and minimizing the margin of error. Once the model is calibrated, it is intended to make the prediction of flow rates for intervals of less than 24 hours time. Furthermore arises develop a prototype system for transmitting information of the rainy season, remotely located

**Keywords:** RNA, Backpropagation, OHO-HWO

---

## 1. INTRODUCCIÓN

El modelo, a más de predecir caudales para la producción de energía hidroeléctrica, está en capacidad de brindar soporte en la prevención de desastres ligados al control de avenidas a través de la laminación en embalses, y a la utilización más óptima de los recursos hídricos. Para el desarrollo de la investigación se utilizaron datos disponibles de la cuenca del río Tomebamba que han sido utilizados para entrenar y operar modelos de redes neuronales artificiales y posteriormente evaluar los resultados obtenidos en cada modelo. Cabe indicar que este tipo de herramienta cobra importancia en los actuales momentos en los que el mercado de energía eléctrica es a base de cupos asignados. La asignación de cupos se realiza a escala nacional, a través de SENACE para la cual las diferentes generadoras deben determinar la cantidad de energía que serían capaces de generar. En este contexto la presente investigación ofrece a las generadoras del país las bases para la implementación de un modelo de predicción de mayor precisión que les permita optimizar su producción y ser más competitivos dentro del mercado eléctrico. La aplicación de modelos matemáticos en el manejo de cuencas hidrográficas tiene requerimientos exigentes de información y en su mayoría no han sido desarrollados para ser aplicados en regiones de montaña.

Técnicas informáticas de inteligencia artificial permiten establecer relaciones entre los datos de entrada y los de salida en una cuenca hidrográfica.

El proyecto evaluó diferentes modelos de Redes Neuronales Artificiales (RNA) con el fin de seleccionar uno e implementarlo, con esto se obtiene la posibilidad de manipular cada una de las conexiones del modelo de la red neuronal para buscar una convergencia rápida y la minimización del margen de error.

## 2. REDES NEURONALES ARTIFICIALES

### 2.1 Definición

Existen numerosas formas de definir lo que son las redes neuronales artificiales o RNA, desde definiciones cortas y genéricas hasta las que intentan explicar detalladamente lo que significa red neuronal o computación neuronal:

*Una nueva forma de computación, inspirada en modelos biológicos.* [10].

*Un modelo matemático compuesto por un gran número de elementos de procesamiento organizados en niveles.* [10].

*... un sistema de computación hecho por un gran número de elementos simples, elementos de proceso muy interconectados, los cuales procesan información por medio de su estado dinámico como respuesta a entradas exteriores.* [11].

### 2.2 El modelo biológico

Una neurona tiene un cuerpo celular más o menos esférico con un diámetro entre 5 y 10 micras. De este cuerpo principal salen una rama principal llamada axón y varias ramas más cortas, llamadas dendritas. A su vez el axón puede producir ramas en torno a su punto de arranque, y con frecuencia se ramifica extensamente cerca de su extremo. Las dendritas y el cuerpo celular reciben señales de entrada; el cuerpo celular las combina e integra y emite señales de salida. El axón transporta esas señales a los terminales axónicos que se encargan de distribuir información a un nuevo conjunto de neuronas. Una neurona recibe información de miles de neuronas y envía información a miles de neuronas más [10].

### 2.3 Elementos de una Red Neuronal Artificial

Las redes neuronales artificiales reproducen el comportamiento del cerebro, modelo en el que se consideran a las neuronas como unidades de procesamiento. Generalmente se pueden encontrar tres tipos de neuronas:

- Reciben estímulos o señales externas, toman la información del exterior, por lo que se les conoce como unidades de entrada.
- Elementos internos que se ocupan del procesamiento de la información de entrada. Se les conoce como unidades ocultas, unidades ocultas pues no tienen relación con los estímulos o señales externas ni con la respuesta del sistema, pero ellas si se conectan, a no ser que no haya unidades ocultas, con las de entrada y las de salida.
- Unidades de salida, cuya misión es entregar la respuesta del sistema.

Cada neurona está caracterizada por un valor numérico o estado de activación y existe una función de salida  $f_i$  asociada a cada una de estas unidades, que transforman el estado actual de activación en una señal de salida  $y_i$ . Dicha señal es enviada a todos los canales de comunicación de la red (conexiones). En estos canales la señal se modifica de acuerdo con la sinapsis (el peso de la conexión) asociada a cada uno de ellos según una determinada regla. Las señales moduladas que han llegado a la unidad  $j$ -ésima se combinan entre sí generando así la entrada total  $Net_j$ . Una función de activación,  $F$ , determina el nuevo estado de activación  $aj(t+1)$  de la neurona, teniendo en cuenta la entrada total calculada y el anterior estado de activación  $aj(t)$ . [10].

## 2.4 Algoritmos

### 2.4.1 Backpropagation

Como su nombre lo indica, consiste en la propagación del error hacia atrás, es un tipo de aprendizaje supervisado y está basado en la generalización de la regla delta. Una vez que se ha utilizado un patrón como entrada, éste se propaga desde la capa de entrada a las capas intermedias (ocultas) hasta obtener una salida. La salida obtenida se compara con la salida deseada y se calcula el error de cada una de las salidas de las neuronas. El error se propaga hacia atrás, partiendo de la salida pasando por cada una de las neuronas que aportan a la capa de salida. Las capas ocultas reciben una fracción del error, que es equivalente al error en la salida. Esto se realiza con cada una de las neuronas de la red, hasta que el error se haya distribuido completamente. Mediante esta distribución del error, se pueden manipular los pesos de conexión de cada neurona, con el fin de que el error disminuya, y obtener una correcta aproximación de los patrones en el entrenamiento.

### 2.4.2 OWO-HWO

El OWO HWO es un algoritmo de capacitación alternativo de las redes neuronales de propagación hacia adelante, resuelve ecuaciones lineales para los pesos en las salidas y reduce la separación en la función de error de las capas ocultas con respecto a los pesos de las capas ocultas. En este sentido, una nueva función en la capa oculta es propuesta la cual da énfasis en las funciones de error que corresponden a un valor saturado de la función de activación. En efecto una tasa de aprendizaje adaptativo basado en una forma local de la superficie del error es usada en el entrenamiento de la capa oculta. Una rápida convergencia en el aprendizaje ha sido experimentalmente verificada [18].

El algoritmo para la optimización de los pesos de salida optimización de los pesos ocultos (OWO-HWO) es ampliamente usado en el entrenamiento de las redes neuronales con propagación hacia adelante tales como el perceptron multicapa (MLP). Trabaja bien para muchas aproximaciones y en los problemas de reconocimiento de patrones.

En OWO-HWO, se modifican alternativamente los pesos de salida y las unidades ocultas para reducir el error en el entrenamiento. Este modifica los pesos ocultos basándose en la minimización del Error Cuadrático Promedio (MSE por sus siglas en inglés) entre las deseadas y las actuales funciones de la red. Aunque OWO-HWO frecuentemente converge rápidamente éste no usa algunas técnicas efectivas, por ejemplo, prevención de saturación prematura, adaptación de la tasa de aprendizaje [18].

### 2.4.3 Algoritmos Genéticos

Los algoritmos genéticos son una técnica de resolución de problemas inspirada en la naturaleza. Están basados en el principio de Darwin, sobre la reproducción y supervivencia de los individuos más aptos.

En los últimos años, la comunidad científica internacional ha mostrado un creciente interés en una nueva técnica de búsqueda basada en la teoría de la evolución y que se conoce como el algoritmo genético. Esta técnica se basa en los mecanismos de selección que utiliza la naturaleza, de acuerdo a los cuales los individuos más aptos de una población son los que sobreviven, al adaptarse más fácilmente a los cambios que se producen en su entorno. Hoy en día se sabe que estos cambios se efectúan en los genes (unidad básica de codificación de cada uno de los atributos de un ser vivo) de un individuo, y que los atributos más deseables (i.e., los que le permiten a un individuo adaptarse mejor a su entorno) del mismo se transmiten a sus descendientes, cuando éste se reproduce sexualmente [1].

Un investigador de la Universidad de Michigan llamado John Holland estaba consciente de la importancia de la selección natural, y a fines de los 60s desarrolló una técnica que permitió incorporarla en un programa de computadora. Su objetivo era lograr que las computadoras aprendieran por sí mismas. A la técnica que inventó Holland se le llamó originalmente "planes reproductivos", pero se hizo popular bajo el nombre "algoritmo genético" tras la publicación de su libro en 1975 [7].

**Redes Neuronales Artificiales Evolutivas** Las redes neuronales artificiales evolutivas se refieren a un tipo de redes neuronales artificiales a la que se le aplican técnicas evolutivas dentro del proceso de diseño y aprendizaje de la red. De forma general se puede afirmar que los algoritmos evolutivos se utilizan en el contexto de las redes neuronales en tres diferentes niveles: estimación de pesos de las conexiones, arquitecturas e implantación de reglas de aprendizaje. La estimación de los pesos de las conexiones introduce un método que sustituye o complementa a los métodos clásicos de optimización basados en el gradiente descendente que a menudo suelen quedar atrapados en mínimos locales y que ofrecen algunas dificultades cuando se aplican a redes neuronales recurrentes [18]. Por otra parte, el diseño de la estructura de la red permite a la red adaptar su topología a diferentes tareas permitiendo que la red se adapte fácilmente en entornos dinámicos, por lo que la intervención humana es mínima dentro del proceso de aprendizaje. La implantación de las reglas de aprendizaje permite que el propio sistema aprenda a aprender y el proceso de búsqueda sea más eficiente y eficaz.



**Estimación de los pesos de las conexiones** Dada una estructura de red, el entrenamiento de los pesos de las conexiones se formula en base a la minimización de la función de error. Como ya se ha dicho, los principales algoritmos de entrenamiento se basan en el descenso del gradiente de la función de error: retropropagación (BP).

Dichos algoritmos aunque son muy eficientes, suelen quedar atrapados en mínimos locales dependiendo del punto de partida de la búsqueda. Además, estos algoritmos no se pueden utilizar cuando la función de error es multimodal y/o no diferenciable.

Por su parte, los algoritmos evolutivos realizan una búsqueda global del óptimo de forma más efectiva y pueden trabajar con superficies de error multimodal y no diferenciable. Al no necesitar ninguna información relacionada con el gradiente de la función de error, resultan métodos bastante útiles cuando esta información no está disponible. Este hecho es el que ha motivado la utilización de redes neuronales evolutivas en la resolución de numerosos problemas reales en los que con frecuencia la función de error es multimodal y presenta problemas de continuidad y de diferenciable. Por su parte, los algoritmos basados en el gradiente (retro propagación y gradiente conjugado) suelen ser más rápidos en la búsqueda del óptimo que el entrenamiento evolutivo. Sin embargo, los métodos evolutivos son en general menos sensibles a las condiciones iniciales del entrenamiento.

Recientemente, ha aparecido una nueva metodología que combina los algoritmos evolutivos y los métodos de búsqueda local. En el contexto de las redes neuronales, esa metodología lleva a cabo un entrenamiento híbrido, combinando la capacidad de buscador global de un algoritmo evolutivo con la capacidad de afinar la solución que tienen los algoritmos de búsqueda local como los basados en el gradiente [1]. Dentro del proceso de estimación de los pesos de las conexiones de la red se distinguen dos fases fundamentales: Decidir la representación de los pesos de las conexiones y diseñar los operadores de mutación y cruce más adecuados para aplicar sobre los individuos representados en la forma elegida.

### 3. SISTEMA DE PREDICCIÓN DE CAUDALES

#### 3.1 Investigación y selección de los algoritmos

El presente trabajo de investigación surgió con la necesidad de continuar con el estudio del proyecto de investigación: Redes Neuronales Artificiales Aplicadas En La Predicción De Caudales En La Cuenca Del Río Paute [16], desarrollado en el año 2004 y parte del 2005. Como resultados del proyecto se obtuvieron predicciones con valores de caudal muy semejantes a los reales, además se planteó la posibilidad de continuar con el estudio de las

redes neuronales con el fin de llegar a obtener una calibración mayor en dicho modelo. El proyecto anterior se desarrolló enteramente utilizando Backpropagation como tipo de red neuronal. El presente proyecto se planteó con la necesidad de determinar el tipo de RNA más idóneo para obtener predicciones con un mayor índice de confiabilidad. Con esto como base se procedió a realizar una investigación orientada a determinar los tipos de redes más utilizados en aplicaciones que realizan predicción de patrones.

Como fruto de esta investigación, se obtuvieron los siguientes tipos:

- Backpropagation
- OWO-HWO
- Genéticos

Cabe indicar además que los algoritmos OWO-HWO y Genético pueden usarse además con el fin de realizar optimizaciones en los pesos de las conexiones de cada una de las neuronas que conforman las capas de las redes neuronales.

#### 3.2 Selección de los escenarios

Una vez realizada la selección de los algoritmos, lo siguiente es establecer los escenarios a utilizarse durante la validación de cada uno de los modelos obtenidos de cada tipo de RNA. Tomando como base el proyecto de investigación anterior, y tomando en consideración que se van a predecir los caudales de ingreso a la cuenca del río tomebamba, los escenarios de los cuales se obtuvieron mejores resultados son los mostrados en la tabla 1.

El escenario 1, está compuesto únicamente de estaciones de precipitación, y además incluye tres días de datos hacia atrás y realiza una predicción de un día hacia adelante. Se debe indicar además que éste es el escenario que mejores resultados obtuvo en el proyecto de predicción de caudales anterior.

Tabla 1. Escenario 1

Escenario 1		
Caudal	Tomebamba_en Ucubamba	Salida
Precipitación	Est_Cancan_Soldados_1997_2009 i-3	Entrada
Precipitación	Est_Cancan_Soldados_1997_2009 i-2	Entrada
Precipitación	Est_Cancan_Soldados_1997_2009 i-1	Entrada
Precipitación	Est_El_Portete_1997_2001 i-3	Entrada
Precipitación	Est_El_Portete_1997_2001 i-2	Entrada
Precipitación	Est_El_Portete_1997_2001 i-1	Entrada
Precipitación	Est_Gualaceo_DJ_Pamar_1997_2009 i-3	Entrada
Precipitación	Est_Gualaceo_DJ_Pamar_1997_2009 i-2	Entrada
Precipitación	Est_Gualaceo_DJ_Pamar_1997_2009 i-1	Entrada
Precipitación	Est_La_Esmeralda_1997_2009 i-3	Entrada
Precipitación	Est_La_Esmeralda_1997_2009 i-2	Entrada
Precipitación	Est_La_Esmeralda_1997_2009 i-1	Entrada
Precipitación	Est_Matadero_en_Sayausi_1997_2009 i-3	Entrada
Precipitación	Est_Matadero_en_Sayausi_1997_2009 i-2	Entrada
Precipitación	Est_Matadero_en_Sayausi_1997_2009 i-1	Entrada
Precipitación	Est_Tarqui_DJ_Cumbe_1997_2009 i-3	Entrada
Precipitación	Est_Tarqui_DJ_Cumbe_1997_2009 i-2	Entrada
Precipitación	Est_Tarqui_DJ_Cumbe_1997_2009 i-1	Entrada
Precipitación	Est_Yanuncay_en_Pucan_1997_2009 i-3	Entrada
Precipitación	Est_Yanuncay_en_Pucan_1997_2009 i-2	Entrada
Precipitación	Est_Yanuncay_en_Pucan_1997_2009 i-1	Entrada
Precipitación	Est_Ucubamba_en_ETAPA_1998_2009 i-3	Entrada
Precipitación	Est_Ucubamba_en_ETAPA_1998_2009 i-2	Entrada
Precipitación	Est_Ucubamba_en_ETAPA_1998_2009 i-1	Entrada
Caudal	Tomebamba_en Ucubamba i-3	Entrada
Caudal	Tomebamba_en Ucubamba i-2	Entrada
Caudal	Tomebamba_en Ucubamba i-1	Entrada

Tabla 2: Escenario 2:

Escenario 2		
Precipitación	Est_Cancan_Soldados_1997_2011 i-1	Salida
Precipitación	Est_El_Portete_1997_2003 i-1	Entrada
Precipitación	Est_Gualaceo_DJ_Pamar_1997_2011 i-1	Entrada
Precipitación	Est_La_Esmeralda_1997_2011 i-1	Entrada
Precipitación	Est_Matadero_en_Sayausi_1997_2011 i-1	Entrada
Precipitación	Est_El_Portete_1997_2001 i-1	Entrada

Precipitación	Est_Tarqui_DJ_Cumbe_1997_2011 i-1	Entrada
Precipitación	Est_Yanuncay_en_Pucan_1997_2010 i-1	Entrada
Precipitación	Est_Ucubamba_en_ETAPA_1998_2011 i-1	Entrada
Caudal	Tomebamba_en Ucubamba i-1	Entrada

El escenario 2, consta únicamente de datos de la estación de caudal en donde se realiza la predicción de caudales.

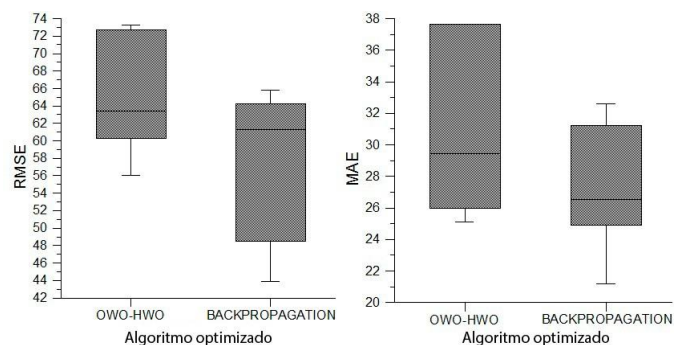
El conjunto de datos incluye una resolución de un día de datos hacia atrás y permite obtener la predicción de caudales de un día hacia adelante.

### 3.3 Resultados

#### 3.3.1 Fase de selección

Con el objetivo de realizar la validación de los modelos creados a partir de los tipos de datos seleccionados, se procedió a generar los escenarios y establecer los parámetros necesarios para el entrenamiento.

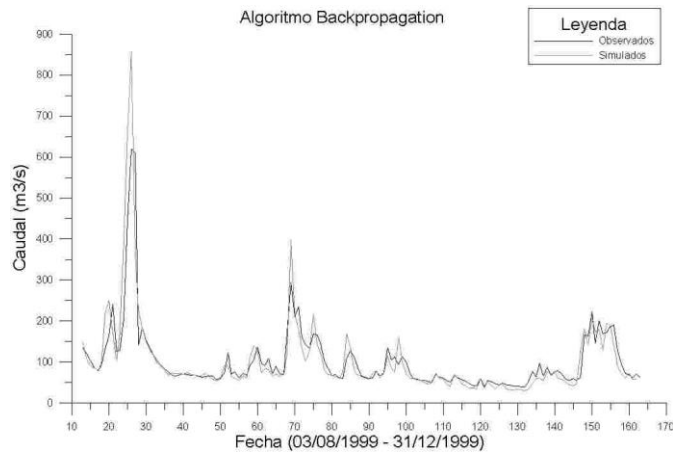
Como se puede apreciar los mejores resultados de estas validaciones se registraron en el escenario 1, lo cual nos indica que: La normalización<sup>1</sup> de los datos de entrada, no tiene mucha influencia cuando se está utilizando el algoritmo de backpropagation, pero si influye positivamente cuando se utiliza el OWO-HWO.



**Figura 1.** Cuadro gráfico del RMSE (cuadro de la derecha) and MAE (cuadro de la izquierda) como una función del algoritmo optimizado de OWO-HWO y BACKPROPAGATION. La difusión por algoritmo es debido a la variación en el escenario (1, 2 or 3), entradas (4, 16 or 22), número de iteraciones (1000 or 9054) y normalización (si o no).

Al incrementar el número de iteraciones en el escenario 1 y utilizando el algoritmo backpropagation, se obtuvieron los mejores resultados, esto se puede ver de una manera más gráfica en la Fig. 2.

<sup>1</sup>La normalización es el proceso en el cual todas las entradas que se utilicen en una red neuronal artificial son convertidas en valores que oscilan entre 0 y 1



**Figura 2.** Comparación de los caudales diarios obtenidos en la RNA con los caudales diarios registrados en la estación Tomebamba en el período 3 de agosto de 1999 hasta el 31 de diciembre de 1999. Escenario 1, empleando el algoritmo Backpropagation

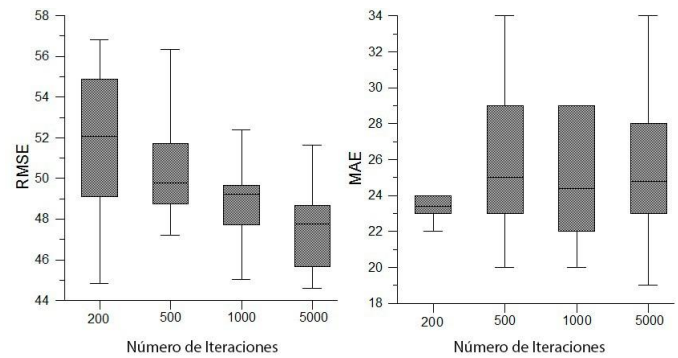
En base a lo anteriormente expuesto, se procedió a realizar la implementación de dicho algoritmo, con el fin de utilizar algoritmos para lograr un acople mucho mayor de los pesos de las conexiones de las neuronas. Este acople se planea realizarlo mediante la utilización de los algoritmos genéticos para la selección de los pesos. Esto es una buena opción debido a que backpropagation por defecto inicializa los pesos con valores seleccionados aleatoriamente. Con la utilización de los genéticos se puede obtener un conjunto de pesos mucho más representativos. Es por eso que el resultado de esta implementación ha permitido obtener un algoritmo híbrido entre el backpropagation y el genético.

### 3.3.2 Fase de implementación del algoritmo seleccionado

Para realizar las pruebas de la implementación de este algoritmo híbrido, se ha seleccionado únicamente los escenarios 1 y 2 por considerarse los que mejores resultados generaron. El objetivo principal es obtener los parámetros más adecuados para su correcto funcionamiento, razón por la cual se han variado los valores de:

- Capas ocultas
- Neuronas
- Taza de aprendizaje

- Momento
- Iteraciones

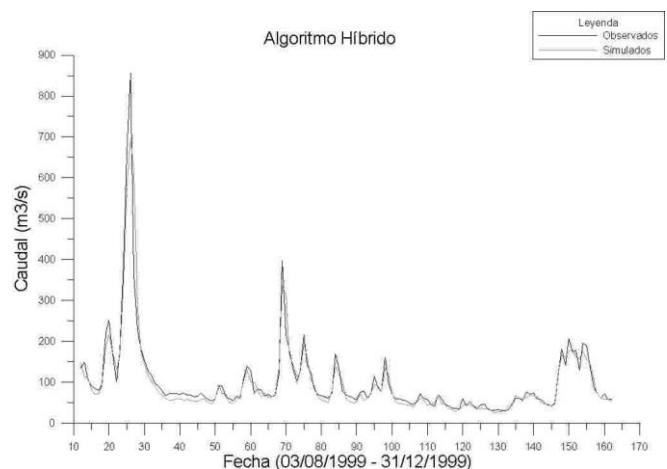


**Figura 3.** Gráfico del RMSE (cuadro derecho) y MAE (cuadro izquierdo) en función del número de iteraciones. La dispersión por el número de iteraciones es debido a la variación en el escenario (1 o 2), número de capas ocultas (1 o 2), número de neuronas (5, 10 o 13), tasas de aprendizaje (0.01, 0.1, 0.2 o 0.3) y momento (0, 0.05, 0.1 o 0.2)

En base a las pruebas realizadas con el modelo desarrollado, los mejores resultados indican que las siguientes características óptimas son:

- Iteraciones: 5000
- Capas ocultas: 2
- Neuronas: 10 en la primera y 5 en la segunda
- Taza de aprendizaje: 0.3
- Momento: 0.2

El acople en la validación de este modelo se lo puede ver claramente en la Fig. 4.



**Figura 4.** Resultados escenario 1, parámetros fijos 2 capas oculta (5 y 10 neuronas respectivamente), tasa de aprendizaje 0.3, momento 0.2, parámetros RMSE 30.52 y MAE 14.75.

En base a los resultados expuestos, se puede concluir que:

- A medida que aumenta las iteraciones, se presentan mejores resultados.
- El aumento en el número de capas ocultas mejoró los resultados de modelo.
- En las pruebas iniciales, la utilización de una tasa de aprendizaje de 0.1 entregó los mejores resultados. Cuando se aumentaba este valor, se incrementaba también el error MAE. Pero con la inclusión de una segunda capa oculta, se obtuvo una mejora en el MSE (Mean Square Error) y un valor aceptable de MAE. Por lo cual se puede decir que el valor de 0.3 para la tasa de aprendizaje combinado con un valor mayor a 1 en las capas ocultas es el óptimo para el modelo.
- El valor óptimo para el momento se lo ha establecido entre 0 y 0.2.

#### 4. CONCLUSIONES Y FUTUROS TRABAJOS

##### 4.1 Conclusiones del sistema de predicción de caudales

El algoritmo OWO-HWO requiere de un tiempo mayor para realizar el mismo número de iteraciones que con el algoritmo Backpropagation. De igual manera, el error medio cuadrático es menor con el Algoritmo Backpropagation que con el OWO-HWO. Al igualarse los tiempos de entrenamiento entre el Algoritmo OWO-HWO y el algoritmo Backpropagation, se puede observar que el algoritmo Backpropagation se reduce drásticamente el Error Medio Cuadrático (MSE) en comparación con el Algoritmo OWO-HWO. La normalización de datos (para valor entre 0 y 1) para el entrenamiento y el empleo del algoritmo OWO-HWO, produce una disminución del error cuadrático medio. El resultado de este conjunto de pruebas indica que el Algoritmo que ha presentado mejores resultados es el Backpropagation, por cuanto tiene el menor error medio cuadrático. Se puede concluir adicionalmente que cuando se aumenta el tiempo de entrenamiento o se aumenta el número de iteraciones el error disminuye. La utilización del algoritmo híbrido propuesto, hace que la inicialización de los pesos de las conexiones sea menos complejo mediante la utilización de medios genéticos que se ve complementado de la optimización realizada en el algoritmo de backpropagation.

##### 4.2 De los escenarios propuestos

Al realizar el entrenamiento y la simulación con el mismo conjunto de datos, los resultados en cuanto al

error indica que el Algoritmo Backpropagation, tiene mejores resultados que el OWO-HWO.

Cuando en el entrenamiento se utiliza un conjunto de datos y en la predicción otros datos, lo que refleja el verdadero uso del sistema, los resultados presentados al

usar el algoritmo Backpropagation fueron mejores al OWOHWO en cuanto al error.

#### REFERENCIAS

- [1] R. R. Beasley, D., Bull, D. R., Martin. An Overview of Genetic Algorithms: Part 1, Fundamentals. Technical report, En University Computing, 1993.
- [2] E. Cantú Paz. A survey of Parallel Genetic Algorithms. Technical Report Illinois Genetic Algorithms Laboratory. Technical report, University of Illinois at Urbana-Champaign, 1997.
- [3] Patricio Capelo. Sistema de telemetría diseñado para PROMAS Universidad de Cuenca. Technical report, 2007.
- [4] C. Chinrungrueng. Evaluation of Heterogeneous Architectures of Artificial Neural Networks. Technical report, University of California at Berkeley, California, 1993.
- [5] Booch et Al. Proceso Unificado de Desarrollo de Software (UP). 2002.
- [6] R. F. Vázquez Z. & J. Feyen. Potencial evaporation: Its effect on the modelling of the hydrological cycle of e médium sized catchment with the MIKE SHE code. 2002.
- [7] S. Forrest. Genetic Algorithms. *ACM Computer Survey*, 1996.
- [8] J. Fritsch. *Modular Neural Networks for Speech Recognition*. PhD thesis, Carnegie Mellon University, 1996.
- [9] Veintimilla R Jaime and Cisneros E Felipe. on de caudales para intervalos de tiempo horarios Introducci  
ÂŽ on Redes Neuronales Artificiales Defini  
ÂŽ. *RTE*, 27(Diciembre):37-49, 2014.
- [10] J. R. Hilera â V. J. Martinez. *Redes Neuronales Artificiales (Fundamentos, Modelos y Aplicaciones)*. Addison Wesley, 1998.
- [11] Hecht-Nielsen R. Counter-propagation networks. *J. Of Applied Optics*, 1987.

- [12] Frevert Donald Singh Vijay. *Mathematical Models of Small Watershed Hydrology and Applications*. 2002.
- [13] D.P. Solomatine. Genetic and other global optimization algorithms comparison and use in calibration problems. In *Proc. 3rd International Conference on Hydroinformatics*, 1998.
- [14] G.N. Paudyal S.Y. Liong, W.H. Lim. River Stage Forecasting in Bangladesh: Neural Network Approach. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2000.
- [15] P Vanegas, P. De Bievre, B. Cisneros, F. Jerves, L. Lazo. Real time inflow prediction in the Paute River Basin. 2007.
- [16] Palacios F. Veintimilla J. *Redes Neuronales Artificiales Aplicadas En La Predicción De Caudales En La Cuenca Del Río Paute*. 2004.
- [17] G. Lewis W. Viessman. *Introduction to Hydrology*. HarperCollins College, New York, New York, USA, 1996 edition.
- [18] D. Whitley. *A Genetic Algorithm Tutorial*.
- [19] X. Yao. Evolutionary Artificial Neural Networks. *En International Journal of Neural Systems*, 1993.

# Tele-Operación Bilateral de Manipuladores Móviles

Ortiz J.\*; Morales J.\*\*; Pérez M.\*\*\*; Andaluz V.\*\*\*\*

\*Universidad Tecnológica Indoamérica, Facultad de Ingeniería en Sistemas, Ambato, Ecuador  
e-mail: jessortizm@outlook.com

\*\*Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Informática y Electrónica, Riobamba, Ecuador  
e-mail: j\_morales@epoch.edu.ec

\*\*\*Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería en Sistemas, Quito, Ecuador  
e-mail: maria.espanya@gmail.com

\*\*\*\*Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Departamento de Energía y Electrónica, Ecuador  
e-mail: vhandaluz1@espe.edu.ec

**Resumen:** Este trabajo propone una nueva estructura de control estable para la tele-operación bilateral de un robot manipulador móvil. Un manipulador móvil consiste en un robot manipulador (o brazo) ubicado sobre una plataforma móvil (con ruedas o patas). En la estructura de control propuesta la imagen y las fuerzas de interacción entre robot-medio son realimentadas al operador para tener un mejor desempeño en la realización de tareas remotas que requieren tanto la capacidad de locomoción como de manipulación. Además, la estabilidad del sistema es analizada. Se presentan los resultados obtenidos por experimentación, donde se muestra el buen desempeño del robot como fue previsto en el diseño teórico.

**Palabras clave:** Control coordinado, Compensación dinámica, Manipulador móvil, Tele-operación bilateral

**Abstract:** In this paper a new stable control structure for bilateral tele-operation of a mobile manipulator robot is proposed. A mobile manipulator is a manipulator robot (or arm) located on a moving platform (with wheels or feet). In the proposed control structure image and the interaction forces between robot-half are fed back to the operator to perform better in performing remote tasks that require both the ability of locomotion and manipulation. In addition, the system stability is analyzed. The results obtained by experimentation, where the good performance of the robot is shown as envisaged in the theoretical design are presented.

**Keywords:** Coordinated control, Dynamic compensation, Mobile manipulator, Bilateral Tele-operation

## 1. INTRODUCCION

La tele-operación de robots significa manejar un robot a distancia para realizar alguna tarea dada permitiendo de esta manera, que un operador humano pueda transportar su capacidad y destreza hacia ambientes de trabajos remotos y/o peligrosos, minimizando de esa manera los riesgos asociados, o más aún, alcanzar lugares inaccesibles por el hombre. Así, se puede extender la inteligencia y experiencia de expertos hacia aplicaciones a distancia [1]-[2]. Los sistemas de tele-operación permiten integrar métodos de automatización complejos y la capacidad del hombre con el fin de cubrir requerimientos actuales de tareas como son: reparaciones en reactores nucleares, reparaciones de satélites comandadas desde tierra, desactivación de artefactos explosivos, misiones de rescates, búsquedas submarinas, extinción de fuegos a distancia, inspección y monitoreo de ambientes peligrosos, o en donde se requiera q el ser humano no este expuesto a daños físicos e inaccesibles etc. [3]-[4]-[5]; y también trabajos futuros como podrían ser: una mayor cantidad de

aplicaciones en telemedicina, tele-manufactura, exploración (visitas) de lugares turísticos (por ejemplo museos) a través de Internet u otro medio de comunicación que permitan aumentar la concurrencia real y/o virtual a dichos lugares, una mayor cantidad de exploraciones espaciales, y también tareas cooperativas entre expertos y no-expertos situados en diferentes lugares para realizar tareas complejas, como por ejemplo la construcción y mantenimiento de bases espaciales. Los sistemas de tele-operación están constituidos por: una estación o sitio de trabajo local, donde se encuentra el operador humano que manipula un robot o un dispositivo generando comandos de control y además recibe información táctil de fuerza y/o visual de imagen; un lugar de trabajo o sitio remoto, donde un robot esclavo (manejado por el operador humano desde el sitio local) realiza una tarea determinada en interacción con un medio o entorno, como por ejemplo: ensamblar un conjunto de piezas mecánicas, navegar en pasillos con personas, etc.; y un canal de comunicación bidireccional, que vincula ambos sitios. La Fig. 1 muestra un diagrama en bloques general para tele-operación bilateral de un robot.

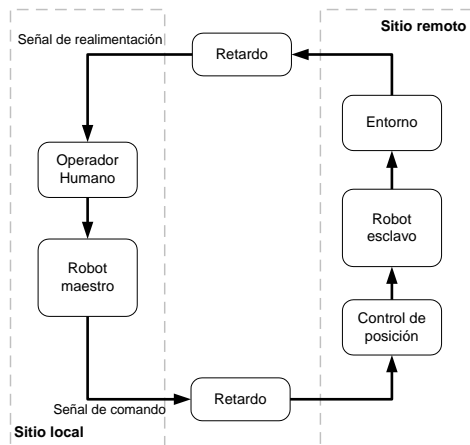


Figura 1. Diagrama de bloques general de un sistema de teleoperación bilateral de un robot

En la tele-robótica, el operador humano aplica una fuerza intencional al sistema local (por ejemplo, un joystick) generando una serie de movimientos sobre el robot remoto. Además, existen tareas en las que por su naturaleza, es muy importante, que el operador humano posea una sensación de presencia en el lugar remoto. Por ello, se incorpora en el lazo de control, tanto realimentación de fuerza como realimentación visual hacia el operador humano. El uso de realimentación de fuerza en robótica sirve para que el operador humano pueda sentir la fuerza de contacto entre el robot y algún objeto de su entorno, lo cual se manifiesta en un mayor sentido remoto del operador [6], como por ejemplo: noción del peso a manipular. Por otra parte, la imagen adquirida a partir de una cámara se realimenta hacia el operador humano, de forma que éste pueda ver el movimiento del robot desplazándose en el ambiente de trabajo remoto y genere comandos de control para ser enviados hacia el robot. Un sistema de teleoperación en el cual el operador humano envía comandos a través de un sistema local hacia un sistema de operación remota, y recibe simultáneamente información proveniente desde el sitio remoto (como por ejemplo, realimentación táctil de fuerza o realimentación visual), se denomina sistema de teleoperación bilateral debido a que la información fluye en forma bidireccional [7].

En este trabajo se propone un nuevo esquema para la teleoperación bilateral de un robot manipulador móvil. El término manipulador móvil es utilizado para referirse a los robots construidos por un brazo robótico (robot manipulador) montado sobre una plataforma móvil (con ruedas o patas). Este sistema, que se caracteriza generalmente por tener un alto grado de redundancia, que combina la manipulación de un manipulador de base fija con la movilidad de una plataforma con ruedas o patas [8], [9]. Estos sistemas permiten realizar las misiones más habituales de los sistemas robóticos que requieren tanto la capacidad de locomoción como de manipulación [10], [11]. El esquema de teleoperación bilateral propuesto considera la compensación dinámica del manipulador móvil –lo que es común encontrar en la literatura– Además, a fin de tener una mayor flexibilidad

en el control del manipulador móvil, este trabajo combina los comandos emitidos por el operador humano con el control autónomo ubicado en el sitio remoto del sistema de teleoperación bilateral. Por último, dos objetivos secundarios son resueltos mediante el control de la redundancia del manipulador móvil; 1) la evasión de obstáculos, y 2) el control de la configuración de brazo robótico. Los dos objetivos secundarios son alcanzados sin la intervención del operador humano.

Este trabajo está organizado de la siguiente manera. En la Sección 2 se describen los modelos cinemático y dinámico del manipulador móvil, que tienen como señales de control a las velocidades del robot. En la Sección 3 se presenta el esquema de teleoperación bilateral. Además, se desarrollan cada bloque de la arquitectura de teleoperación bilateral propuesta. Los resultados experimentales son presentados y discutidos en la Sección 4. Finalmente, las conclusiones y trabajos futuros se presentan en la Sección 5.

## 2. MODELOS DE MANIPULADOR MÓVIL

La configuración del manipulador móvil está definida por un vector  $\mathbf{q}$  de  $n$  coordenadas independientes, denominadas *coordenadas generalizadas del manipulador móvil*, donde  $\mathbf{q} = [q_1 \ q_2 \ \dots \ q_n]^T = [\mathbf{q}_p^T \ \mathbf{q}_a^T]^T$  donde  $\mathbf{q}_a$  representan las coordenadas generalizadas del brazo robótico,  $\mathbf{q}_p$  las coordenadas generalizadas de la plataforma móvil y  $n = n_p + n_a$  siendo  $n_a$  y  $n_p$  las dimensiones asociadas al brazo robótico y a la plataforma móvil, respectivamente. La configuración  $\mathbf{q}$  es un elemento del *espacio de configuración* del manipulador móvil; denotado por  $\mathcal{N}$ . La ubicación del extremo operativo del manipulador móvil está dada por un vector de  $m$  dimensiones  $\mathbf{h} = [h_1 \ h_2 \ \dots \ h_m]^T$ , donde las  $m$  coordenadas son denominadas *coordenadas operacionales del manipulador móvil*, las cuales definen la posición y orientación del extremo operativo en  $\mathcal{R}$ . El conjunto de todas las ubicaciones posibles del extremo operativo constituyen el espacio operacional del manipulador móvil, denotado por  $\mathcal{M}$ .

La ubicación del extremo operativo del manipulador móvil puede ser definido de diferentes forma de acuerdo a la tarea, es decir, se puede considerar únicamente la posición del extremo operativo o su vez tanto su posición y orientación.

### 2.1 Modelo Cinemático

El modelo cinemático del manipulador móvil determina la ubicación del extremo operativo  $\mathbf{h}$  como una función de la configuración del brazo robótico y de la localización de la plataforma móvil.

$$f : \mathcal{N}_a \times \mathcal{M}_p \rightarrow \mathcal{M}$$

$$(\mathbf{q}_a, \mathbf{q}_p) \mapsto \mathbf{h} = f(\mathbf{q}_a, \mathbf{q}_p)$$

donde  $\mathcal{N}_a$  representa el espacio de configuración del brazo robótico y  $\mathcal{M}_p$  el espacio operacional de la plataforma móvil.

El modelo cinemático instantáneo del manipulador móvil determina la velocidad del extremo operativo como una función de las derivadas tanto de la configuración del brazo robótico y de la localización de la plataforma móvil,

$$\dot{\mathbf{h}}(t) = \frac{\partial f}{\partial \mathbf{q}}(q_a, q_p) \mathbf{v}(t)$$

donde,  $\dot{\mathbf{h}}(t) = [\dot{h}_1 \ \dot{h}_2 \ \dots \ \dot{h}_m]^T$  es el vector de velocidad del extremo operativo,  $\mathbf{v}(t) = [v_1 \ v_2 \ \dots \ v_{\delta_n}]^T = [v_p^T \ v_a^T]^T$  es el vector de velocidades del manipulador móvil. Además, la dimensión de  $\mathbf{v}(t)$  es  $\delta_n = \delta_{np} + \delta_{na}$ , donde  $\delta_{np}$  y  $\delta_{na}$  representan las dimensiones del vector de velocidad del brazo robótico y de la plataforma móvil, respectivamente. Ahora,

reemplazando  $\mathbf{J}(\mathbf{q}) = \frac{\partial f}{\partial \mathbf{q}}(q_a, q_p)$  en la ecuación anterior, se tiene

$$\dot{\mathbf{h}}(t) = \mathbf{J}(\mathbf{q}) \mathbf{v}(t) \quad (1)$$

donde,  $\mathbf{J}(\mathbf{q})$  es la matriz Jacobiana matriz que define un mapeo lineal entre el vector de velocidades del manipulador móvil  $\mathbf{v}(t)$  y el vector de velocidades del extremo operativo  $\dot{\mathbf{h}}(t)$ .

## 2.2 Modelo Dinámico

El modelo matemático que representa la dinámica de un manipulador móvil puede ser obtenido de las ecuaciones dinámicas de Lagrange, que se basan en la diferencia entre la energía cinética y potencial de cada una de las articulaciones del robot (balance energético) [12], [13].

La mayoría de los robots disponibles en el mercado tienen controladores PID de bajo nivel, a fin de seguir las entradas de referencia de velocidad, por lo que no permite el control de los voltajes de los motores directamente. Por lo tanto, es útil expresar el modelo dinámico del manipulador móvil de una forma más adecuada, tomando las velocidades de rotación y longitudinales como las señales de entrada. Para ello, los controladores de velocidad se incluyen en el modelo. Por lo tanto, el modelo dinámico del manipulador móvil teniendo como señales de entrada las velocidades de referencia del robot, puede ser representado como:

$$\bar{\mathbf{M}}(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{v}} + \bar{\mathbf{C}}(\mathbf{q}, \mathbf{v}) \mathbf{v} + \bar{\mathbf{G}}(\mathbf{q}) + \bar{\mathbf{d}} = \mathbf{v}_{\text{ref}} \quad (2)$$

donde,  $\bar{\mathbf{M}}(\mathbf{q}) = \mathbf{H}^{-1}(\mathbf{M} + \mathbf{D})$ ,  $\bar{\mathbf{C}}(\mathbf{q}, \mathbf{v}) = \mathbf{H}^{-1}(\mathbf{C} + \mathbf{P})$ ,  $\bar{\mathbf{G}}(\mathbf{q}) = \mathbf{H}^{-1} \mathbf{G}(\mathbf{q})$ ,  $\bar{\mathbf{d}} = \mathbf{H}^{-1} \mathbf{d}$  y  $\mathbf{v}_{\text{ref}} = [v_{1\text{ref}} \ v_{2\text{ref}} \ \dots \ v_{\delta_n\text{ref}}]^T$ .  $\mathbf{M} \in \mathfrak{R}^{\delta_n \times \delta_n}$  representa la inercia del manipulador móvil,  $\mathbf{C} \in \mathfrak{R}^{\delta_n \times \delta_n}$  representa las componentes de las fuerzas centrípetas y de Coriolis,  $\mathbf{G} \in \mathfrak{R}^{\delta_n}$  es el vector gravitacional,  $\bar{\mathbf{d}} \in \mathfrak{R}^{\delta_n}$  denota las perturbaciones desconocidas incluyendo los errores en el modelo,  $\bar{\mathbf{M}}(\mathbf{q}) \in \mathfrak{R}^{\delta_n \times \delta_n}$  es una matriz

definida positiva,  $\bar{\mathbf{C}}(\mathbf{q}, \mathbf{v}) \in \mathfrak{R}^{\delta_n}$ ,  $\bar{\mathbf{G}}(\mathbf{q}) \in \mathfrak{R}^{\delta_n}$ ,  $\bar{\mathbf{d}} \in \mathfrak{R}^{\delta_n}$ , y  $\mathbf{v}_{\text{ref}} \in \mathfrak{R}^{\delta_n}$  es el vector que contiene las señales de velocidades de control,  $\mathbf{H} \in \mathfrak{R}^{\delta_n \times \delta_n}$ ,  $\mathbf{D} \in \mathfrak{R}^{\delta_n \times \delta_n}$  y  $\mathbf{P} \in \mathfrak{R}^{\delta_n \times \delta_n}$  son matrices constantes, definidas positivas que contienen: los parámetros físicos del manipulador móvil, los parámetros de los motores, los controladores de bajo nivel de velocidad tanto de la plataforma móvil y del brazo robótico.

*Propiedad 1.* La matriz  $\bar{\mathbf{M}}$  es definida positiva, además se conoce que,

$$\|\bar{\mathbf{M}}(\mathbf{q})\| < k_M$$

*Propiedad 2.* Se verifica la siguiente inecuación,

$$\|\bar{\mathbf{C}}(\mathbf{q}, \mathbf{v})\| < k_c \|\mathbf{v}\|$$

*Propiedad 3.* La matriz  $\bar{\mathbf{G}}$  es acotada

$$\|\bar{\mathbf{G}}(\mathbf{q})\| < k_G$$

donde,  $k_c$ ,  $k_M$  y  $k_G$  denotan algunas constantes positivas.

Más detalles del modelo pueden consultarse en [8].

El modelo matemático completo del movimiento del robot manipulador móvil, está representado por las expresiones: (1) modelo cinemático y (2) modelo dinámico teniendo como señales de control a las velocidades de referencia del robot.

## 3. ESQUEMA DE TELEOPERACIÓN BILATERAL

En la presente sección se describe el esquema de control propuesto para la teleoperación bilateral de manipuladores móviles en ambientes parcialmente estructurados. Este esquema incorpora controladores en el sitio remoto para disminuir los efectos producidos por el retardo tanto en el envío de los comandos de control como en la realimentación de los estados y fuerza.

La arquitectura de teleoperación propuesta se centra especialmente en el lado remoto. Se plantea una combinación de técnicas para el control de movimiento del manipulador móvil con el propósito de ayudar al operador humano, del sitio local, a controlar el robot; se considera que el robot debe trabajar en ambientes parcialmente estructurados.

El diseño del controlador autónomo se basa en dos subsistemas en casadas:

- 1) Control cinemático se encarga de generar las velocidades deseada para el desplazamiento de la plataforma móvil y del brazo robótico. Además, realiza el control de redundancia del manipulador móvil para cumplir dos objetivos secundarios; el control de la configuración deseada del brazo robótico y la evasión de obstáculos por medio de la plataforma móvil.
- 2) Compensación dinámica, el objetivo principal del controlador de compensación de dinámica es compensar la dinámica del robot manipulador móvil para reducir el error de seguimiento de velocidad. Este controlador recibe como entradas las velocidades deseadas calculas por el control cinemático y genera velocidades de referencia para el manipulador móvil.

La implementación de los controladores en el lado remoto es, primero, disminuir el efecto del retardo, garantizar un



movimiento continuo y libre de colisión, y realizar un control de la configuración del brazo robótico para, mantener un comportamiento estable del sistema teleoperador. La Fig. 2 muestra el diagrama de bloques de la arquitectura propuesta. A continuación se describe en detalle cada bloque

de la arquitectura de tele-operación bilateral propuesta. Cabe aclarar, que el orden de la descripción de los bloques se realizó de forma que facilite la comprensión del lector

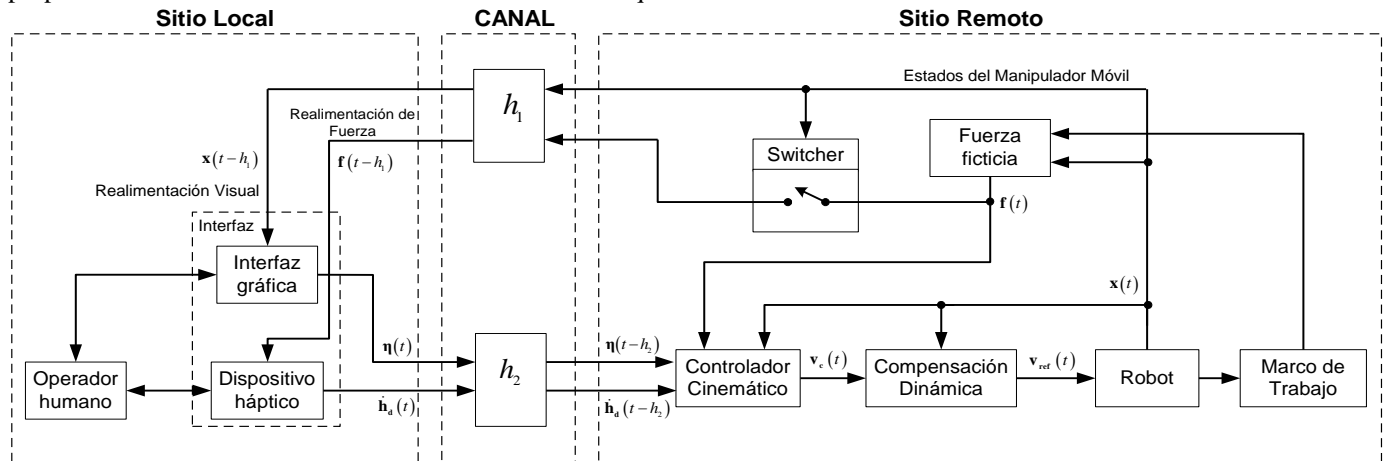


Figura 2. Esquema de control propuesto para teleoperación bilateral de manipuladores móviles

b) Robots móviles

### A. Operador Humano

El operador humano es uno de los elementos más importantes en un sistema de teleoperación. Este dirige el comportamiento de todo el sistema de acuerdo a la tarea que quiere realizar. Si bien algunos autores han tratado de aproximar modelos del operador humano para cerrar el lazo de control [14], estos modelos se limitan a la reacción física del humano ante estímulos externos. Desafortunadamente, la complejidad en el procesamiento de la información en el cerebro humano y las complejas reglas de toma de decisión y comportamiento, así como el complicado proceso de raciocinio, hacen casi imposible la obtención de un modelo confiable, que permita cerrar el lazo correctamente. Por estas razones, se considera normalmente al operador como un elemento supervisor del sistema de teleoperación y se representa como una caja negra dentro del diagrama de bloques.

### B. Interfaz

La interfaz es el conjunto de dispositivos que permiten la interacción del operador humano con el sistema de teleoperación. Las interfaces hoy en día cobran un papel muy

importante en el campo de la teleoperación, debido a que la interfaz es el contacto indirecto del hombre con los robots (máquinas); ya que las interfaces dan toda la información necesaria para que el operador sienta el máximo de telepresencia en el sitio remoto, se utiliza dispositivos hápticos con realimentación de fuerza y torque, dispositivos de realidad virtual, como guantes, lentes, trackers, y todo lo que pueda servir para que exista el grado máximo de telepresencia, ver Fig. 3.

La Fig. 4 ilustra una concepción del supervisor, desde el punto de vista de conversión de señales. Aquí se muestra explícitamente la conversión de la información del sitio remoto en información visual o táctil, la cual genera estímulos sensoriales que el operador interpreta y analiza para tomar una decisión, un usuario capaz de tocar, sentir, manipular, crear, y cambiar objetos tridimensionales simulados dentro de un ambiente virtual. Un dispositivo háptico es el que implica el contacto físico entre la computadora y el usuario, por lo general mediante un dispositivo de entrada / salida, como una palanca de mando o guantes, que permiten transmitir los movimientos del cuerpo. En este trabajo la interfaz para el operador está conformada por una interfaz gráfica y un dispositivo háptico. La interfaz gráfica interactúa con el operador ya que muestra la información visual acerca del entorno con el fin de mejorar la sensación de presencia, y recibe la información de la configuración deseada para el brazo robótico  $\eta = [\dot{\theta}_{d1} \ \dot{\theta}_{d2} \ \dots \ \dot{\theta}_{dna}]^T$ . De igual forma, el dispositivo háptico interactúa de forma directa con el operador ya que realimenta la fuerza enviada por el sitio remoto y recibe los comandos de velocidad deseada del extremo operativo del manipulador  $\dot{\mathbf{h}}_a = [\dot{x}_{dee} \ \dot{y}_{dee} \ \dot{z}_{dee}]^T$ . La Fig. 5 muestra el dispositivo háptico *Falcon-Novint* utilizado en este trabajo.

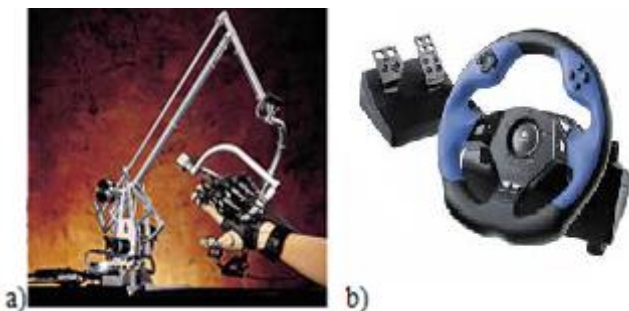


Figura 3. Dispositivos hápticos para: a) Robot manipuladores.

Este dispositivo posee tres grados de libertad en los ejes X-Y-Z, y además tiene realimentación de fuerza en sus tres ejes.

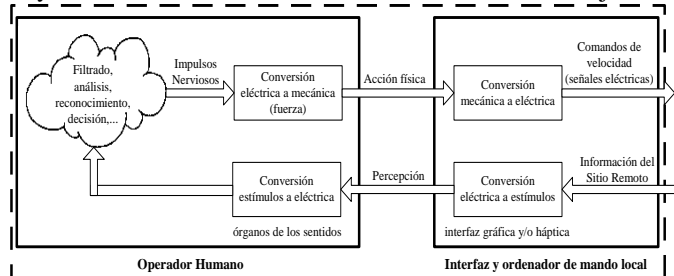


Figura 4. Concepción del supervisor en términos de conversión de señales.

### C. Canal

El canal de comunicación es un medio utilizado para transportar la información desde el emisor hasta el receptor con un conjunto de dispositivos que modulan, y adaptan el conjunto de señales que se transmiten entre el sitio local y el remoto. Es decir, que estarán vinculados por un canal de comunicación, a través del cual, fluye información bidireccional, cerrando el lazo de control, como lo ilustra la Fig. 2, donde  $h_1(t)$  representa el retardo de tiempo que existe debido a la transmisión de datos desde el sitio remoto hacia el sitio local del sistema de tele-operación, y  $h_2(t)$  es el retardo de tiempo que existe debido a la transmisión de datos desde el sitio local al sitio remoto. En este trabajo el canal de comunicación es una red LAN usando el protocolo UDP/IP, en este caso los retardos existentes  $h_1(t)$  y  $h_2(t)$  son muy pequeños por lo son despreciados.

### D. Robot

Se considera un robot manipulador móvil no holonómico como se muestra en la Figura. 6. El manipulador móvil está compuesto por el robot móvil PIONEER 3AT, un sensor láser montado sobre el robot móvil, un brazo robótico CYTON Alpha 7DOF y un sensor visual CMOS JK-805 ubicada en el extremo operativo del brazo robótico. Según la configuración de las ruedas del robot podremos obtener distintas ecuaciones cinemáticas, pero en todos los casos la restricción o restricciones no holonómicas tienen el mismo carácter: el movimiento de cada rueda del robot solo puede hacerse en la dirección perpendicular al eje de giro de la misma en cada instante. Para ilustrar este caso, consideremos un disco plano que rueda sobre una superficie



Figura 6. Sistema Experimental, manipulador móvil

### E. Fuerza Ficticia

Se propone un método para calcular la fuerza de repulsión ficticia existente entre robot-obstáculo, como se muestra en la Fig. 7. La magnitud de la fuerza ficticia generada por un obstáculo se puede definir como:

$$F = k_f (r - d) (\pi/2 - |\alpha|) \quad (3)$$

donde,  $\alpha$  es el ángulo con el cual la plataforma móvil incide al obstáculo,  $d$  distancia entre el robot y el obstáculo,  $r$  es el radio que determina la distancia a la cual se comienza a evitar el obstáculo, y  $k_f$  es una ganancia positiva de ajuste.

La magnitud de la fuerza calculada de esta manera se encuentra confinada al intervalo  $[0, 1]$ , de manera que su valor es escalado por la constante de ajuste  $k_f$ . Por otro lado, el ángulo de la fuerza ficticia  $\alpha$  está definido entre  $[-\pi/2, \pi/2]$ .

La fuerza tangencial y la fuerza normal son calculadas como  $f_T = f \cos(\alpha)$  y  $f_N = f \sin(\alpha)$ , respectivamente. La componente tangencial tiene la misma dirección que el movimiento del robot y la componente normal es perpendicular a la misma.

### F. Controlador Cinemático

El diseño del controlador cinemático se basan en el modelo cineámico del robot manipulador móvil (1)

$$\dot{\mathbf{h}} = \mathbf{J}\mathbf{v} \quad (3)$$

donde  $\mathbf{v}$  puede ser expresado en términos de  $\dot{\mathbf{h}}$  usando la pseudo-inversa de la matriz Jacobiana  $\mathbf{J}$

$$\mathbf{v} = \mathbf{J}^\# \dot{\mathbf{h}}$$

donde  $\mathbf{J}^\# = \mathbf{W}^{-1} \mathbf{J}^T (\mathbf{J} \mathbf{W}^{-1} \mathbf{J}^T)^{-1}$  siendo  $\mathbf{W}$  una matriz simétrica definida positiva, que pesa las acciones de control del sistema. O sea,

$$\mathbf{v} = \mathbf{W}^{-1} \mathbf{J}^T (\mathbf{J} \mathbf{W}^{-1} \mathbf{J}^T)^{-1} \dot{\mathbf{h}}$$

Se propone la siguiente ley de control que se basa en una solución de mínima norma; es decir que en cada instante el manipulador móvil cumplirá sus objetivos de navegación con el menor número de movimientos posibles.

$$\mathbf{v}_c = \mathbf{J}^\# \left( \dot{\mathbf{h}}_d + \mathbf{L}_K \tanh(\mathbf{L}_K^{-1} \mathbf{K} \tilde{\mathbf{h}}) \right) + (\mathbf{I} - \mathbf{J}^\# \mathbf{J}) \mathbf{L}_D \tanh(\mathbf{L}_D^{-1} \mathbf{D} \Lambda) \quad (4)$$

donde,  $\dot{\mathbf{h}}_d = [\dot{x}_{dee} \quad \dot{y}_{dee} \quad \dot{z}_{dee}]^T$  es el vector de velocidades deseadas en el extremo operativo  $\mathbf{h}$ ,  $\tilde{\mathbf{h}} = [\tilde{x}_{ee} \quad \tilde{y}_{ee} \quad \tilde{z}_{ee}]^T$  es el vector de errores de control definido como:  $\tilde{x}_{ee} = x_{dee} - x_{ee}$ ,  $\tilde{y}_{ee} = y_{dee} - y_{ee}$ ,  $\tilde{z}_{ee} = z_{dee} - z_{ee}$ ,  $\mathbf{K}$ ,  $\mathbf{D}$ ,  $\mathbf{L}_K$  y  $\mathbf{L}_D$  son matrices diagonales definidas positivas que pesan los errores de  $\tilde{\mathbf{h}}$  y del vector  $\Lambda$ .

El segundo término de (4) representa la proyección sobre el espacio nulo de la matriz Jacobiana, donde  $\Lambda$  es un vector arbitrario que contiene las velocidades asociadas al manipulador móvil. Por lo que cualquier valor que tome  $\Lambda$  tendrá efectos únicamente en la estructura interna del manipulador móvil sin afectar en absoluto el control final sobre el extremo operativo  $\mathbf{h}$ . Mediante este término se

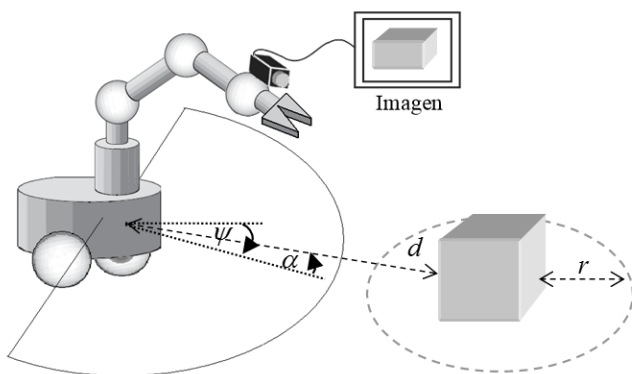


Figura 7. Esquema de evasión de obstáculos

puede cumplir con otros objetivos paralelamente, que en este trabajo serán: control de la configuración del brazo robótico y la evasión de obstáculos.

Para evitar la saturación de las velocidades del sistema manipulador móvil, se introduce la función  $\tanh(\cdot)$  que limita el error de  $\tilde{\mathbf{h}}$  y del vector  $\Lambda$ , donde,  $\tanh(\mathbf{L}_K^{-1} \mathbf{K} \tilde{\mathbf{h}})$  y  $\tanh(\mathbf{L}_D^{-1} \mathbf{D} \Lambda)$  denota una operación componente a componente.

**Resolución de la redundancia del espacio nulo:** En este trabajo, además, del objetivo principal que es la teleoperación bilateral para el monitoreo y navegación del manipulador móvil, se plantean dos objetivos secundarios. Uno de ellos es la evasión de obstáculos, para lo que se considera que el obstáculo no interfiere con el espacio de trabajo del brazo robótico, de modo que éste pueda seguir la trayectoria deseada por el operador incluso cuando la base móvil está evitando el obstáculo. El segundo objetivo secundario es el control de la configuración deseada del brazo robótico a lo largo de la ejecución de la tarea.

**Evasión de obstáculos:** se propone un método en el cual la velocidad angular y la velocidad lineal de la plataforma móvil se verán afectadas por las fuerzas normal y tangencial de la fuerza de repulsión ficticia, respectivamente. Por lo que,  $\omega_{obs} = k_{obs} f_N$  y  $u_{obs} = k_{uobs} f_T$  (5) donde  $k_{obs}$  y  $k_{uobs}$  son ganancias positivas de ajustes.

Considerando la evasión de obstáculos (5) y un controlador PD para la configuración deseada del brazo robótico, el vector  $\Lambda$  queda definido de la siguiente manera,

$$\Lambda = [-u_{obs} \quad \omega_{obs} \quad \theta_{d1} - \theta_1 \quad \theta_{d2} - \theta_2 \quad \dots \quad \theta_{dna} - \theta_{na}]^T$$

donde,  $\theta_{id} - \theta_i$  ( $i = 1, 2, \dots, na$ ) representa el error de configuración interna del brazo robótico, por lo que al minimizar este índice se están llevando las articulaciones a los valores de  $\theta_{id}$  deseados.

El error del control  $\tilde{\mathbf{h}}$  se analiza asumiendo –por el momento– seguimiento perfecto de velocidad  $\mathbf{v} \equiv \mathbf{v}_c$ ,  $\mathbf{v}_c = [u_c \quad \omega_c \quad \dot{\theta}_{1c} \quad \dot{\theta}_{2c} \quad \dots \quad \dot{\theta}_{nac}]^T$ . Ahora, remplazando (4) en (3), se tiene

$$\dot{\tilde{\mathbf{h}}} + \mathbf{L}_K \tanh(\mathbf{L}_K^{-1} \mathbf{K} \tilde{\mathbf{h}}) = \mathbf{0} \quad (6)$$

para el análisis de estabilidad se considera la siguiente función candidata de Lyapunov

$$V(\tilde{\mathbf{h}}) = \frac{1}{2} \tilde{\mathbf{h}}^T \tilde{\mathbf{h}}$$

donde su derivada temporal en las trayectorias del sistema es,  $\dot{V}(\tilde{\mathbf{h}}) = -\tilde{\mathbf{h}}^T \mathbf{L}_K \tanh(\mathbf{L}_K^{-1} \mathbf{K} \tilde{\mathbf{h}}) < 0$

lo que implica que el equilibrio del sistema de lazo cerrado (6) es asintóticamente estable por lo que el error de posición del extremo operativo  $\tilde{\mathbf{h}}(t) \rightarrow \mathbf{0}$  asintóticamente con  $t \rightarrow \infty$ . perpendicular a la misma.

### G. Compensación Dinámica

Si no existe seguimiento perfecto de velocidad, el error de velocidad es,

$$\tilde{\mathbf{v}} = \mathbf{v}_c - \mathbf{v} \quad (7)$$

por lo que se propone realizar un controlador de compensación dinámica basado en la dinámica inversa, para lo cual se considera que se conoce el modelo exacto del manipulador móvil. Se propone la siguiente ley de control

$$\mathbf{v}_{ref} = \bar{\mathbf{M}}(\mathbf{q}) \boldsymbol{\sigma} + \bar{\mathbf{C}}(\mathbf{q}, \mathbf{v}) \mathbf{v} + \bar{\mathbf{G}}(\mathbf{q}) \quad (8)$$

donde,  $\mathbf{v}_{ref} = [u_{ref} \quad \omega_{ref} \quad \dot{\theta}_{1ref} \quad \dot{\theta}_{2ref} \quad \dots \quad \dot{\theta}_{naref}]^T$  y

$$\boldsymbol{\sigma} = \dot{\mathbf{v}}_c + \mathbf{L}_v \tanh(\mathbf{L}_v^{-1} \mathbf{K}_v \tilde{\mathbf{v}})$$

Ahora, remplazando (8) en (2) se tiene

$$\mathbf{0} = \dot{\tilde{\mathbf{v}}} + \mathbf{L}_v \tanh(\mathbf{L}_v^{-1} \mathbf{K}_v \tilde{\mathbf{v}}) \quad (9)$$

de forma similar que en (6), se puede concluir que el vector de error  $\tilde{\mathbf{v}}(t) \rightarrow \mathbf{0}$  asintóticamente, siempre que  $\mathbf{K}_v$  y  $\mathbf{L}_v$  sean matrices simétricas definidas positivas.

### H. Switcher

El Modo Switcher es el encargado de habilitar o deshabilitar la realimentación de la fuerza ficticia, robot-obstáculo, hacia el sitio local. La conmutación de la realimentación de la fuerza ficticia se considera en función de la posibilidad de que el manipulador móvil pueda evadir un obstáculo de forma autónoma sin la necesidad de que el operador humano intervenga. La conmutación se lo realiza considerando una

cota mínima de la medida de manipulabilidad del manipulador móvil.

**Manipulabilidad.**- es la capacidad de mover de forma arbitraria el extremo operativo del manipulador móvil en cualquier dirección. Se determina a  $w = \sqrt{\det(\mathbf{J}(\mathbf{q})\mathbf{J}^T(\mathbf{q}))}$  como la medida de la manipulabilidad [14], [15].

#### 4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

A continuación, se muestra los resultados obtenidos aplicando el sistema desarrollado para teleoperación bilateral de un robot manipulador móvil. La experiencia de teleoperación fue realizada vía una red LAN inalámbrica. Los dispositivos utilizados para las pruebas experimentales son los que se detallan en la Sección III. Destacando que sólo se utilizó tres grados de libertad del brazo robótico en la experimentación. La experiencia realizada consistió en el monitoreo de un ambiente parcialmente estructurado donde se colocó obstáculos fijos para que sean evitados por el manipulador móvil.

La Fig.7, muestra los comandos de velocidad en los ejes X-Y-Z del operador humano desde el sitio local y las velocidades reales del extremo operativo del manipulador móvil. Se puede observar el buen desempeño del sistema de control propuesto. La Fig. 8 muestra las acciones de control para el robot móvil: velocidad lineal y velocidad angular; mientras que los comando de velocidad para el brazo robótico se muestran en la Fig. 9.

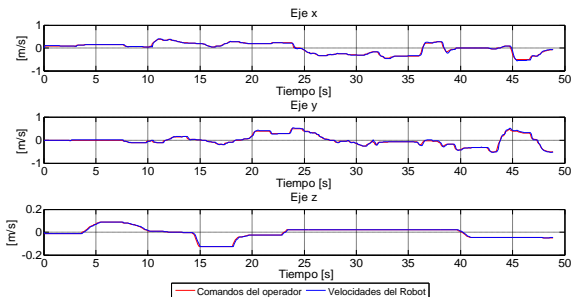


Fig. 7. Velocidades del extremo operativo del Manipulador Móvil

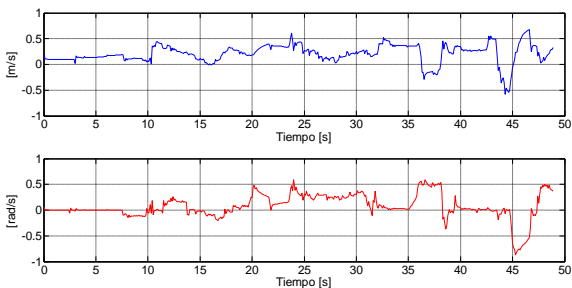


Figura. 8. Comandos de velocidad del robot móvil

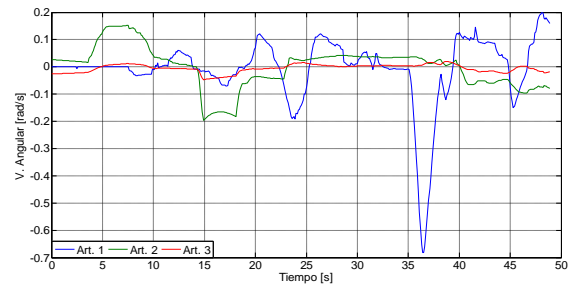


Figura. 9. Comandos de velocidad del brazo robótico

#### 5. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó el diseño y desarrollo de un sistema de teleoperación bilateral para manipuladores móviles a través de una red LAN inalámbrica. La estructura de control presentada consta de dos subsistemas en cascada ubicados en el sitio remoto; 1) un controlador cinemático de mínima norma para el control de movimiento del manipulador móvil, y 2) un compensador de dinámica para disminuir los errores de seguimiento de velocidad. Los objetivos secundarios como: la evasión de obstáculos y el control de la configuración del brazo robótico son alcanzados por medio del control de redundancia del manipulador móvil. La estabilidad y el desempeño del sistema se han demostrado analíticamente. Los resultados, que fueron obtenidos mediante la experimentación, muestran el buen desempeño del sistema de teleoperación bilateral propuesto. Las líneas de investigación en el tema presentado estarán dirigidas a la compensación del retardo para control de manipuladores móviles mediante Internet.

#### REFERENCIAS

- [1] Emanuel Slawiński, Francisco Postigo y Vicente Mut, "Experiencia en Teleoperación Bilateral de Robot" Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial, Vol. 3, Núm 1, Enero 2010, pp. 29-38
- [2] Patricio Burbano, Andres Rosales, Nelson Parra, "Design and Automatic System Control Implementation for an Imitator Robot in a Humanoid Platform through Image and Video Acquiring and Processing", Revista Politécnica, Vol. 32, Núm 2, Julio 2013, pp. 87 - 95
- [3] S. H. Jeong and S. Jung, "Bilateral Teleoperation Control of a Quadrotor System with a Haptic Device: Experimental Studies", IEEE International Conference on Robotics & Automation (ICRA), pp. 543 - 548, (2014).
- [4] Spyros V. Velanas, and Costas S. Tzafestas, "Human Telehaptic Perception of Stiffness using an Adaptive Impedance Reflection Bilateral Teleoperation Control Scheme", 19th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication, pp. 21 - 26 (2010)
- [5] Zahra Boroujeni, Mostafa Mohammadi, Aliakbar Jalali, "Stable Adaptive Time-Variable Delayed Bilateral Teleoperation for a Surgery Robot", Proceeding of the 2013 RSI/ISM International Conference on Robotics and Mechatronics, pp. 13-15,(2013)

- 
- [6] Bi-qiang Yao, Guang Wen, “Research on the Tele-Operation Robot System with TelePresence”, Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, pp. 2308 – 2311 (2011)
- [7] Yasunori Kawai, Toru Namerikawa and Masayuki Fujita, “Bilateral Teleoperation of Wheeled Mobile Robot with Time Delay using Virtual Image Robot”, 2010 IEEE International Conference on Control Applications Part of 2010 IEEE Multi-Conference on Systems and Control, pp. 77 – 82
- [8] X. Li and C. C. Cheah, “Dynamic Region Control for Robot-Assisted Cell Manipulation Using Optical Tweezers”, 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1057 – 1062 (2012)
- [9] Sebastian Erhart, Dominik Sieber and Sandra Hirche, “An impedance-based control architecture for multi-robot cooperative dual-arm mobile manipulation”, 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp. 315 – 322 (2013)
- [10] Adrian Burlacu, Cosmin Copot, Enric Cervera and Comeliu Lazar, “Real-Time Visual Predictive Control of Manipulation Systems”, The 15th International Conference on Advanced Robotics, pp. 383 – 388 (2011)
- [11] H. SAAFI, M. A. LARIBI, S. ZEGHLOUL, M. Y. Ibrahim, “Development of a Spherical Parallel Manipulator as a Haptic Device for a Tele-operation System: Application to Robotic Surgery”, Industrial Electronics Society, IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE, pp. 4097 – 4102 (2013)
- [12] YiAn Lei, ZhongYi Chu, ShanYong Ren, Dan li, “Dynamic Modeling and Robust Adaptive Control of a Deployable Manipulator”, 2012 12th International Conference on Control, Automation, Robotics & Vision, pp. 512 – 517
- [13] N. Kammerer, and P. Garrec, “Dry friction modeling in dynamic identification for robot manipulators: theory and experiments”, Mechatronics (ICM), 2013 IEEE International Conference, pp. 422 – 429 (2013)
- [14] Sandra Hirche, Senior Member IEEE, and Martin Buss, “Human-Oriented Control for Haptic Teleoperation”, Proceedings of the IEEE, pp. 623 – 647 (2012).

# FDI Robusta Para Sistemas LPV Mediante PIO

Ríos A.\*

\*Universidad de Los Andes, Facultad de Ingeniería, Mérida, Venezuela

e-mail: ilich@ula.ve

**Resumen:** Considerando los sistemas lineales invariantes en el tiempo (LTI) continuos con incertidumbres politópicas, esta contribución presenta un método para la síntesis de filtros robustos de detección y diagnóstico de fallas. Tomando ventaja de los reconstructores de entradas desconocidas, los filtros se diseñan como observadores proporcional-integral (PIO), considerando y resolviendo un problema de control por realimentación estática de la salida (SOF), donde la ganancia de realimentación corresponde a las matrices de diseño del PIO. El método está basado en condiciones de desempeño modificadas, establecidas a partir de las normas  $\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty$ , las cuales se describen como desigualdades matriciales lineales, LMIs. La generación de los residuos, producto de los filtros robustos, se obtiene aplicando esas condiciones modificadas sobre los sistemas con perturbación desconocidas y sujetos a incertidumbres paramétricas. Los parámetros inciertos se suponen que pertenecen a un politopo. Las condiciones de desempeño  $\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty$  extendidas se obtienen por medio del lema de proyección. El diagnóstico de las fallas se alcanza en primer lugar, estableciendo condiciones, extendidas también, de detectabilidad y separabilidad. En segundo lugar, si esas condiciones se satisfacen, diseñando un banco de filtros, es decir, por multifiltraje, basado en PIOs. Para cada falla objeto de separación, se diseña un filtro. Para ilustrar los resultados y el desempeño del multifiltraje, se presenta además, un ejemplo numérico.

**Palabras claves:** Diagnóstico de Fallas, Control Robusto, Normas  $\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty$ , Desigualdades Matriciales Lineales (LMI), Observadores Proporcional-Integral (PIO).

**Abstract:** This paper presents a novel approach for robust fault detection and isolation (FDI), based on modified  $\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty$  performance conditions, which are described as LMIs. The FDI filters are designed as Proportional-Integral Observers (PIO), by considering and solution of Static Feedback Output (SOF) control problem, where the feedback gain contains the matrices of the PIO. The generation of the residues, as consequence of the outputs of the robust filters, is obtained applying these conditions modified on linear systems with unknown disturbance and parametric uncertainties. The uncertainty parameters are supposed to belong to a polytope. The extended  $\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty$  conditions are obtained by means of the well known projection lemma. Fault diagnosis is obtained, first of all, establishing extended conditions of detectability and separability. Secondly, if these conditions are satisfied, designing a bank of filters based on PIO, which is known as multifiltering. For each fault separation object, a filter is designed. Performance of the proposed synthesis technique is illustrated by numerical example.

**Keywords:** Fault Diagnosis, Robust Control,  $\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty$  Norms, Linear Matrix Inequalities (LMI), Proportional-Integral Observers (PIO).

## 1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, los sistemas de detección y diagnóstico de fallas (FDI) han sido un campo de investigación muy activo. Este hecho es reforzado por la complejidad de los procesos industriales que demandan condicio-

nes de operación más seguras y confiables, tal como debe ser garantizada para cualquier proceso productivo. Fundamentalmente, un sistema de FDI se compone de tres elementos, tal como se muestra en la Figura 1: a) un mecanismo de generación de residuos, b) un componente para la evaluación de los residuos y, c) un mecanismo de toma de decisiones. De esos tres elementos, el más crítico es el sistema de generación de residuos, mismo que provee las bases para el diagnóstico y las tomas de decisiones correspondientes.

Una clasificación de generadores de residuos establece técnicas basadas en:

Artículo recibido el 13 de mayo, 2014; revisado el 22 de diciembre, 2014.

Este trabajo ha sido co-financiado por el CDCHTA de la Universidad de Los Andes, en el marco del Proyecto No. I-1302-12-02-B, por lo que se expresa un reconocimiento por el apoyo financiero.

Autor para correspondencia: Av. Alberto Carnevalli. Complejo Universitario La Hechicera. Mérida, 5101, Venezuela. e-mail: ilich@ula.ve

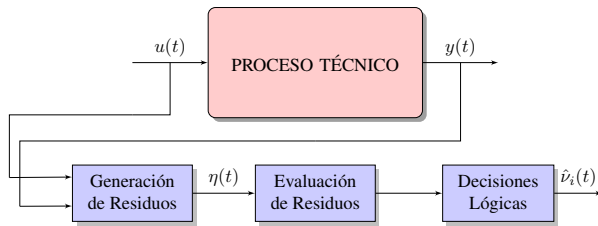


Figura 1. Diagrama de bloques de un sistema de FDI.

1. Redundancia física (RF)
2. Manejo de datos
3. Modelo matemático

La RF consiste en disponer de réplicas físicas de los componentes bajo estudio. En el manejo de datos e información de los procesos, fundamentalmente se disponen de mecanismos de manejo de datos y conocimiento: reconciliación de datos, métodos numéricos convencionales, aprendizajes de máquinas, modelos heurísticos, modelos cualitativos, entre otros.

En la metodología que utiliza un modelo matemático se han desarrollado dos direcciones: a) Métodos de estimación paramétrica; b) Método de Redundancia Analítica (RA).

La idea fundamental en el método de estimación paramétrica es que la condición operacional del sistema es repetidamente identificada en línea y los resultados son comparados con un modelo de referencial que se ha obtenido, inicialmente, bajo condiciones sin fallas.

La RA consiste en el uso de modelos para reproducir el comportamiento del componente o sistema bajo evaluación. En todos los casos, los residuos se generan por la diferencia entre señales del sistema real y las producidas por su contraparte redundante.

Cuando se emplean modelos para la generación de residuos se deben considerar aspectos importantes de los sistemas de producción:

- Ambientes industriales ruidosos (perturbaciones).
- Modelos aproximados (Incertidumbres).
- Diferentes escenarios de producción.
- Límites físicos de producción.

Esos aspectos conllevan a considerar que los filtros de detección deben ser capaces de responder satisfactoriamente bajo condiciones adversas debido a la realidad de los procesos productivos. Para el caso de la RA, se utiliza un modelo analítico, y cuando este modelo de diagnóstico toma en consideración las señales de perturbación y las

incertidumbres, entonces se trata de un problema de detección robusta de fallas (DRF).

Así, para la FDI basada en modelos es esencial la generación de residuales, para lo cual existe una rica variedad de técnicas, como el método de ecuaciones de paridad y los métodos basados en observadores de estados.

Una técnica muy popular para la generación de residuos consiste en diseñar observadores de Luenberger, que ha sido propuesta por [1, 2]. Esta técnica es muy útil en el marco de los sistemas LTI. Su principal inconveniente es el determinismo del modelo, el cual no maneja señales de perturbación e incertidumbres. Sin embargo, se pueden hacer algunas modificaciones al observador original de tal manera de establecer condiciones de desempeño robusto a ser satisfechas. Así, algunos métodos han sido presentados por [3], con el fin de sobrellevar el problema de robustez en la generación de los residuos, incluyendo técnicas temporales-frecuenciales [4].

Por el lado de los observadores proporcional-integral (PIO), en [5] se diseña un filtro de FDI para sistemas LTI como un PIO, dadas las ventajas de éste respecto a la estimación simultánea de estados y de entradas desconocidas. No se consideran las incertezas del modelo de diagnóstico. En [6] se aborda el diseño de un PIO, para sistemas LTI, de manera estimar falla de actuador (matriz de control) o falla en el sensor (matriz de salida), bajo la presencia de señales de perturbación.

Un estudio comparativo de las técnicas de FDI basados en observadores es presentado en [7]. Allí, se aborda el problema FDI a partir de observadores para sistemas LTI, con un énfasis en robustez respecto a la estimación de entradas desconocidas. Se analizan cinco estructuras del observador: observador de Luenberger, el observador de perturbación (DO), el observador de entrada desconocida (UIO), el PIO y el PIO de "aclaramiento". La robustez se define en conexión a la detección de la falla, no tomándose en cuenta incertidumbres del modelo de diagnóstico.

Por el lado de sistemas de diagnóstico con incertidumbres, una técnica de tolerancia a fallas para esta clase de sistemas es presentada en [8] y que se referencia como la detección de fallas en  $\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty$ . De igual manera, el problema es tratado en [9, 10], para los sistemas con incertidumbres politópicas. En todos estos casos no se definen condiciones características para la detectabilidad y la separabilidad de las fallas. Por el contrario, en [11] se presenta una revisión y solución formal solo para el caso de los sistemas lineales variantes en parámetros (LPV). Es importante destacar que las condiciones de detectabilidad de fallas se presentan como extensión de las condiciones geométricas para sistemas LTI descritas en [12], para una clase de sistemas LPV y quasi-LPV. El filtro de FDI se diseña como un observador de Luenberger. Los resultados son reforzados en [13], ya que se consideran modelos de diagnósticos con incertidumbres en la matriz

de estado y en la matriz de control. Estos resultados son extendidos en [14]

Por otro lado, el problema de DRF está muy relacionado al problema de filtraje robusto. En ambos casos, se utiliza una estimación de estados para producir las señales residuales. En este orden de ideas, en los años recientes mucha investigación se ha dedicado al filtraje robusto para sistemas politópicos, no así para la DRF, (ver [15] y sus referencias). Recientemente han sido presentados algunos resultados para la DRF en sistemas politópicos, [16]. En [17] se presenta un método de diseño de filtros basado en deconvolución, donde se trata solamente el problema de detección. A partir de múltiples observadores de Luenberger, en [18] se presenta un método de diagnóstico robusto de fallas basado en optimización convexa, utilizando una representación afín, mediante LMIs, para los sistemas politópicos. El diseño de los filtros de FDI preserva condiciones de desempeño en  $\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty$ , irrespectivamente de la incertidumbre en los parámetros del sistema. Estableciéndose, además, condiciones de detectabilidad y separabilidad de fallas en sistemas politópicos. Estos resultados son aplicados al caso de tiempo discreto en [19], y son complementarios a las técnicas de síntesis de filtros robustos presentados en [14, 18].

De manera de aprovechar las ventajas de los PIOs: simplicidad, robustez, estimación de entradas desconocidas, recuperación de la transferencia de lazo (LTR); en este trabajo se presenta el diseño de filtros múltiples de FDI para sistemas LPV, donde las incertidumbres, en todas las matrices del modelo de diagnóstico, se describen como politopos. El diseño de los filtros como PIOs se realiza por solución de un problema de control por realimentación estática de la salida, tal como se describe en [20]. El filtro de FDI, basado en PIO, permite el diagnóstico de las fallas por reconstrucción de las mismas, a través de su estimación como entradas desconocidas.

El resto de la contribución está organizado como se explica. En la Sección 2 se presentan resultados preliminares para el diseño de filtros (observadores), proporcionándose versiones extendidas de la caracterización de las normas  $\mathcal{H}_2$  y  $\mathcal{H}_\infty$  como LMIs. En la Sección 3 se presenta una solución al problema de síntesis de sistemas de diagnóstico de fallas, también como en la Sección 3.3 se describe el método de FDI multi-objetivo. Finalmente se presentan un ejemplo numérico y los comentarios concluyentes.

**Notación.**  $\mathbb{R}$  es el conjunto de números reales. Para una matriz  $A$ ,  $A^T$  denota su transpuesta.  $\text{tr}(A)$  define la traza de la matriz  $A$ .  $\mathcal{L}_2$  es el espacio de Hilbert de señales vectoriales definidas en  $(-\infty, \infty)$ , con producto escalar  $\langle x | y \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)^* y(\tau) d\tau$  y tal que  $\|x\|_2 \triangleq \langle x | x \rangle^{1/2} < \infty, \forall x \in \mathcal{L}_2$ . En las particiones de matrices simétricas  $\star$  denota cada uno de sus bloques simétricos.  $\mathbb{I}$  define la matriz identidad de dimensión apropiada.

## 2. PRELIMINARES

En esta sección se establecen algunos resultados preliminares a los fines de dar condiciones de desempeño adicionales en el análisis de los sistemas lineales a tiempo continuo (LTI). Considérese el sistema LTI Sea el sistema LTI

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + B\omega \\ y &= Cx + D\omega \end{aligned} \quad (1)$$

**Lema 1 (Desempeño  $\mathcal{H}_2$  relajado)** *Considérese el sistema (1) con  $D = 0$ . Para  $P = P^T > 0$ , las siguientes declaraciones son equivalentes*

$$i) A \text{ es estable y } \|C(s\mathbb{I} - A)^{-1}B\|_2^2 < \mu.$$

$$ii) \text{ Existen } P \text{ y } Z, \text{ tales que: } \text{tr}(Z) < 1 \text{ y}$$

$$\begin{bmatrix} A^T P + PA & PB \\ B^T P & -\mu\mathbb{I} \end{bmatrix} < 0, \quad \begin{bmatrix} P & C^T \\ C & Z \end{bmatrix} > 0, \quad (2)$$

$$iii) \text{ Existen } P, Z \text{ y } G \text{ tales que: } \text{tr}(Z) < 1 \text{ y}$$

$$\begin{bmatrix} -(G + G^T) & G^T A + P & G^T B & G^T \\ A^T G + P & -P & 0 & 0 \\ B^T G & 0 & -\mu\mathbb{I} & 0 \\ G & 0 & 0 & -P \end{bmatrix} < 0, \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} P & C^T \\ C & Z \end{bmatrix} > 0,$$

$$iv) \text{ Existen } P, Z \text{ y } G, \text{ tales que: } \text{tr}(Z) < 1 \text{ y}$$

$$\begin{bmatrix} -(G + G^T) & G^T A + P + G^T & G^T B \\ A^T G + P + G & -2P & 0 \\ B^T G & 0 & -\mu\mathbb{I} \end{bmatrix} < 0, \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} P & C^T \\ C & Z \end{bmatrix} > 0,$$

### Demostración

La equivalencia entre las tres primeras declaraciones han sido mostrada en el Teorema 3.3 de [21], que se basa en el lema de proyección y su recíproco. La equivalencia entre *ii)* y *iv)* es mostrada en [22].

Se sabe que cuando existen relaciones entre la matriz dinámica del sistema y la matriz de Lyapunov se obtienen resultados conservativos, tal como es el caso de sistemas con incertidumbres politópicas, [23]. Esta situación se solventa, en cierto grado, desacoplando ambas matrices. Además, la declaración *iv)* en el Lema 1 provee una representación mejorada de la condición de desempeño en  $\mathcal{H}_2$  presentada en [21].



De la misma forma que para el caso  $\mathcal{H}_2$ , existen algunos resultados para mejorar el desempeño en  $\mathcal{H}_\infty$ , tal como se muestra a continuación.

**Lema 2 (Desempeño  $\mathcal{H}_\infty$  Relajado)** *Considérese el sistema (1). Con  $P = P^T > 0$  y la matriz  $G$ , las siguientes declaraciones son equivalentes:*

i) *A es estable y  $\|C(s\mathbb{I} - A)^{-1}B + D\|_\infty < \gamma$ .*

ii) *Existe  $P$ , tal que*

$$\begin{bmatrix} A^T P + PA & PB & C^T \\ B^T P & -\gamma^2 \mathbb{I} & D^T \\ C & D & -\mathbb{I} \end{bmatrix} < 0. \quad (5)$$

iii) *Existen  $P$  y  $G$  tal que, para  $\tau \gg 1$*

$$\begin{bmatrix} -(G + G^T) & G^T A + P + \tau G^T & 0 & G^T B \\ A^T G + P + \tau G & -2\tau P & C^T & 0 \\ 0 & C & -\mathbb{I} & D \\ B^T G & 0 & D^T & -\gamma^2 \mathbb{I} \end{bmatrix} < 0. \quad (6)$$

### Demostración

Las condiciones i) y ii) representan el bien conocido *Lema Real Acotado*. La equivalencia entre ii) y iii) puede ser vista en [22].

A continuación, estos resultados son aplicados para establecer algunas para el diagnóstico de fallas que, adicionalmente, proporcionan un método de síntesis para los filtros de FDI.

### 3. FILTROS PARA EL DIAGNÓSTICO ROBUSTO DE FALLAS (RFDI)

El diagnóstico de fallas se inicia por un mecanismo de generación de residuos. La manera más común de generación de residuos usando modelos de diagnóstico es a través de un observador, mismo que produce, en general, un estimado de los estados del sistema. En el caso de presencia de fallas, estos estados estimados difieren de los reales por lo que la dinámica del error de estimación no tenderá asintóticamente a cero. Esta diferencia constituye el residuo debido a la falla. Todo lo anterior es cierto en el contexto de un conocimiento perfecto del sistema y de un escenario libre de perturbaciones. Cuando cualquier tipo de ruido o perturbación está presente dentro del sistema, es necesario considerar una cota o umbral para los residuos, a partir del cual se considera que una falla se ha producido. Sin embargo, esto es otro marco hipotético para los sistemas donde los parámetros cambian rápidamente o existen parámetros desconocidos. Esto constituye el problema de diagnóstico robusto de fallas que aún permanece abierto. Así, generando una extensión al

método de Luenberger clásico y considerando perturbaciones e incertidumbre politópicas, enseguida se presenta una mecanismo para el diagnóstico robusto de fallas. Considérese el siguiente sistema LPV

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A(\alpha)x(t) + B_1(\alpha)w(t) + B_2(\alpha)u(t) \\ y(t) &= C(\alpha)x(t), \end{aligned} \quad (7)$$

donde  $x(t) \in \mathbb{R}^n$  son los estados,  $w(t) \in \mathbb{R}^q$  son perturbaciones desconocidas,  $u(t) \in \mathbb{R}^m$  son los controles,  $y(t) \in \mathbb{R}^p$  son las salidas medidas, mismas que se van a comparar con las salidas estimadas desde un observador. Se considera que las matrices del sistema son inciertas y pertenecen a un conjunto politópico convexo tal que  $\forall \alpha_i \geq 0, \sum_{i=1}^N \alpha_i = 1$  es definido como

$$\Omega = \left\{ (A(\alpha), B_1(\alpha), B_2(\alpha), C(\alpha)) \mid (A(\alpha), B_1(\alpha), B_2(\alpha), C(\alpha)) = \sum_{i=1}^N \alpha_i (A^{(i)}, B_1^{(i)}, B_2^{(i)}, C^{(i)}) \right\}. \quad (8)$$

Para efectos del diagnóstico de fallas, se considera un modelo de anomalías como un término adicional a (7), esto es

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A(\alpha)x(t) + B_1(\alpha)w(t) + \\ & B_2(\alpha)u(t) + \sum_{k=1}^M L_k(\alpha)v_k(t) \\ y(t) &= C(\alpha)x(t), \end{aligned} \quad (9)$$

donde  $v_k(t) \in \mathbb{R}^{n_f}$  son los *modos de fallas* y son señales desconocidas, y  $L_k(\alpha)$  son las *direcciones de fallas*, las cuales pertenecen al politopo, esto es,  $\forall \alpha_i \geq 0, \sum_{i=1}^N \alpha_i = 1$ ,

$$\Omega = \left\{ (A(\alpha), B_1(\alpha), B_2(\alpha), C(\alpha), L_k(\alpha)) \mid (A(\alpha), B_1(\alpha), B_2(\alpha), C(\alpha), L_k(\alpha)) = \sum_{i=1}^N \alpha_i (A^{(i)}, B_1^{(i)}, B_2^{(i)}, C^{(i)}, L_k^{(i)}(\alpha)) \right\}. \quad (10)$$

para todo  $k = 1, 2, \dots, M$ . Tal como en [11], las direcciones de fallas inciertas imponen el diseño de generadores de residuos robustos, que a continuación se presenta como un PIO.

A partir del modelo de diagnóstico (9), un PIO generalizado para efectos de FDI es [20]:

$$\begin{aligned} \dot{\zeta}(t) &= F\zeta(t) + K_I \vartheta + K_P (y(t) - \tilde{y}(t)) + B_2(\alpha)u(t), \\ \dot{\vartheta}(t) &= G\vartheta + H (y(t) - \tilde{y}(t)) \\ \tilde{y}(t) &= J\zeta(t) \end{aligned} \quad (11)$$

donde las matrices  $F, G, H, J, K_P$  y  $K_I$ , de dimensiones apropiadas, se definen como las matrices del observador a ser determinadas, a condición de que

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \begin{pmatrix} e(t) \\ \vartheta(t) \end{pmatrix} = 0 \quad (12)$$

siendo  $e(t) = x(t) - \zeta(t)$  el error de la estimación de estados.

En el PIO,  $K_P$  y  $K_I$  son las ganancias proporcional-integral, la variable o señal  $\vartheta$  se relaciona con la integral "pesada" del error de estimación de la salida, y se puede usar para estimar entradas desconocidas. La matriz  $G$  representa el coeficiente de "aclaramiento" y tiene el efecto de regular la respuesta transitoria de este observador. La matriz  $H$  es un coeficiente de efecto integral también, se usa para mejorar el margen de estabilidad. Nótese que si  $G = 0$  se tiene un PIO clásico. Las matrices  $G$  y  $H$  se pueden escoger *a priori*.

De la dinámica del error se tiene

$$\begin{aligned} \dot{e} &= \dot{x} - \dot{\zeta} = (A(\alpha) - K_P C(\alpha))x - (F - K_P J)\zeta \\ &\quad - K_I \vartheta + B_1(\alpha)w(t) + \sum_{k=1}^M L_k(\alpha)v_k(t) \\ \dot{\vartheta} &= G\vartheta + H(C(\alpha)x - J\zeta) \end{aligned} \quad (13)$$

Por consiguiente, si  $F = A(\alpha)$  y  $J = C(\alpha)$ , entonces

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} \dot{e} \\ \dot{\vartheta} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} A(\alpha) - K_P C(\alpha) & -K_I \\ HC(\alpha) & G \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e \\ \vartheta \end{pmatrix} \\ &\quad + \begin{pmatrix} B_1(\alpha) \\ 0 \end{pmatrix} w + \begin{pmatrix} \sum_{k=1}^M L_k(\alpha) \\ 0 \end{pmatrix} v_k \\ &= \mathfrak{A}(\alpha) \begin{pmatrix} e \\ \vartheta \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} B_1(\alpha) \\ 0 \end{pmatrix} w \\ &\quad + \begin{pmatrix} \sum_{k=1}^M L_k(\alpha) \\ 0 \end{pmatrix} v_k \end{aligned} \quad (14)$$

Allí, la matriz  $\mathfrak{A}(\alpha)$  corresponde a

$$\mathfrak{A}(\alpha) = \begin{pmatrix} A(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -K_P & -K_I \\ H & G \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C(\alpha) & 0 \\ 0 & \mathbb{I}_p \end{pmatrix}. \quad (15)$$

donde  $\mathbb{I}_p$  es una matriz identidad de orden  $p$ . Se puede notar que, en ausencia de perturbaciones  $w(t)$  y de fallas  $v_k(t)$ , la condición (12) se satisface si la matriz  $\mathfrak{A}(\alpha)$  es cuadráticamente estable. Esto es lo que permitirá generar los residuos por comparación de la salida estimada  $\tilde{y}(t)$  respecto a la salida real  $y(t)$ , es decir  $r_y(t) = y(t) - \tilde{y}(t)$ . Así, bajo la consideración del problema de estabilización de la matriz  $\mathfrak{A}(\alpha)$ , entonces se deben seleccionar apropiadamente las matrices  $G, H, K_P$  y  $K_I$ . En ese sentido, sean

las matrices

$$\begin{aligned} \mathcal{A}_o(\alpha) &= \begin{pmatrix} A(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad \mathcal{B}_o = \begin{pmatrix} \mathbb{I}_n & 0 \\ 0 & \mathbb{I}_m \end{pmatrix}, \\ \mathcal{C}_o(\alpha) &= \begin{pmatrix} C(\alpha) & 0 \\ 0 & \mathbb{I}_q \end{pmatrix}; \end{aligned} \quad (16)$$

y la matriz

$$\mathbb{K} = \begin{pmatrix} -K_P & -K_I \\ H & G \end{pmatrix}. \quad (17)$$

Las matrices en (16) definen el sistema dinámico

$$\begin{aligned} \dot{z}(t) &= \mathcal{A}_o(\alpha)z(t) + \mathcal{B}_o v(t) \\ \eta(t) &= \mathcal{C}_o(\alpha)z(t) \end{aligned} \quad (18)$$

Se puede verificar que el par  $(\mathcal{A}_o(\alpha), \mathcal{B}_o)$  es controlable. Además, el sistema (18) cumple las condiciones para el diseño de una ganancia para el problema de SOF. Por consiguiente, la matriz  $\mathbb{K}$  corresponde a la ganancia de realimentación para el problema de control por SOF del sistema (18), [20].

**Lema 3** Sea el sistema (18). Dicho sistema admite un control por SOF de la forma  $v(t) = \mathbb{K}\eta(t)$  tal que, en lazo cerrado, la dinámica es asintóticamente estable.

#### Demostración

En efecto, si  $v(t) = \mathbb{K}\eta(t)$ , entonces la matriz dinámica de lazo cerrado es

$$\mathcal{A}_o(\alpha) + \mathcal{B}_o \mathbb{K} \mathcal{C}_o(\alpha) = \mathfrak{A}(\alpha)$$

Así, se distingue un problema de estabilización en lazo cerrado, tal como se presenta en los diferentes escenarios del control automático de sistemas dinámicos [24]. En consecuencia, la estabilización de la matriz  $\mathfrak{A}(\alpha)$  del PIO corresponde al diseño de la ganancia  $\mathbb{K}$  para el problema de estabilización por SOF del sistema (18). Esto tiene la ventaja de que el diseño se obtiene por solución directa de un problema de control estabilizante para sistemas LPV. El diseño de la ganancia  $\mathbb{K}$  se puede obtener por control LMI, según los resultados mostrados en [20]. La estabilización de la matriz  $\mathfrak{A}(\alpha)$  permite satisfacer la condición (12), lo cual conlleva a obtener los residuos. Bajo la condición (12), los residuos  $r_y(t)$  serán nulos en ausencia de perturbaciones y fallas, de manera que una primera evaluación es imponer un umbral que se define por la minimización de los efectos de las perturbaciones sobre  $r_y(t)$ . Esta minimización se puede realizar imponiendo características de desempeño óptimo-robusto sobre el diseño de la ganancia  $\mathbb{K}$  en consideración del efecto de  $w(t)$  en los residuos  $r_y(t)$ . La detección de la presencia de una falla se analiza cuando, para cualquier modo de falla  $v_k(t) \neq 0$ , los residuos  $r_y(t)$  superan el umbral, es decir

$$\mathfrak{N}(r_y(t)) < T_h \quad \text{si} \quad v_k(t) = 0, \quad (19)$$

$$\mathfrak{N}(r_y(t)) < T_h \quad \text{si} \quad v_k(t) \neq 0, \quad (20)$$

donde  $\mathfrak{N}(\cdot)$  es una función que cuantifica el “tamaño” de la señal residual  $r_y(t)$ , es decir, es una norma para dicha señal.  $T_h$  es el umbral. En este trabajo las normas que se emplean son  $\mathcal{H}_2 - \mathcal{H}_\infty$ , caracterizadas como LMIs.

### 3.1 Condiciones para RFDI

Para el caso de sistemas LTI con modelos ciertos son bien conocidas las condiciones para el diagnóstico de fallas [12]. Para los sistemas LTV esas condiciones son extendidas en [25]. En el caso de sistemas con incertidumbres politópicas los resultados en esas direcciones han sido los presentados en [11, 13], como generalizaciones de las condiciones geométricas dadas en [12], manteniendo certidumbre en la matriz de salida del modelo de diagnóstico.

A continuación se presentan condiciones de detectabilidad y separabilidad de fallas para sistemas inciertos, como extensiones de las condiciones de diagnóstico en sistemas lineales variantes en el tiempo (LVT) [25] y las mostradas en [11, 13].

Considérese el sistema

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A(\alpha)x(t) + B(\alpha)u(t) + \sum_{k=1}^M L_k v_k(t) \\ y(t) &= C(\alpha)x(t), \end{aligned} \quad (21)$$

donde las matrices inciertas pertenecen a un politopo tal que  $\forall \alpha_i \geq 0, \sum_{i=1}^N \alpha_i = 1$  es definido por

$$\begin{aligned} \Omega &= \left\{ (A(\alpha), B(\alpha), C(\alpha)) \mid (A(\alpha), B(\alpha), C(\alpha)) \right. \\ &= \left. \sum_{i=1}^N \alpha_i (A^{(i)}, B^{(i)}, C^{(i)}) \right\}. \end{aligned} \quad (22)$$

#### 3.1.1 Condición de Detectabilidad

**Definición 1** Sea  $\mathcal{C}$  denotando el  $\ker C(\alpha)$ ,  $\forall \alpha$ . Entonces un sub-espacio  $\mathcal{W}$  se dice un sub-espacio  $(\mathcal{C}(\alpha), \mathcal{A}(\alpha))$ -invariante asociado al sistema LPV (21), y que se denotará como  $(\mathcal{C}, \mathcal{A})$ -invariante, si cualquiera de las condiciones equivalente siguientes se cumplen:

1. Existe una transformación lineal  $G : \mathcal{P} \rightarrow \mathbb{R}^{n \times p}$  tal que para el sub-espacio  $\mathcal{W} \subset \mathbb{R}^n$  y para todo instante de tiempo  $\alpha \in \mathcal{P}$

$$(A(\alpha) + G(\alpha)C(\alpha))\mathcal{W} \subset \mathcal{W} \quad (23)$$

2. Para todo  $\alpha \in \mathcal{P}$

$$A(\alpha)(\mathcal{W} \cap \mathcal{C}) \subset \mathcal{W} \quad (24)$$

Esta definición de la  $(\mathcal{C}, \mathcal{A})$ -invarianza para sistemas LPV asegura la existencia de una ganancia  $G(\alpha)$  para un observador de estados. En el caso particular, y de acuerdo a la matriz  $\mathcal{A}(\alpha)$ , la ganancia  $G(\alpha)$  está asociada a  $K_P$ .

Para garantizar la detectabilidad de fallas, se debe cumplir que ninguna dirección de falla pueda ser proyectada al sub-espacio inobservable del sistema LPV. Se sabe que el sub-espacio inobservable del sistema (21) es [18]:

$$U_{os} := \bigcup_{i=1}^N \left[ \bigcap_{j=0}^{n-1} \ker(C^{(i)} A^{(i)j}) \right]. \quad (25)$$

En consecuencia, la condición de detectabilidad se establece como sigue:

**Teorema 2** Si  $W_{L_k}(\alpha) = \text{Im}(L_k(\alpha))$ , es el sub-espacio debido a la dirección de falla  $L_k$  para todo  $\alpha$ , entonces  $W_L = \bigcup_{k=1}^M \left[ \text{Im}(L_k(\alpha)) \right]$ , corresponde al sub-espacio mas grande generado por las direcciones de fallas. Por lo tanto, para el sistema (21), la  $k$ -ésima falla es detectable si

$$W_{L_k} \cap U_{os} = \{0\}, \quad k = 1, \dots, M. \quad (26)$$

#### Demostración

La prueba es una generalización de los resultados mostrados en [12, 25]. Sea  $\mathcal{O}(A^{(i)}, B^{(i)})$  la matriz de observabilidad del sistema (21), tal como se define en [26], entonces  $\mathbb{R}^n = \text{Im}(\mathcal{O}) \oplus U_{os}$ . Así,  $W_L = \text{Im}(\mathcal{O}W_L) \oplus \ker(\mathcal{O}W_L)$ . Si la condición (26) es satisfecha, entonces  $W_{L_k} = \text{Im}(\mathcal{O}L_k)$ , lo cual significa que las fallas se propagan sobre el sub-espacio de salida del sistema, ya que las direcciones de fallas se proyectan en el sub-espacio observable.

Cada dirección de falla  $L_k(\alpha), k = 1, \dots, M$ , se puede considerar que genera un sub-espacio que es linealmente independiente del resto de los sub-espacios generados por las demás direcciones de fallas, para todo  $\alpha$  variante en el tiempo, tal como se asume para sistemas LTI:

$$W_{L_k} \bigcap_{i=1, i \neq k}^M W_{L_i} = \{0\} \quad (27)$$

Es claro que esta condición facilita la detectabilidad de las fallas en el contexto de los sistemas LPV.

Mediante la Definición 1 y el Teorema 2 se puede establecer la siguiente proposición para el diseño de un PIO de manera de detectar fallas en sistemas LPV:

**Proposición 3** Para el sistema LPV (21), siendo  $(\mathcal{C}, \mathcal{A})$ -invariante, se puede diseñar un PIO de la forma (11), con la condición (12), de modo que la proyección de las fallas en el sub-espacio de salida generan los residuos  $r_y(t)$ .

En efecto, la ganancia  $G(\alpha)$  de la  $(\mathcal{C}, \mathfrak{A})$ -invarianza se obtiene mediante el diseño del PIO, asegurando la estabilización de la dinámica del error. Si la condición de detectabilidad se satisface, entonces para cualquier modo de falla  $v_k(t) \neq 0$ , para  $t \geq t_1$ , los residuos  $r_y(t) \neq 0$  para  $t \geq t_1$ .

### 3.1.2 Condición de Separabilidad

La condición de separabilidad se caracteriza por el hecho de que cada sub-espacio generado por cada dirección de falla y proyectado sobre el sub-espacio de salida deben ser independiente. Esto es:

**Teorema 4** Sea  $W_{L_k} = \bigcup_{i=1}^N \left[ \text{Im}(L_k(\alpha)) \right]$ ,  $k = 1, \dots, M$ , el sub-espacios debido a las direcciones de fallas y asumiendo que la condición (27) se satisface. Para el modelo de diagnóstico (21), sea  $\mathcal{O}(A^{(i)T}, B^{(i)T})$  su matriz de observabilidad [26], entonces las fallas son separables si cada una de las direcciones de ellas sobre la estimación de salida están aisladas:

$$\mathcal{O}W_{L_k} \cap \sum_{i \neq j}^M \mathcal{O}W_{L_j} = \{0\}, \quad k, j = 1, \dots, M. \quad (28)$$

#### Demostración

Al igual que para la condición de detectabilidad, la demostración es una extensión de los resultados en [12, 25]. Si  $\mathcal{O}_k$  es el sub-espacio observable más grande que contiene a  $W_{L_k}$ ; esto es, existe un aplicación de proyección  $\mathcal{P}_k : W_{L_k} \rightarrow \mathcal{O}_k$  tal que para cada  $W_{L_k}$ ,  $\mathcal{P}_k$  proyecta a una dirección particular la dirección de falla  $\text{Im } L_k$  al sub-espacio de salida, entonces, dada la condición (27) y la condición (28), existirán  $\mathcal{P}_j$ ,  $j = 1, \dots, M$ ,  $j \neq k$ , que proyectan el resto de las direcciones de fallas al sub-espacio  $\mathcal{O}_j$ , en direcciones independientes.

Los proyectores se definen como observadores. Utilizando algoritmos de generación de sub-espacios  $(\mathcal{C}, \mathfrak{A})$ -invariantes se diseñan dichos proyectores [12, 13], aunque resulta ser un procedimiento complejo. La condición de separabilidad establece que las direcciones de fallas son mapeadas sobre el espacio de observabilidad, a partir de lo cual es factible su aislamiento. Así, las fallas pueden ser asignadas a direcciones particulares sobre las salidas estimadas. Adicionalmente, de manera de separar los residuos producidos por cada falla, es posible diseñar un único filtro (observador), siguiendo la complejidad del procedimiento basado en sub-espacios  $(\mathcal{C}, \mathfrak{A})$ -invariantes, por lo que toda la información de los residuos estarán contenidos en las salidas simples y pudiéndose definir índices de desempeño según las características de las fallas.

De acuerdo a la Proposición 3, existe un PIO que permite la detectabilidad de las fallas por estabilización de la

matriz  $\mathfrak{A}(\alpha)$ . Si se satisface la condición de separabilidad de fallas, el algoritmo de sub-espacios invariantes resulta impráctico debido a la incertidumbre en la matriz de salida  $C(\alpha)$ , de modo que generar un único PIO para el aislamiento del conjunto de fallas es poco factible. Además, si se considera un sistema con perturbaciones, tal como el definido por (9), el diseño del PIO debe considerar la atenuación de las perturbaciones. A partir de este panorama, es posible considerar el diseño de PIO múltiples, considerando un índice de desempeño para cada una de las direcciones de fallas separables y para las perturbaciones, entonces se pueden derivar características de desempeño multivariables.

### 3.2 Multifiltraje para RFDI

A los efectos de obtener la separación de fallas y al mismo tiempo atenuar el ruido exógeno, se aplica el multifiltraje, de manera similar al usado en [18] pero diseñando PIO. En este caso, cada PIO (filtro) es diseñado para satisfacer diferentes requerimientos, produciéndose una señal residual aislada de las producidas por los otros filtros, ya que se debe hacer sensible el residual particular al modo de falla correspondiente y, al mismo tiempo, atenuar los otros modos de fallas conjuntamente con las señales de perturbación.

A partir del PIO dado por (11), el banco de filtros, para  $k = 1, \dots, M$ , está dado por

$$\begin{aligned} \zeta_k(t) &= F\zeta_k(t) + K_{Ik}\vartheta_k + \\ &\quad K_{Pk}(y(t) - \tilde{y}_k(t)) + B_2(\alpha)u(t), \\ \dot{\vartheta}_k(t) &= G_k\vartheta_k + H_k(y(t) - \tilde{y}_k(t)) \\ \tilde{y}_k(t) &= J\zeta_k(t) \end{aligned} \quad (29)$$

donde,  $\zeta_k(t)$  y  $\tilde{y}_k(t)$  representan los estados estimados y las salidas estimadas para el filtro  $k$ -ésimo, donde los parámetros de diseño son:  $K_{Pk}$ ,  $K_{Ik}$ ,  $G_k$  y  $H_k$ ; bajo la consideración de que  $F = A(\alpha)$ ,  $J = C(\alpha)$ . Entonces, la dinámica de estimación corresponde a ese  $k$ -ésimo filtro es

$$\begin{pmatrix} \dot{e}_k(t) \\ \dot{\vartheta}_k(t) \end{pmatrix} = \mathfrak{A}_k(\alpha) \begin{pmatrix} e_k(t) \\ \vartheta_k(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} B_k(\alpha) \\ 0 \end{pmatrix} \tilde{w}_k(t) + \begin{pmatrix} L_k(\alpha) \\ 0 \end{pmatrix} v_k(t) \quad (30)$$

donde

$$\mathfrak{A}_k(\alpha) = \begin{pmatrix} A(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -K_{Pk} & -K_{Ik} \\ H_k & G_k \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C(\alpha) & 0 \\ 0 & \mathbb{I}_p \end{pmatrix}, \quad (31)$$

$$B_k(\alpha) = [B_1(\alpha) \quad \sum L_{k0}(\alpha)], \quad (32)$$

$$\tilde{w}_k(t) = [w(t)^T \quad v_{k0}^T(t)]^T. \quad (33)$$

$v_k(t)$  y  $L_k(\alpha)$  son los modos y dirección de fallas para el  $k$ -ésimo filtro, y que es sensible a esa condición de falla. El resto de los modos y direcciones de fallas, es decir,  $v_{k0}(t)$  y  $\sum L_{k0}(\alpha)$ , son incluidas dentro del vector de perturbaciones extendido  $\tilde{w}_k(t) \in \mathbb{R}^{n_f+q-1}$  y  $\mathcal{B}_k(\alpha)$ , respectivamente, y que se debe atenuar en los residuos. Esto se hace de manera de minimizar los efectos de las otras fallas, junto con las perturbaciones externas, en el mismo proceso de optimización.

Siguiendo la definición de las matrices (16) y la matriz de ganancia (17), se genera el sistema dinámico extendido para el  $k$ -ésimo filtro

$$\begin{aligned} \dot{z}_k(t) &= \mathcal{A}_o(\alpha)z_k(t) + \mathcal{B}_o v_k(t) + \mathcal{B}_{1k}(\alpha)\tilde{w}_k(t) \\ &\quad + \mathcal{L}_k(\alpha)v_k(t) \\ \eta_k(t) &= \mathcal{C}_o(\alpha)z_k(t) \end{aligned} \quad (34)$$

donde

$$\mathcal{B}_{1k}(\alpha) = \begin{pmatrix} \mathcal{B}_k(\alpha) \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \mathcal{L}_k(\alpha) = \begin{pmatrix} L_k(\alpha) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (35)$$

Nótese que  $\eta_k(t)$  corresponde a la señal residual del filtro. El diseño del filtro se obtiene como solución de un problema de control óptimo-robusto por SOF, donde la ganancia de realimentación  $\mathbb{K}_k$  se obtiene en términos de índices de desempeño en  $\mathcal{H}_2$ - $\mathcal{H}_\infty$  caracterizados como LMIs. Para la dinámica (34), el rechazo a la perturbación  $\tilde{w}_k(t)$  se obtiene minimizando la norma  $\mathcal{H}_2$  ó  $\mathcal{H}_\infty$  del sistema  $T_{\tilde{w}_k \rightarrow \eta_k}(s) = \mathcal{C}_o(\alpha)(s\mathbb{I} - \mathcal{A}_k(\alpha))^{-1}\mathcal{B}_{1k}(\alpha)$ , con un control por SOF de la forma  $v_k(t) = \mathbb{K}_k\eta_k(t)$ , según el Lema 3. Enseguida se muestra el diseño del filtro.

### 3.2.1 Multifiltraje para RFDI en $\mathcal{H}_2$

**Teorema 5** *Considérese el sistema (9) sobre el politopo (10), tal que se admiten las condiciones (27) y (28). Un filtro para la  $k$ -ésima falla, de la forma (29), garantizando un desempeño sub-óptimo en  $\mathcal{H}_2$  para (30), es decir,  $\|T_{\tilde{w}_k \rightarrow \eta_k}(s)\|_2^2 < \mu$ , se obtiene a partir del siguiente problema de optimización:*

$$\begin{aligned} \min & \quad \text{tr}(Z_k), \quad \text{tal que} \\ & \quad Q_k, X_k, Z_k, P_k^{(i)} \\ & \quad i = 1, \dots, N, k = 1, \dots, M. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} -Q_k - Q_k^T & \Psi_{2,k} & Q_k^T \mathcal{B}_{1k}^{(i)T} \\ \star & -2P_k^{(i)} & 0 \\ \star & \star & -\mu\mathbb{I} \end{bmatrix} < 0, \quad (36) \\ \begin{bmatrix} P_k^{(i)} & \star \\ \mathcal{C}_o^{(i)} & Z_k \end{bmatrix} > 0 \end{aligned}$$

para  $i = 1, \dots, N, k = 1, \dots, M$ , donde  $\Psi_{2,k} = Q_k^T \mathcal{A}_o^{(i)} + \mathcal{B}_o X_k \mathcal{C}_o^{(i)} + P_k^{(i)} + Q_k^T$ ,  $Q_k \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ,  $X_k \in \mathbb{R}^{n \times p}$ ,  $Z_k \in \mathbb{R}^{s \times s}$ , y  $P_k^{(i)} = P_k^{(i)T} > 0 \in \mathbb{R}^{n \times n}$ . Así, la ganancia del estimador está dada por

$$\mathbb{K}_k = M_k^{-1} X_k, \quad \text{con} \quad M_k = \mathcal{B}_o^{-1} Q_k^T \mathcal{B}_o. \quad (37)$$

### Demostración

A partir del Lema 1, se asume que hay una solución factible para el problema de optimización formulado. Mediante el cambio de variable  $X_k = M_k \mathbb{K}_k$ , con  $Q_k^T \mathcal{B}_o = \mathcal{B}_o M_k$ , para la LMI de la declaración *iv)* del Lema 1, se hacen las sustituciones respectivas y se llega a la LMI dado por (36).

Una vez obtenida la ganancia  $\mathbb{K}_k$ , de allí se generan las matrices del PIO. Se puede notar que en este problema de optimización se usa una función de Lyapunov dependiente de parámetro  $P(\alpha) = \sum_{i=1}^N \alpha_i P_i$ , tal como se propone en [23], y también aplicada en filtraje robusto. Este hecho es una alternativa al conservatismo que se tiene cuando se usa una matriz de Lyapunov fija,  $P^{(i)} = P$ . De esta manera, es posible obtener una función de Lyapunov para cada vértice del politopo, sin forzar una única matriz de Lyapunov para todo el sistema de diagnóstico.

### 3.2.2 Multifiltraje para RFDI en $\mathcal{H}_\infty$

**Teorema 6** *Considérese el sistema (9) sobre el politopo (10), tal que se admiten las condiciones (27) y (28). Un filtro para la  $k$ -ésima falla, de la forma (29), garantizando un desempeño sub-óptimo en  $\mathcal{H}_\infty$  para (30), es decir,  $\|T_{\tilde{w}_k \rightarrow \eta_k}(s)\|_\infty < \gamma$ , a partir del siguiente problema de optimización:*

$$\begin{aligned} \min & \quad \|T_{\tilde{w}_k \rightarrow \eta_k}(s)\|_\infty, \quad \text{tal que} \\ & \quad Q_k, Y_k, P_k^{(i)}, \tau \\ & \quad i = 1, \dots, N, k = 1, \dots, M. \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} -(Q_k + Q_k^T) & \Psi_{\infty,k} & 0 & Q_k^T \mathcal{B}_{1k}^{(i)T} \\ \star & -2\tau P_k^{(i)} & \mathcal{C}_o^{(i)T} & 0 \\ \star & \star & -\mathbb{I} & 0 \\ \star & \star & \star & -\gamma^2 \mathbb{I} \end{bmatrix} < 0 \quad (38)$$

donde  $i = 1, \dots, N, k = 1, \dots, M$ ;  $\Psi_{\infty,k} = Q_k^T \mathcal{A}_o^{(i)} + \mathcal{B}_o Y_k \mathcal{C}_o^{(i)} + P_k^{(i)} + \tau Q_k^T$ ,  $Q_k \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ,  $Y_k \in \mathbb{R}^{n \times p}$ , y  $P_k^{(i)} = P_k^{(i)T} > 0 \in \mathbb{R}^{n \times n}$ . Así, la ganancia  $\mathbb{K}_k$  se obtiene por

$$\mathbb{K}_k = M_k^{-1} Y_k, \quad \text{donde} \quad M_k = \mathcal{B}_o^{-1} Q_k^T \mathcal{B}_o \quad (39)$$

### Demostración

De manera similar, si se asume que hay una solución factible para el problema de optimización formulado. Mediante el cambio de variable  $Y_k = \mathcal{B}_o M_k$ , donde  $Q_k^T \mathcal{B}_o = \mathcal{B}_o M_k$ , para el inciso *iii)* del Lema 2, se hacen las sustituciones respectivas y se llega a la LMI dado por (38).

### 3.3 RFDI via multifiltraje $\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty$

En esta sección se presenta un procedimiento de síntesis de filtros para el diagnóstico robusto de fallas considerando perturbaciones y fallas, debilitando las condiciones de independencia entre fallas y perturbaciones al definir índices de desempeño multiobjetivos, según las características de estas señales. El método es una extensión de los resultados presentados en la última sección.

Considérese el modelo de diagnóstico dado por (9) sobre el politopo (10). De igual manera, se admiten las condiciones (27) y (28). Aún así, algunas direcciones de fallas pueden coincidir con componentes de la matriz  $B_1(\alpha)$ , lo cual implica que ciertas fallas pueden confundirse como señales de perturbación y el diagnóstico será más difícil de obtener. Así, es necesario evaluar, en lo posible, el efecto de las fallas y las perturbaciones en los residuos, por separado.

En consecuencia, considerando un PIO de la forma (29), la dinámica extendida será

$$\begin{aligned} \dot{z}_k(t) &= \mathcal{A}_o(\alpha)z_k(t) + \mathcal{B}_o v_k(t) + \mathcal{B}_{1k}(\alpha)w(t) + \\ &\quad \mathcal{B}_{Lk}(\alpha)v_{k0}(t) + \mathcal{L}_k(\alpha)v_k(t) \\ \eta_k(t) &= \mathcal{C}_o(\alpha)z_k(t) \end{aligned} \quad (40)$$

donde

$$\mathcal{B}_{1k}(\alpha) = \begin{pmatrix} B_1(\alpha) \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \mathcal{B}_{Lk}(\alpha) = \begin{pmatrix} \Sigma L_{k0}(\alpha) \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (41)$$

$$\mathcal{L}_k(\alpha) = \begin{pmatrix} L_k(\alpha) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (42)$$

Tal como se puede notar, se tiene la falla  $v_k$  que se desea diagnosticar, el resto de las fallas respresentas en  $\mathcal{B}_{Lk}(\alpha)$  y las perturbaciones descritas por  $\mathcal{B}_{1k}(\alpha)$ , de manera separadas. En este caso, el diseño del multifiltraje se puede señalar imponiendo múltiples índices de desempeño. Esto es posible ya que la naturaleza de las perturbaciones, por lo general, son señales de alta frecuencia, mientras que las fallas son de baja frecuencia. Además, si la matriz de entrada de la perturbación es cierta,  $B_1$  constante, entonces se aprovecha plenamente la ventaja del PIO en estimar esta señal, lo cual permite establecer un mejor criterio de definición del umbral en la detección de las fallas. Para alcanzar la separación de fallas, según las condiciones dadas, y el rechazo al ruido simultáneamente, se propone el diseño de filtros definiendo dos índices de desempeño:

1. El rechazo al ruido se obtiene minimizando la norma-2 del sistema  $T_{w \rightarrow \eta_k}(s) = \mathcal{C}_o(\alpha)(sI - \mathcal{A}_k(\alpha))^{-1} \mathcal{B}_{1k}(\alpha)$ , con,  $\|T_{w \rightarrow \eta_k}\|_2 < \mu_k$ .
2. El diagnóstico de fallas se obtiene minimizando la norma- $\infty$  del sistema  $T_{v_{k0} \rightarrow \eta_k}(s) = \mathcal{C}_o(\alpha)(sI - \mathcal{A}_k(\alpha))^{-1} \mathcal{B}_{Lk}(\alpha)$ , esto es,  $\|T_{v_{k0} \rightarrow \eta_k}(s)\|_\infty < \gamma_k$ .

En consecuencia, el siguiente resultado resume la técnica de multifiltrado para el diseño del banco de filtros.

**Teorema 7** *Considérese el sistema (9) sobre el politopo (10), tal que se admiten las condiciones (27) y (28). Un filtro para la  $k$ -ésima falla, de la forma (29), que garantiza un desempeño sub-óptimo  $\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty$  para (40), satisfaciendo las condiciones formales, se obtiene del siguiente problema:*

$$\begin{aligned} \text{mín} \quad & \text{tr}(Z_k) + \gamma_k^2; \quad \text{tal que} \\ & Q_k, Y_k, Z_k, P_{2,k}^{(i)}, P_{\infty,k}^{(i)}, \gamma_k^2, \mu_k \\ & i = 1, \dots, N, k = 1, \dots, M. \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} -Q_k - Q_k^T & \Psi_{2,k} & Q_k^T \mathcal{B}_{1k}^{(i)T} \\ * & -2P_{2,k}^{(i)} & 0 \\ * & * & -\mu_k \mathbb{I} \end{bmatrix} < 0, \quad (43)$$

$$\begin{bmatrix} P_{2,k}^{(i)} & * \\ \mathcal{C}_o^{(i)} & Z_k \end{bmatrix} > 0$$

$$\begin{bmatrix} -(Q_k + Q_k^T) & \Psi_{\infty,k} & 0 & Q_k^T \mathcal{B}_{Lk}^{(i)T} \\ * & -2\tau P_{\infty,k}^{(i)} & \mathcal{C}_o^{(i)T} & 0 \\ * & * & -\mathbb{I} & 0 \\ * & * & * & -\gamma_k^2 \mathbb{I} \end{bmatrix} < 0, \quad (44)$$

$$\Psi_{2,k} = Q_k^T \mathcal{A}_o^{(i)} + \mathcal{B}_o Y_k \mathcal{C}_o^{(i)} + P_{2,k}^{(i)} + Q_k^T$$

$$\Psi_{\infty,k} = Q_k^T \mathcal{A}_o^{(i)} + \mathcal{B}_o Y_k \mathcal{C}_o^{(i)} + P_{\infty,k}^{(i)} + \tau Q_k^T,$$

para  $i = 1, \dots, N, k = 1, \dots, M$ , donde  $Q_k \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ,  $Z_k \in \mathbb{R}^{s \times s}$ ,  $P_{2,k}^{(i)} = P_{2,k}^{(i)T} > 0 \in \mathbb{R}^{n \times n}$  y  $P_{\infty,k}^{(i)} = P_{\infty,k}^{(i)T} > 0 \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ,  $Y_k \in \mathbb{R}^{q \times p}$  y  $\tau \gg 1$ . De modo que la ganancia  $\mathbb{K}_k$  se obtiene por

$$\mathbb{K}_k = M_k^{-1} Y_k, \quad \text{donde} \quad M_k = \mathcal{B}_o^{-1} Q_k^T \mathcal{B}_o \quad (45)$$

#### **Demostración**

Combinando los criterios dados en el caso  $\mathcal{H}_2$  y  $\mathcal{H}_\infty$ , a partir de cambios de variables se llega a la prueba. Así-mase que existe una solución factible para el problema de optimización según el Teorema 7, entonces de la relación  $Y_k = \mathcal{B}_o M_k$ , donde  $Q_k^T \mathcal{B}_o = \mathcal{B}_o M_k$  y para la LMI de la declaración (iv) del Lema 1 y la LMI del inciso iii) del Lema 2, se hacen las sustituciones respectivas y se llegan a las LMIs (43) y (44), que se deben resolver simultáneamente. De manera de reducir el conservatismo se usan las versiones extendidas de las caracterizaciones de las normas  $\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty$  como LMIs, ya que no se generan productos que involucren matrices de Lyapunov y la matriz de ganancia de diseño  $\mathbb{K}_k$ , que contiene a las matrices del PIO, evitándose la necesidad de usar la misma matriz de Lyapunov para todas las especificaciones. Así, este hecho es muy

importante debido a que no solamente hay una matriz de Lyapunov dependiente de parámetros para cada filtro, sino que hay, además, una función de Lyapunov para cada especificación de desempeño.

#### 4. EJEMPLO ILUSTRATIVO

En esta sección, a partir de un ejemplo numérica, se evalúa el método de diseño antes descrito. La idea, con el ejemplo, es permitir validar el marco teórico tanto para el diagnóstico de robusto de fallas como el rechazo de perturbaciones. Considérese el modelo LPV dado por:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} -1.75 + \alpha_2 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & -1 + \alpha_1 & 0 & 0 \\ -1.8 & -1 & -0.75 + \alpha_1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & -1 + \alpha_2 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ 0.6 + \alpha_1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} w + \begin{bmatrix} 1 + \alpha_1 \\ 1 \\ 1 \\ \alpha_2 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} v_1 + \begin{bmatrix} 1 \\ 0.5 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} v_2$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} x$$

donde los parámetros  $\alpha_1 \in [-0.05, 0.05]$  y  $\alpha_2 \in [-0.1, 0.1]$ . Los vértices del politopo se estructuran con los valores mínimos y máximos de esos parámetros. Una primera inspección nos permite establecer la posibilidad del diagnóstico de las fallas, ya que las condiciones de detectabilidad y separabilidad se satisfacen, en este caso.

Los modos de fallas  $v_k$ ,  $k = 1, 2$ , están asociados a anomalías del actuador. Del Teorema 7, las ganancias de SOF son

$$K_1 = \begin{bmatrix} -7.9119 & -2.1124 & -18.9915 & 33.7888 \\ 6.9848 & -0.8900 & -12.2796 & 3.6699 \\ 3.5951 & 1.8341 & -3.4365 & 3.4331 \\ 21.4275 & -0.2689 & -5.7651 & -16.2854 \\ -2.8732 & 0.8795 & -0.2863 & -0.4870 \end{bmatrix}$$

$$K_2 = \begin{bmatrix} 8.6759 & 10.2763 & -40.9927 & 35.2296 \\ 3.9900 & -17.2249 & 12.2568 & 7.6901 \\ 11.2313 & 8.0823 & -38.4933 & 30.9176 \\ 7.6496 & -47.3802 & 67.0193 & -38.9753 \\ -3.5801 & -0.0992 & 3.1071 & -0.4822 \end{bmatrix}$$

De modo que las matrices de os filtros tipos PIO son:

$$K_{P1} = \begin{bmatrix} 7.9119 & 2.1124 & 18.9915 \\ -6.9848 & 0.8900 & 12.2796 \\ -3.5951 & -1.8341 & 3.4365 \\ -21.4275 & 0.2689 & 5.7651 \end{bmatrix} \quad K_{I1} = \begin{bmatrix} -33.7888 \\ -3.6699 \\ -3.4331 \\ 16.2854 \end{bmatrix}$$

$$H_1 = [-2.8732 \quad 0.8795 \quad -0.2863] \quad G_1 = -0.4870$$

$$K_{P2} = \begin{bmatrix} -8.6759 & -10.2763 & 40.9927 \\ -3.9900 & 17.2249 & -12.2568 \\ -11.2313 & -8.0823 & 38.4933 \\ -7.6496 & 47.3802 & -67.0193 \end{bmatrix} \quad K_{I2} = \begin{bmatrix} -35.2296 \\ -7.6901 \\ -30.9176 \\ 38.9753 \end{bmatrix}$$

$$H_2 = [-3.5801 \quad -0.0992 \quad 3.1071] \quad G_2 = -0.4822$$

El primer filtro es sensible a la falla  $v_1$ , mientras que el otro es para diagnosticar la falla  $v_2$ .

Los resultados de las simulaciones se obtuvieron sobre 100 s, permitiendo la variación de los parámetros en todo momento, tal como se muestra en la Fig. 2.

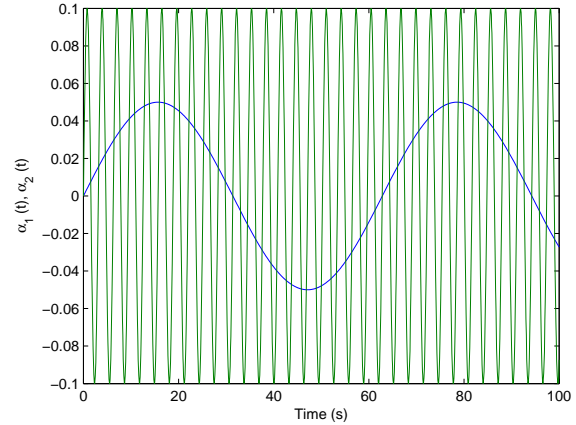


Figura 2. Los parámetros:  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$ .

Enseguida, la Fig. 3 muestra los modos de fallas usados. Como se puede notar, el modo  $v_1$  se presenta a partir de  $t = 15s$ , correspondiente a una onda sinusoidal. Mientras que  $v_2$  a partir de  $t = 45s$ , y se representa por una señal diente de sierra. Para la generación de los residuos se consideran las salidas medidas, mismas que se muestran en la Fig. 4, y las salidas estimadas por cada filtro.

La Fig. 5 muestra las señales residuales obtenidas para cada filtro. Es fácil observar, de los residuos, que las fallas son detectadas y separadas, ya que cada filtro es más sensible a la falla que se quiere diagnosticar, lo cual se evidencia mas aún cuando se evalúan las señales  $\vartheta(t)$  de cada filtro, que se muestran en la Fig. 6, donde se tiene una adecuada reconstrucción de los modos de fallas, de acuerdo al nivel de sensibilidad alcanzado por cada filtro, lo cual acompaña los residuos generados para distinguir cada una de las anomalías. Esto fortalece la técnica de diseño de PIO para el diagnóstico y reconstrucción de fallas en sistemas LPV, dándole validez numérica a los resultados teóricos..

#### 5. COMENTARIOS CONCLUYENTES

En este trabajo se ha presentado una técnica para el diagnóstico robusto de fallas en sistemas con incertidumbres politópicas, mediante el diseño de filtros definidos por un Observador Proporcional-Integral (PIO). Se han establecido condiciones de detectabilidad y separabilidad de fallas para tales sistemas, derivadas de las condiciones para los sistemas LTV, las cuales son caracterizadas

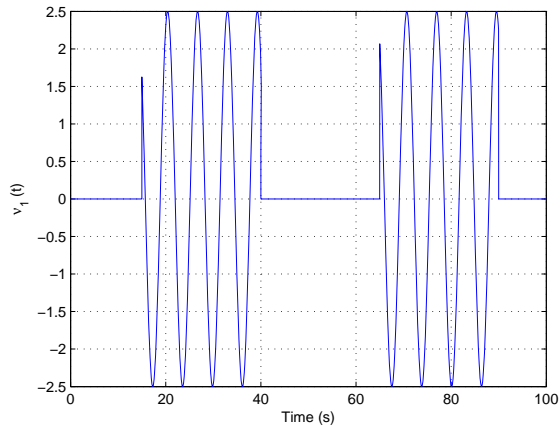


Figura 3. Modos de fallas.

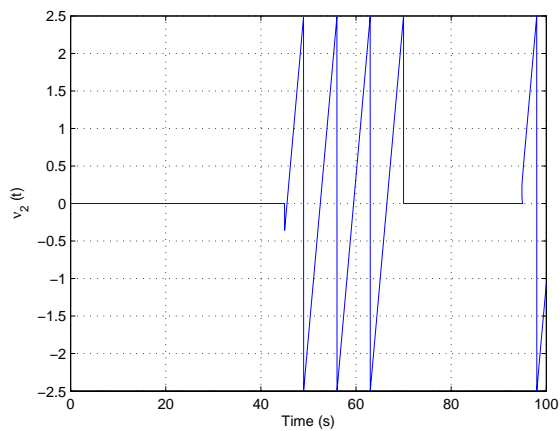
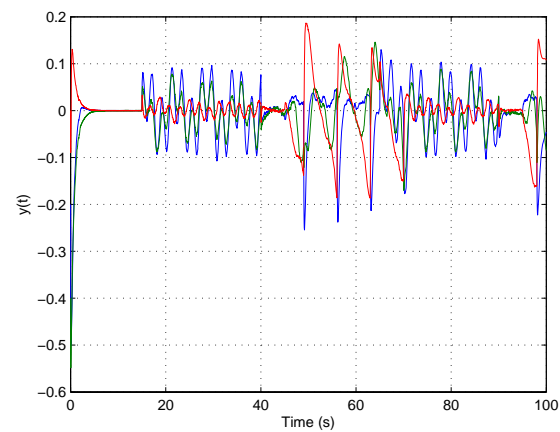


Figura 4. Las salidas.



por extensiones de los sub-espacios invariantes de sistemas inciertos y del enfoque algebraico de dichas condi-

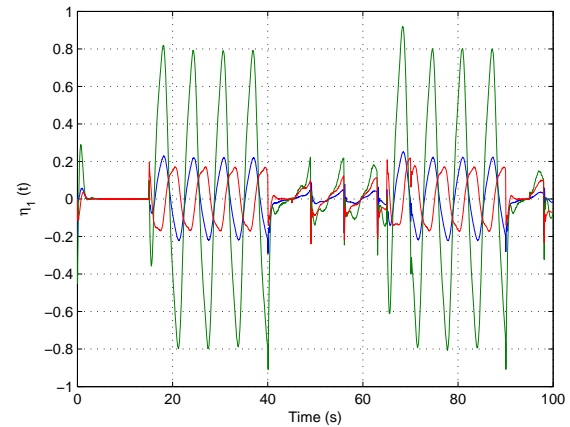
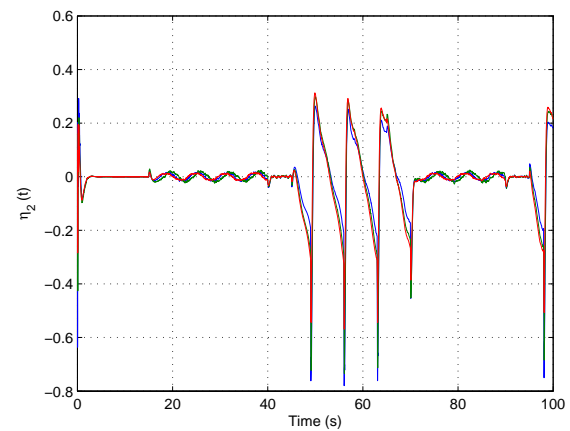


Figura 5. Residuos.



ciones. El diagnóstico de fallas se obtiene a partir de las condiciones establecidas y definiendo índices de desempeño en  $\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty$ , caracterizados como versiones extendidas de LMIs. La síntesis de los filtros de diagnóstico se obtiene por solución numérica de las LMIs, transformando el diseño de las matrices del PIO como un problema de control óptimo robusto por realimentación estática de la salida (SOF), considerando especificaciones multi-objetivos, lo que permite extensiones según la naturaleza de las fallas y sus características como señales. Tomando en cuenta que un PIO permite la reconstrucción de entradas desconocidas (fallas), el diagnóstico se realiza por la separación de fallas mediante multifiltraje. Esto conlleva al diseño de un filtro para cada falla, tomando las fallas como perturbaciones y minimizando una medida de desempeño en  $\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty$ . Para una mejor separación y atenuación del ruido, mediante la reducción del conservatismo de las técnicas tradicionales, se han considerado versiones extendidas de las caracterizaciones de las normas  $\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty$ , además de funciones de Lyapunov dependen-



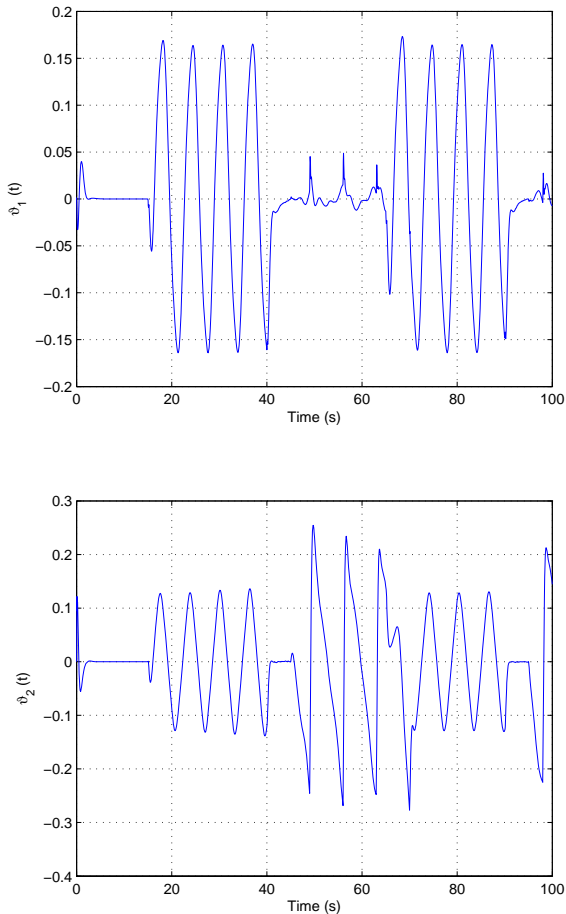


Figura 6. Señales  $\vartheta$ .

tes de parámetros. La evaluación numérica ha permitido la verificación de los resultados teóricos, y el análisis de los residuos, conjuntamente con las señales desconocidas estimadas del PIO, favorecen el proceso de diagnóstico.

#### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el CDCHTA de la Universidad de Los Andes, a través del proyecto No. I-1302-12-02-B, por lo que gratamente se reconoce este soporte.

#### REFERENCIAS

- [1] R. Beard, "Failure accommodation in linear systems through self-reorganization," Ph.D. dissertation, Mass. Inst. Technol., 1971.
- [2] H. Jones, "Failure detection in linear systems," Ph.D. dissertation, Mass. Inst. Technol., 1973.

- [3] E. Frisk and L. Nielsen, "Robust residual generation for diagnosis including a reference model for residual behavior," *Automatica*, vol. 42, no. 3, pp. 437–445, 2006.
- [4] M. L. Guillén, J. L. Paredes, and O. E. Camacho, "Detección y diagnóstico de fallas utilizando la transformada wavelet," *Ciencia e Ingeniería*, vol. 25, no. 1, pp. 35–42, 2004.
- [5] H. Niemann, J. Stoustrup, and B. Shafai, "Fault detection using PI observers," in *Proc. of CONTROL 97*, 1997.
- [6] B. Shafai, C. T. Pi, and S. Nork, "Robust fault detection using proportional integral observers," in *World Automation Congress*, 2002.
- [7] J. Zhang, "Evaluation of observer structures with application to fault detection," Master's thesis, Northeastern University, Dep. of Electrical and Computer Eng., 2009.
- [8] M. Rodrigues, D. Theilliol, S. Aberkane, and D. Sauter, "Fault tolerant control design for polytopic LPV systems," *Int. J. Appl. Math. Comput. Sci.*, vol. 17, no. 1, pp. 27–37, 2007.
- [9] A. Casavola, D. Famularo, G. Franzè, and M. Sorbara, "A fault detection, filter-design method for linear parameter-varying systems," *Proc IMechE. Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, vol. 221, pp. 865–873, 2007, especial Issue on Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Control.
- [10] A. Weng, R. Patton, and P. Cui, "Active fault-tolerant control of a double inverted pendulum," *Proc IMechE. Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, vol. 221, pp. 895–904, 2007, especial Issue on Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Control.
- [11] J. Bokor and G. Balas, "Detection filter design for LPV systems—a geometric approach," *Automatica*, vol. 40, pp. 511–518, 2004.
- [12] M.-A. Massoumnia, "A geometric approach to the synthesis of failure detection filters," *IEEE Trans. On Autom. Control*, vol. 31, no. 9, pp. 839–846, 1986.
- [13] J. Bokor and G. Balas, "Linear parameter varying systems: A geometric theory and applications," Comp. and Automation Research Institute, Hungary, Tech. Rep., 2005.
- [14] W. Acuña and A. Ríos-Bolívar, " $\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty$  multiobjectives for fault detection in uncertain polytopic systems," in *Proc. of 17th IFAC World Congress*, vol. CD-Rom, Seoul, Korea, 2007, pp. We–290.

- [15] Z. Duan, J. Zhang, C. Zhang, and E. Mosca, "Robust  $\mathcal{H}_2$  and  $\mathcal{H}_\infty$  filtering for uncertain linear systems," *Automatica*, vol. 42, pp. 1919–1926, 2006.
- [16] E. Mazars, J. I.M., Z. Li, and A. Zolotas, "Fault detection and isolation filter design for systems subject to polytopic uncertainties," in *Proc. of the IEEE 15th Mediterranean Conf. On Control and Autom.*, Athens, Greece, 2007, p. CDROM.
- [17] A. Casavola, D. Famularo, and Franzè, "A robust deconvolution scheme for fault detection and isolation of uncertain linear systems: an LMI approach," *Automatica*, vol. 41, pp. 1463–1472, 2005.
- [18] A. Ríos-Bolívar and W. Acuña, "Robust FDI in uncertain LTI systems: A multiobjective  $\mathcal{H}_2 - \mathcal{H}_\infty$  setting," *Int. J. of Electronics, Electrical and Communication Eng. (IJECE)*, vol. 2, no. 1, pp. 25–45, 2010.
- [19] A. Y. Ríos, "Un filtro para detección robusta de fallas en sistemas lineales a tiempo discreto con incertidumbres estructuradas," *Ciencia e Ingeniería*, vol. 28, no. 2, pp. 95–102, 2007.
- [20] A. Ríos-Bolívar, "On the design of PIO for LPV systems," *Revista Ciencia e Ingeniería (bajo consideración)*, 2014.
- [21] P. Apkarian, H. Tuan, and J. Bernussou, "Continuous-time analysis, eigenstructure assignment, and  $\mathcal{H}_2$  synthesis with enhanced linear matrix inequalities (LMI) characterizations," *IEEE Trans. on Autom. Control*, vol. 46, no. 12, pp. 1941–1946, 2001.
- [22] C. Wei, "On applications of the projection lemma to analysis and design of continuous-time systems," Master's thesis, National Sun Yat-Set University, 2003.
- [23] M. Oliveira, J. Bernussou, and J. Geromel, "A new discrete-time robust stability condition," *Systems & Control Letters*, vol. 37, pp. 261–265, 1999.
- [24] L. A. Morales, N. S. Sotomayor, and Y. Boada, "Control de seguimiento de trayectoria y paletización de un robot de tres grados de libertad tipo SCARA (selective compliance assembly robot arm)," *Revista Politécnica*, vol. 33, no. 1, pp. 1–9, 2014.
- [25] A. Ríos-Bolívar, "Sur la synthèse de filtres de détection de défaillances," Ph.D. dissertation, Université Paul Sabatier, Toulouse, 2001.
- [26] G. Angelis, "System analysis, modelling and control with polytopic linear models," Ph.D. dissertation, Technische Universiteit Eindhoven, 2001.

# Una Nueva Metodología para la identificación de Patrones de Biomarcación aplicados al Estudio, Prevención y Tratamiento Temprano de Enfermedades Crónicas

Herrera R.\*; Herrera L.\*\*

\*Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Quito, Ecuador

e-mail: roberto.herrera.lara@gmail.com

\*\*Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Quito, Ecuador

---

**Resumen:** Hoy en día, la aplicación de métodos matemáticos y computacionales han permitido revolucionar las investigaciones relacionadas con la medicina, quimiometría, proteómica y genómica. Algoritmos matemáticos de minería de datos y aprendizaje de máquina están abriendo las puertas a nuevas esperanzas en la lucha contra las enfermedades crónicas como el cáncer, la diabetes, el Alzheimer, cirrosis, enfermedades cardiovasculares y enfermedades suprarrenales. El presente trabajo presenta un nuevo método de selección y validación de patrones de biomarcadores aplicados al tratamiento temprano de enfermedades crónicas. La metodología propuesta en este trabajo aborda el análisis de datos procedentes directamente de los instrumentos de medición, hasta la definición de los patrones de biomarcación. Ésta basa su funcionamiento en la combinación de *t-test* y *Mann-Whitney U test* en un filtro estadístico, el cual define zonas de interés en los espectros de mediciones, luego estas zonas de interés son agrupadas y reducidas a las características cercanas a la media de cada una de estas, eliminando así la información redundante. La contribución de este trabajo radica en la estructura de este filtro estadístico, el cual posee una enorme capacidad de extracción de información a través de cálculos sencillos, en comparación a complejos algoritmos presentados en trabajos similares. Finalmente las características seleccionadas por este filtro son validadas usando clasificadores de *Adaboost*, *TotalBoost* y *LPBoost* probados con validación cruzada y pruebas con muestras externas. Los resultados obtenidos reflejan un rendimiento superior al 95%, además gran robustez en contra del sobreentrenamiento (*Overfitting*) e infraentrenamiento (*Underfitting*).

**Palabras claves:** biomarcador, aprendizaje de máquina, minería de datos, espectrometría de masas, filtro estadístico

**Abstract:** Today, the application of mathematical and computational methods have revolutionized research related to medicine, chemometrics, proteomics and genomics. Mathematical algorithms for data mining and machine learning are opening the doors to new hopes in the fight against chronic diseases like cancer, diabetes, Alzheimer's disease, cirrhosis, cardiovascular disease and adrenal diseases. This paper presents a new method for selection and validation of biomarker patterns applied to early treatment of chronic diseases. The proposed methodology deals with the analysis of data obtained directly from measuring instruments to defining patterns. It is based on the combination of *t - test* and *Mann - Whitney U test* in a statistical filter. These tests define areas of interest in the spectra of measurements, and then these areas of interest are grouped and reduced the closest feature to the average of each group of these features, thereby eliminating redundant information. The contribution of this work lies in the structure of the statistical filter, which has an enormous capacity for extracting information through simple calculations compared to complex algorithms presented in similar articles. Finally, the features selected by this methodology are validated using *Adaboost*, *TotalBoost* and *LPTBoost* classifiers tested using cross-validation and testing with external samples. The obtained results reflect an efficiency greater than 95%, furthermore robustness against overfitting and underfitting.

**Keywords:** biomarker, machine learning, data mining, mass spectrometry, statistical filter

---

## 1. INTRODUCCIÓN

La Espectrometría de Masas (EM) es una técnica de adquisición de datos muy popular en investigaciones sobre enfermedades crónicas<sup>1</sup> tales como el cáncer [1–9], enfermedades suprarrenales [10, 11], diabetes [12–14], enfermedades cardiovasculares [15], cirrosis [16, 17] y alzheimer [18]. Su popularidad está basada en la elevada capacidad que esta técnica posee para extraer información, además de la facilidad que presenta para ser integrada a metodologías computacionales de análisis de conjuntos masivos de datos [19].

Las metodologías computacionales usadas en estas aplicaciones médicas han recibido un enorme interés por parte de los investigadores ya que a través de ellas es posible realizar análisis y experimentación en forma mucho más exhaustiva que con los métodos tradicionales. La combinación de la estadística, probabilidad y simulación computacional permiten abordar una cantidad de casos de análisis mucho más variada que la experimentación tradicional de laboratorio.

Mediante esta técnica se realizan mediciones denominadas espectros de masa, dichos espectros, para las aplicaciones analizadas en este trabajo, proceden del análisis de muestras de fluidos biológicos (FB) como saliva o suero sanguíneo. Estos FB poseen una cantidad enorme de información relativa a la presencia de patologías en el cuerpo humano [28]. Esta información está representada por biomarcadores (BM), los cuales son sustancias usadas en el análisis y diagnóstico de patologías médicas. Estas sustancias tienen la capacidad de indicar la presencia de un estado patológico, así como también la respuesta a tratamientos químicos.

Los espectros de masa adquiridos están constituidos por un vector de valores de intensidades, donde se expresa la abundancia de los iones en fase gaseosa de la muestra analizada y un vector de las relaciones masa a radio  $m/z$  expresado en thomsons [ $th$ ]. En la Figura 1 se muestra varias mediciones de un conjunto de datos *OvarianCD\_PostQAQC.zip*, disponible en el Instituto Nacional del Cáncer de los Estados Unidos.

El proceso de análisis de datos de mediciones de EM para la identificación de BM consta básicamente del pro-

cesamiento de datos, selección y validación de patrones con alto grado de discriminación intergrupar. Una vez validados estos patrones, la siguiente etapa es traducirlos a expresiones químicas para que puedan ser utilizados como herramientas de diagnóstico y en la sintonización de péptidos y antigénicos para el tratamiento de las enfermedades mencionadas anteriormente [20–27, 31].

En este trabajo se presenta un nuevo método para la identificación de patrones de BM a través de la combinación de dos pruebas estadísticas  $t$ -test y *Mann-Whitney U test* en un filtro estadístico y la eliminación iterativa de características de las zonas de interés usando por agrupamiento a la media de cada zona reduciendo la información redundante. Estos resultados son validados usando tres clasificadores independientes *AdaBoost*, *TotalBoost* y *LPBoost*. Estos clasificadores son especialmente robustos contra los efectos del infraentrenamiento y sobreentrenamiento, además de ser fácilmente adaptables a este tipo de aplicaciones. Con estas características se evita caer en la mala interpretación de resultados erróneos y falsos positivos o negativos.

La medición del rendimiento se hace a través de validación cruzada y pruebas externas usando muestras independientes que no hayan intervenido previamente en la modelización de los clasificadores. Esta metodología presenta resultados prometedores con un rendimiento superior al 95% de aciertos en las pruebas realizadas. Este trabajo se limita a la identificación de los patrones de biomarcadores, dejando para desarrollos posteriores su traducción a compuestos químicos y proteínas.

En las siguientes secciones se describe algorítmicamente la metodología propuesta en este trabajo, se la pone a prueba usando dos conjuntos de datos, el primero *OvarianCD\_PostQAQC.zip* del Programa de Proteómica Clínica del Centro para la Investigación del Cáncer perteneciente al Instituto Nacional del Cáncer de los Estados Unidos<sup>2</sup> y el segundo *Arcene* del *UCI Machine Learning Repository*. Se analizan y comparan los resultados obtenidos con trabajos anteriores. En la última sección se plantean posibles extensiones a la investigación presentada y en la parte final se adjunta la sección de conclusiones.

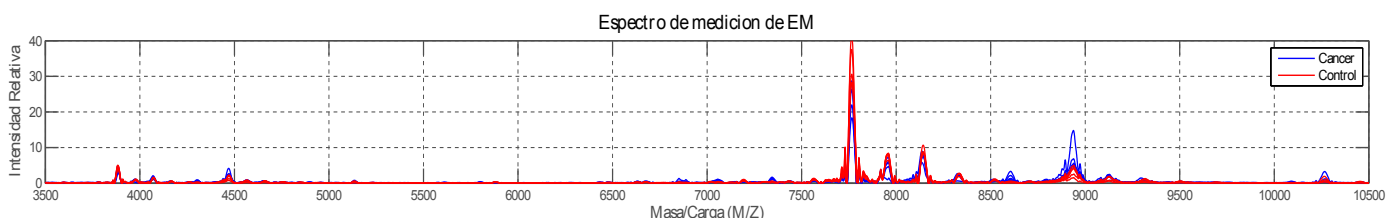


Figura 1. Ejemplo de espectros de mediciones del Conjunto *OvarianCD\_PostQAQC.zip*

<sup>1</sup>La World Health Organization define una enfermedad crónica como aquella enfermedad de larga duración y progresión lenta.

<sup>2</sup><http://home.ccr.cancer.gov/ncifdaproteomics/ppatterns.asp>

## 2. DEFINICIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA

La metodología propuesta en este trabajo parte del caso básico de análisis de datos para aplicaciones de diagnóstico médico, un conjunto  $D$  formado por los grupos  $G_1$  y  $G_2$ , donde  $G_1$  representa un estado biológico normal y  $G_2$  un estado biológico patológico. Del conjunto  $D$  se extraerán patrones que permitan diferenciar de entre  $G_1$  y  $G_2$  de forma fiable, estos patrones se validarán y una vez validados podrán ser usados como biomarcadores para la sintonización de proteínas que puedan ser usadas en el tratamiento de enfermedades. Este trabajo se limita a la definición de los patrones, dejando la sintetización de proteínas para trabajos futuros.

### 2.1 Procesamiento de datos

Las mediciones de los grupos  $\{G_1, G_2\}$  del conjunto  $D$  vienen expresados como conjuntos de matrices de mediciones de la forma  $M = \{((m/z)_1, i_1), ((m/z)_2, i_2), ((m/z)_3, i_3), \dots, ((m/z)_n, i_n)\}$ , donde los valores  $\{(m/z)_k, i_k\} \in \mathbb{R}$  y  $1 \leq k \leq n$ . Debido a la heterogeneidad de las longitudes de las mediciones  $M$ , el primer paso a realizar es el procesamiento de estos datos. El procesamiento de los datos del conjunto  $D$  esta basado en [28–30] y consta de las siguientes etapas: remuestreo, corrección de la línea base, alineación de las mediciones, normalización y filtrado.

El remuestreo se basa en el concepto procedente del procesamiento de señales, donde dado una señal discreta en el tiempo, aplicando este concepto se puede reducir o aumentar su frecuencia de muestreo, en este caso, esto se entiende como aumentar o reducir la resolución de las medición y por tanto los elementos de cada vector de las mediciones. Para el procesamiento de datos se asume que las mediciones del conjunto de datos  $D$  vienen definidas por  $M_m$ , una matriz formada por dos vectores  $\{I_m, (M/Z)_m\}$ , dos señales discretas en el tiempo definida como  $I_m = \{i_1, i_2, i_3, \dots, i_n\}$  y  $(M/Z)_m = \{(m/z_1), (m/z_2), (m/z_3), \dots, (m/z_n)\}$  donde el índice  $n$  indica la resolución de la medición y  $m$  el número de la medición. Por regla general, en estas mediciones se cumple que la resolución de la medición  $m - 1 \neq m \neq m + 1$ . El remuestreo tiene como objetivo estas resoluciones a un valor común de homogeneización  $n_h$  fijando la dimensionalidad del conjunto de datos  $D$  en  $m \times n_h$ .

El algoritmo usado se basa en la combinación de un interpolador de señales, un filtro pasa bajos y un decimador. El interpolador eleva la resolución de las mediciones de un factor  $n_1 > n$  luego de esto el filtro pasa bajos atenúa los efectos de aliasing e imaging producidos en la etapa de interpolación, finalmente el decimador reduce la resolución de un factor  $n_2 < n_1$ . La combinación

de estas dos operaciones permite controlar el factor de homogeneización a un valor racional  $\frac{n_1}{n_2}$  según sea necesario. En esta etapa el factor  $\frac{n_1}{n_2}$  define a  $n_h$ . En ciertas aplicaciones es necesario reducir la resolución radicalmente en factores de 10 a 1, sin embargo, en otras aplicaciones, es necesario aumentar la resolución en ciertos segmentos del espectro para realizar análisis más puntuales.

Luego del procesamiento hay que eliminar un ruido típico presente en estos datos denominado efecto de la línea de base. Esta anomalía se produce debido a los contaminantes presentes en la muestra analizada y está presente en todas las mediciones en el segmento inicial de la medición. El algoritmo usado en esta etapa estima una frecuencia mínima de nivel de línea de base usando la frecuencia de las intensidades y el ruido de cada medición. Una vez estimada esta frecuencia de línea de base, mediante regresión de estos valores se obtiene un vector de valores de desplazamientos de línea de base de cada una de las intensidades de la medición procesada, el cual es finalmente abstraído de las intensidades originales de la medición obteniendo un nuevo vector  $I_{m \times n}^{bc}$  con el efecto de línea de base ya corregido ( $bc$ ) sin alterar su resolución.

Con las mediciones ya homogeneizadas y eliminado de cada una de estas el efecto de línea base, el siguiente paso a realizar es la alineación de las medidas. La etapa de alineación de mediciones tiene como objetivo corregir los errores de calibración de los instrumentos de medida en el eje  $M/Z$ . Para esto se fijan picos de referencia de alineación  $p = \{p_1, p_2, \dots, p_\kappa\}$ , donde  $\kappa$  para aplicaciones prácticas toma valores de  $3 \leq \kappa \leq 5 \forall \kappa \in \mathbb{Z}^+$ . Básicamente en esta etapa se reconstruyen nuevos vectores de intensidades  $I_{m \times n}^{align}$  tomando como referencia los picos de mayor intensidad de las mediciones. Esta reconstrucción está basada en uso de funciones de deformación temporal, mediante las cuales se desplazan los picos no alineados hacia picos de referencia adaptando su posición en el eje  $M/Z$ .

La etapa de normalización complementa a la alineación de mediciones en la corrección de los errores de calibración de los instrumentos, pero esta en cambio trabaja en el eje de las intensidades de abundancia. Esta etapa tiene como objetivo la reducción de las diferencias de las intensidades de las mediciones del conjunto  $D$  con respeto a un factor de normalización. El proceso consiste en identificar las máximas intensidades de cada una de las mediciones, a las cuales se le asignará un valor de normalización  $norm_M$ . Luego, todas las intensidades restantes de las mediciones se normalizarán con respecto a estas intensidades máximas de valor  $norm_M$  obteniendo el factor de intensidad normalizada

$I_{i \times n}^{norm} = \frac{I_{i \times n}^{alig}}{\max(I_{i \times n}^{alig})} \times norm_M$ . La elección del factor de normalización dependerá de la naturaleza de la muestra analizada, su valor es esencial para una correcta traducción de los biomarcadores a proteínas.

La etapa final del procesamiento de las mediciones es el filtrado del ruido de las mediciones. Si bien una etapa anterior realizó en parte un filtrado de ruido en las mediciones, todas las etapas anteriores al filtrado del ruido tienden a producir errores que se presentan como una nueva presencia de ruido en las mediciones. Desde un punto de vista práctico, este proceso de filtrado tiene como objetivo suavizar la curva del espectro eliminando la mayor cantidad de variaciones de carácter aleatorio de

las mediciones. Esta etapa se lleva a cabo usando el filtro de Savitzky–Golay, el cual realiza una regresión polinomial de grado  $\alpha$  con al menos  $\alpha + 1$  puntos equidistantes, para determinar el valor de cada punto nuevo. El resultado de la aplicación de este filtro a las mediciones de EM son las mismas mediciones pero suavizadas, conservando su dimensionalidad.

La aproximación calculada a través de este filtro tiende a conservar las distribuciones originales de los datos filtrados, lo que significa que los puntos máximos y mínimos relativos o picos no se ven alterados. El proceso total del procesamiento de las matrices de medición se presenta en la Figura 2.

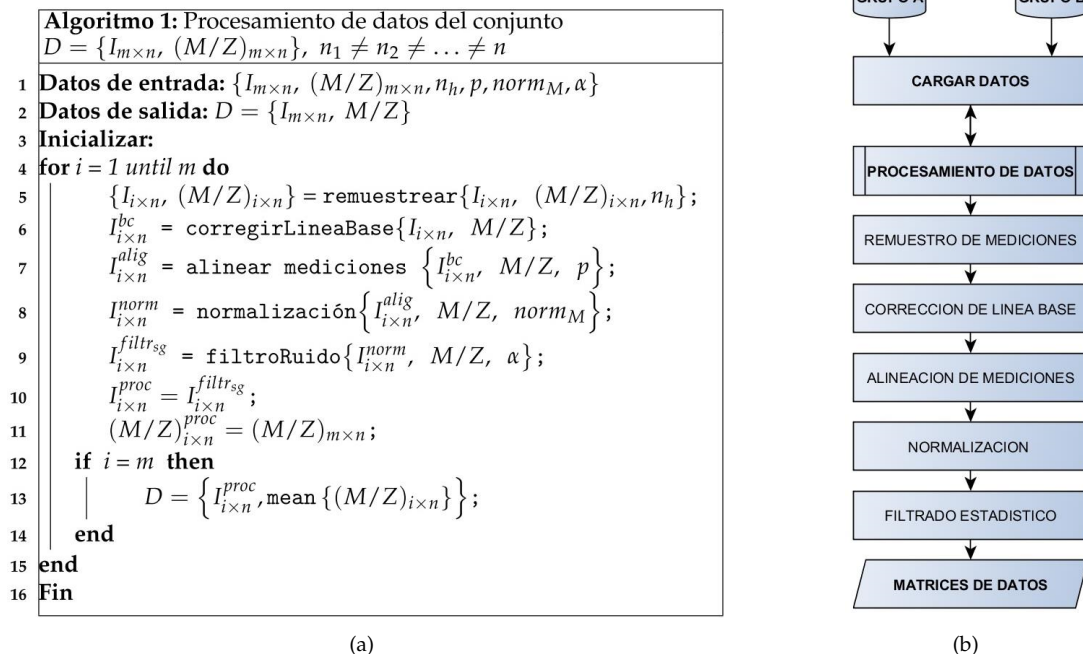


Figura 2. (a) Descripción Algorítmica y (b) Diagrama de Flujo del Procesamiento de Datos de Mediciones de EM

## 2.2 Selección de características discriminantes

Una vez disponible el conjunto de datos  $D$ , el siguiente paso a realizar es de entre todas las mediciones, encontrar un subconjunto de valores  $D^{red} = \{(m/z)_k, i_k\}, 1 < k < n$  en donde las intensidades y relaciones masa a radio  $k$ -ésimas deben ser estadísticamente significativas en base a criterios que prueben cuan elevado es el grado de discriminación intergrupal que estas poseen.

Para esta etapa se ha diseñado un filtro estadístico que combina la prueba de  $t$ -Student y  $U$ -Mann-Whitney. El criterio de estas dos pruebas resulta ser complementario, ya que la primera asume que los grupos analiza-

dos poseen una distribución de probabilidad gaussiana, mientras que la prueba de *Mann-Whitney* asume que la distribución de probabilidad de los grupos analizados es la misma, pero no impone la condición de que esta sea gaussiana [35].

El proceso de filtrado se realiza sometiendo los datos de los grupos de análisis  $G_1$  y  $G_2$  del conjunto  $D$  por separado a cada una de estas pruebas estadísticas. De la aplicación de estas pruebas se obtienen  $p$ -valores que definen la probabilidad de variación en los  $i_k$ -ésimos valores de intensidades de las mediciones  $M_m$ ,  $p$ -valores cuya probabilidad tienda a cero indicarán variaciones en cuyos valores de intensidad reside un alto poder de

discriminación intergrupar. Es muy complicado definir cuantos de estos valores son necesarios para definir los patrones de biomarcadores, sin embargo es posible estimar cuantos de estos valores disminuyen al máximo el error de discriminación intergrupar en base al uso de algoritmos de clasificación supervisada.

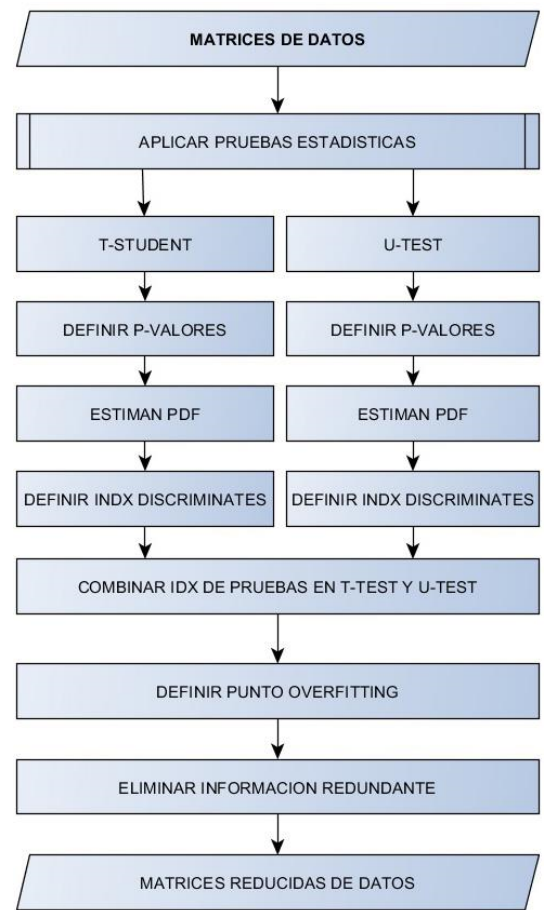
Los algoritmos de clasificación supervisada han sido ampliamente utilizados en las aplicaciones relativas al análisis de datos de espectrometría de masas [36–39]. Sin embargo algoritmos basados en la teoría de bayes, vectores de soporte de máquina, k-vecinos cercanos, e

incluso las redes neuronales exigen un procesamiento adicional para cambiar las características originales del conjunto  $D$  a las exigidas como parámetros de entrada de estos algoritmos. Este procesamiento adicional limita la cantidad de información que puede ser extraída de los conjuntos, ya que los grupos analizados deben ser estadísticamente suficientes, la matriz del conjunto de datos debe ser cuadrada, no negativa, e invertible. Estas limitaciones son solucionadas a través de los algoritmos basados en *Boosting-Learning* sobre árboles de decisión binarios.

**Algoritmo 2:** Selección de características discriminantes  $D = \{I_{m \times n}, M/Z\}$

- 1 **Datos de entrada:**  $D = \{I_{m \times n}, M/Z\}$
- 2 **Datos de salida:**  $D^{red} = \{I_{m \times red}, M/Z\}$
- 3 **Inicializar:**
- 4 Sea:  $G_1 = \{I_{m_1 \times n}, M/Z\}$  y  $G_2 = \{I_{m_2 \times n}, M/Z\}$ ,  $m = m_1 + m_2$ ;
- 5 Aplicar:  $t = \frac{\mu_{G_1} - \mu_{G_2}}{s \times \sqrt{\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2}}}$  y definir  $p_{t-student}$ -valor,  $s = \frac{(m_1 - 1)S_A^2 + (m_2 - 1)S_B^2}{m_1 + m_2 - 2}$ ;
- 6 Aplicar:  $U_1 = m_1 \times m_2 + \frac{m_1 \times (m_1 + 1)}{2} - R_1$ ,  $U_2 = m_1 \times m_2 + \frac{m_2 \times (m_2 + 1)}{2} - R_2$  y
- 7  $U = \min(U_1, U_2)$ ;  $R_1 = \sum_{i=0}^n (I_{m_1 \times i+1} + I_{m_1 \times i+1})$ ,  $R_2 = \sum_{i=0}^n (I_{m_2 \times i+1} + I_{m_2 \times i+1})$ ;
- 8 Definir índices de los elementos de los vectores:  $indx_t := p_{t-student}$  y  $indx_U := p_U$  y definir  $p_U$ -valor;
- 9 Ordenar ascendentemente:  $\{indx_t, p_{t-student}\}$  y  $\{indx_U, p_U\}$ ;
- 10 Estimar función de distribución acumulada (fda):  $fda(p_{t-student}^{ordenado})$  y  $fda(p_U^{ordenado})$ ;
- 11 Definir elementos de  $p_{t-student}^{ordenado}$  y  $p_U^{ordenado}$  cuya probabilidad tienda a cero:  $\eta_t$  y  $\eta_U$ ;
- 12 **Prueba de t-Student:**
- 13 Definir conjuntos de entrenamiento y pruebas:  $D_{entrenamiento-\eta_t} = \{I_{m_\epsilon \times n}(indx_t(\eta_t)), M/Z\}$ ;
- 14  $D_{prueba-\eta_t} = \{I_{m_\tau \times n}(indx_t(\eta_t)), M/Z\}$ ;
- 15  $m_\epsilon =$  mediciones de entrenamiento y ;
- 16  $m_\tau =$  mediciones de prueba;
- 17 **for**  $i = 1$  **until**  $\eta_t$  **do**
- 18  $int_x_{prueba} = indx_t(i)$ ;
- 19 Modelar clasificador;
- 20  $clasificadorAdaboost = modelarClasificador(\{I_{m_\epsilon \times n}(indx_t(i)), M/Z\})$ ;
- 21 Medir error de clasificación;
- 22  $errorClasificacion = errorClasificador(\{I_{m_\tau \times n}(indx_t(i)), M/Z\})$ ;
- 23  $errorClasificacion(i) = errorClasificacion$ ;
- 24 **if**  $errorClasificacion(i - 1) < errorClasificacion(i)$  **then**
- 25 Guardar punto de inflexión;
- 26  $banderaSalida = 1$ ;
- 27  $ptoInflexion_t = i$ ;
- 28 **if**  $banderaSalida = 1$  **then**
- 29 Terminar;
- 30 **end**
- 31 **end**
- 32 **end**
- 33 Definir pares  $\{((m/z)_k)$  con índices  $indx_t(1$  hasta  $ptoInflexion_t)$ ;

(a)



(b)

**Figura 3.** (a) Descripción Algorítmica y (b) Diagrama de Flujo del Proceso de Selección de Características Discriminantes

En cada una de las pruebas se producen dos vectores de  $p$ -valores independientes,  $p_1$  y  $p_2$ , de dimensión  $n$ . A continuación, con cada uno de estos vectores se estiman Funciones de Probabilidad, sobre las cuales se fija un valor aproximado  $\eta$  de pares de  $\{((m/z)_k, i_k)\}$ , cuya valor  $p$  tienda a ser cero. Luego para los  $p$ -valores de las dos pruebas estadísticas se modelan dos clasificadores binarios usando el algoritmo de Adaboost  $M.1$  en base a los grupos de análisis  $G_1$  y  $G_2$ , de donde se obtienen

de manera aleatoria las mediciones que formarán parte de los conjuntos de entrenamiento y prueba del clasificador modelado. En cada una de las pruebas, una vez establecida la estructura del clasificador, iterativamente se va cambiando la dimensión de los conjuntos de entrenamiento y prueba desde 1 hasta  $\eta$ , a fin de encontrar un punto de inflexión en  $\zeta$  pares de  $\{((m/z)_k, i_k)\}$  donde el error de clasificación sea mínimo antes de la presencia de infraentrenamiento o sobreentrenamiento en los

clasificadores. La resolución del paso de iteración dependerá de la capacidad computacional disponible, sin embargo, se puede partir de una resolución determinada e ir aumentándola, el punto de inflexión del error de clasificación no cambia, de esta forma se puede conseguir un número preciso de pares  $\{((m/z)_k, i_k)\}$  con un alto grado de discriminación intergrupar.

Aquí nace un nuevo subconjunto, fijado por el punto de inflexión del rendimiento de los clasificadores. En este nuevo subconjunto se desecharán las características que producen errores de clasificación, normalmente originadas por problemas de ruido que no pudo ser filtrado en etapas anteriores. En este punto se han definido zonas de biomarcación donde los pares de  $\{((m/z)_k, i_k)\}$  tienden a ser redundantes, para eliminar esta redundancia adicionalmente a los filtros se realizó un agru-

pamiento de datos en función del promedio de los índices de  $\{((m/z)_k)\}$  definidos por el punto de inflexión en  $\zeta$  pares. El agrupamiento se realiza buscando un número de grupos en función de las medias de cada una de las zonas marcadas anteriormente. En la última parte se toman los dos índices más cercanos a la media de las zonas marcadas desechando los demás. De esta forma se elimina información redundante y se fortalece el modelamiento de los clasificadores con un número de pares  $\{((m/z)_k)\}$  de un alto grado de discriminación intergrupar. Finalmente se combinan los índices de los pares  $\{((m/z)_k, i_k)\}$  de cada una de las pruebas estadísticas, obteniendo así el conjunto reducido de datos  $D^{red} = \{I_{m \times k}, M/Z\}$ . Este procedimiento se muestran en las Figuras 3 y 4.

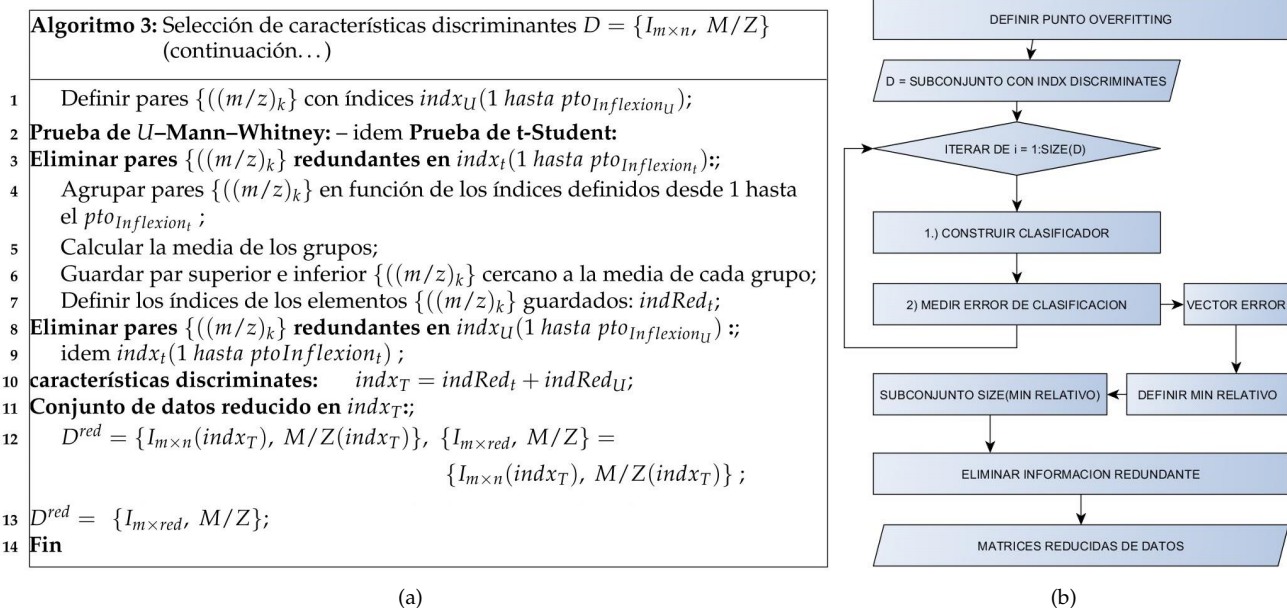


Figura 4. (a)Descripción Algorítmica y (b)Diagrama de Flujo del Proceso de Selección de Características Discriminantes (cont...)

### 2.3 Validación de características discriminantes

La validación de los patrones detectados en la sección anterior se hacen usando tres clasificadores independientes, Adaboost, TotalBoost y LPBoost, donde en cada uno de estos se medirán los errores de clasificación usando validación cruzada y adicionalmente pruebas con muestras externas. Esta etapa consiste básicamente en la modelación de los clasificadores usando el conjunto  $D^{red}$ , medir su rendimiento, eliminar los predictores deficientes, luego volver a evaluar el rendimiento de los clasificadores. El modelamiento de los clasificadores y la eliminación de predictores deficientes mejoran el rendimiento de los clasificadores modelados. El rendimiento final es comparado entre los tres clasificadores a fin de

medir la efectividad de los pares  $\{((m/z)_k, i_k)\}$  seleccionados en la sección anterior.

Adaboost se define básicamente como una metodología de aprendizaje mediante la cual se toma un algoritmo de clasificación sencillo y se la aplica iterativamente un número determinado de veces en forma secuencial, donde en cada iteración se mejora el error de clasificación, logrando rendimientos superiores a la aplicación de complejos algoritmos de clasificación. El algoritmo usado en esta etapa es la variante Adaboost.M1 usada en de conjuntos de datos de dos grupos. En este artículo, se aplica este algoritmo en función de las  $m$  disponibles, para lo cual, primeramente hay que separar el conjunto total  $D^{red}$  en 3 subconjuntos de for-



ma aleatoria, entrenamiento ( $m_T$ ), pruebas en validación cruzada ( $m_{VC}$ ) y pruebas externas ( $m_{VE}$ ). Una vez realizada esta separación, se asume las ( $m_T$ ) mediciones posee  $\{I_1, I_2, \dots, I_{m_T}\}$  vectores de intensidad asociadas a un predictor  $p$ , dichas intensidades están etiquetadas con un vector  $y = \{+1, -1\}$ , donde  $+1$  etiqueta las mediciones del grupo  $G_1$  y  $-1$  las mediciones del grupo  $G_2$ . El clasificador  $h((m_T))$  se obtendrá al entrenar un clasificador simple, en este artículo, un árbol de decisión de dos ramales o binario. El error de clasificación de  $h((m_T))$  estará definido por  $\epsilon = \frac{1}{m_T} \sum_{i=1}^{m_T} \mathcal{I}(y_i \neq h((m_T)))$ . La función  $\mathcal{I}(y_i \neq h((m_T)))$  es 1 si se hubo acierto en la clasificación y 0 si hubo error. Este proceso se repite  $\beta$  veces, donde el clasificador final  $\mathcal{H}$  será la combinación de todos los clasificadores  $h((m_T))_\beta$  en función de un vector de ponderación  $\mathcal{B}_\beta$ . El clasificador final estará definido por  $\mathcal{H}(h((m_T))) = \text{sign}(\sum_{i=1}^{\beta} \mathcal{B}_i h(m_T)_i)$ , en este caso la función signo define si el elemento clasificado pertenece al  $G_1$  o al  $G_2$  mediante el mapeo en  $y = \{+1, -1\}$  [33]. TotalBoost y LPBoost son dos variantes de Adaboost, que no necesitan el parámetro  $\beta$  para su entrenamiento, ya que buscan una solución óptima y limitan el número de interacciones en el entrenamiento de manera automática. Estos dos algoritmos son ideales para conjuntos limitados de datos, lo que los hace útiles en las aplicaciones estudiadas en este artículo, donde es muy difícil disponer de enormes cantidades de mediciones de EM. LPBoost en

comparación a Adaboost y Totalboost converge mas rápido hacia una solución final [40].

En la evaluación del rendimiento de esta etapa se usan dos métodos independientes, la validación cruzada y pruebas de clasificación usando muestras externas. El usar dos metodologías de evaluación del rendimiento en los clasificadores modelados robustece los resultados obtenidos. Una tendencia común a disminuir el error de clasificación en los tres clasificadores, indica que los datos escogidos tienen un alto grado de discriminación inter-grupal, el caso contrario en cualquiera de estas dos pruebas sera muestra suficiente sobre – entrenamiento o de infra – entrenamiento en el comportamiento de los clasificadores. Además de evidenciar los efectos del infraentrenamiento y sobreentrenamiento, la combinación de estas dos pruebas de rendimiento limitan encontrar falsos positivos o falsos negativos en las muestras analizadas, factor que resulta trágico en este tipo de aplicaciones. En la Figura 5 se presenta la aplicación de estos algoritmos en la metodología desarrollada en este artículo.

### 3. PRUEBAS DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA

Las pruebas de la metodología descrita en este artículo fueron realizadas en Matlab usando el *Bioinformatics Toolbox*, *Statistics Toolbox* y el *Optimization Toolbox*, en una plataforma de hardware con Windows 7, velocidad de procesamiento de 2,4[GHz] y 12[GB] de memoria RAM.

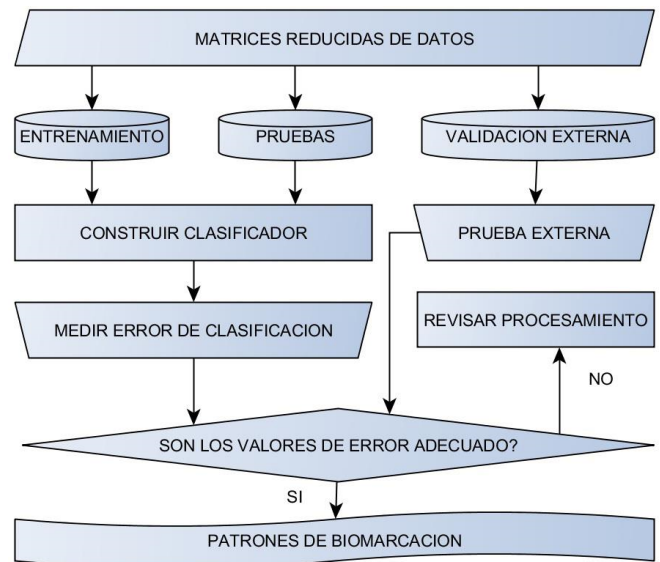
**Algoritmo 4:** Validación de los datos del conjunto  $D_{red} = \{I_{m \times red}, M/Z\}$

```

1 Datos de entrada:  $D^{red} = \{I_{m \times red}, M/Z\}, \beta$ 
2 Datos de salida:  $errorEntrenamiento, errorPruebaExterna$ 
3 Inicializar:
4   Dividir  $D^{red} = \{I_{m \times red}, M/Z\}$  en 3 subconjuntos;
5     entrenamiento  $D_{m_T}$ ;
6     pruebas en validación cruzada  $D_{m_{VC}}$ ;
7     y pruebas externas  $D_{m_{VE}}$ ;
8   Modelar clasificadores;
9    $clasificadorAdaboost = \mathcal{H}_{Adaboost.M1}(D_{m_T}, \beta)$ ;
10   $clasificadorTotalboost = \mathcal{H}_{Totalboost}(D_{m_T})$ ;
11   $clasificadorLPboost = \mathcal{H}_{LPboost}(D_{m_T})$ ;
12
13 Evaluar error de clasificación en cada clasificador usando validación cruzada:
14  $errorAdaboost_{VC} = \bullet_{Adaboost.M1}(D_{m_{VC}})$ ;
15  $errorTotalboost_{VC} = \bullet_{Totalboost}(D_{m_{VC}})$ ;
16  $errorLPboost_{VC} = \bullet_{LPboost}(D_{m_{VC}})$ ;
17
18 Evaluar error de clasificación en cada clasificador usando muestras externas;
19  $errorAdaboost_{VE} = \bullet_{Adaboost.M1}(D_{m_{VE}})$ ;
20  $errorTotalboost_{VE} = \bullet_{Totalboost}(D_{m_{VE}})$ ;
21  $errorLPboost_{VE} = \bullet_{LPboost}(D_{m_{VE}})$ ;
22
23 Guardar errores de clasificación;
24  $errorEntrenamiento = \{errorAdaboost_{VC}, errorTotalboost_{VC}, errorLPboost_{VC}\}$ ;
25  $errorPruebaExterna = \{errorAdaboost_{VE}, errorTotalboost_{VE}, errorLPboost_{VE}\}$ ;
26 Fin

```

(a)



(b)

**Figura 5.** (a) Descripción Algorítmica y (b) Diagrama de Flujo de la Validación de los Patrones de Biomarcación

Los resultados obtenidos se muestran a continuación divididos en la prueba de validación cruzada y pruebas de muestras externas respectivamente. En cada una de las curvas de error de clasificación mostradas, se puede

ver claramente que los resultados muestran resultados prometedores sobre la metodología, cuyo rendimiento es superior al 95 % en simulaciones validadas en forma cruzada.

### 3.1 Resultados usando validación cruzada

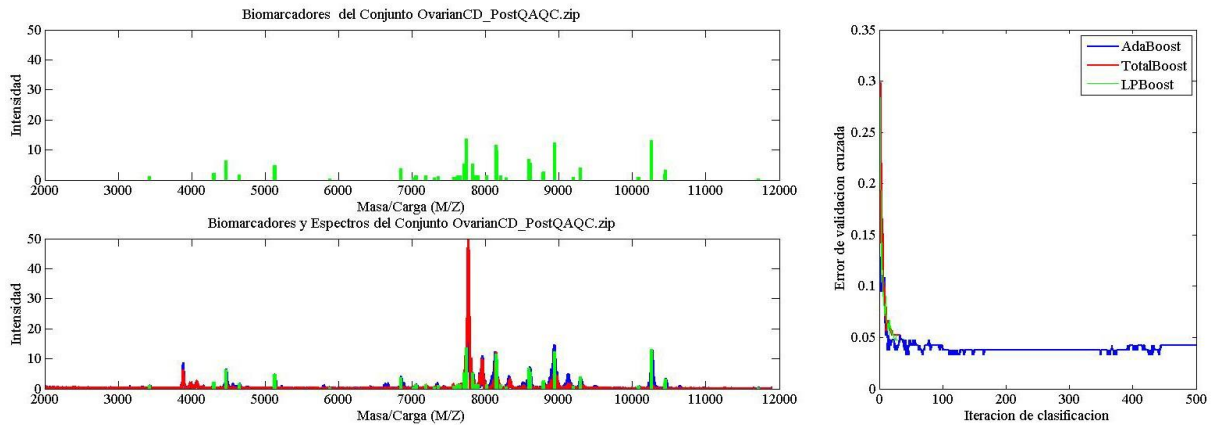


Figura 6. Patrones de Biomarcadores(54 pares detectados) – Conjunto OvarianCD\_PostQAQC.zip

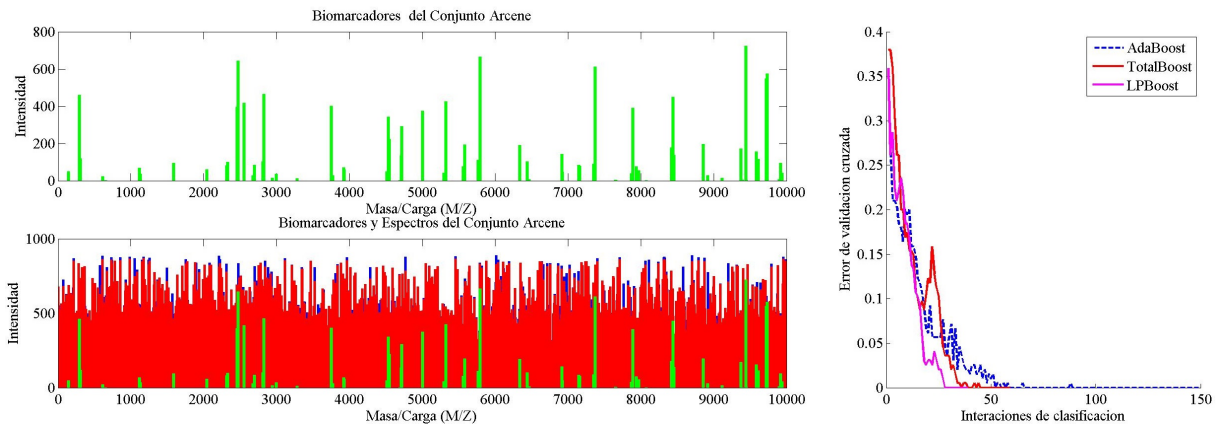


Figura 7. Patrones de Biomarcadores(93 pares detectados) – Conjunto Arcene

### 3.2 Resultados usando muestras externas

En las pruebas realizadas con muestras externas se realizaron clasificaciones de datos con los modelos generados obteniéndose los siguientes resultados:

Grupos	Clasificación Correcta	Clasificación errónea
Normal	28	1
Cancer	29	2

Cuadro 1. Conjunto OvarianCD\_PostQAQC5.zip

Grupos	Clasificación Correcta	Clasificación errónea
Grupo 1	305	5
Grupo 2	387	3

Cuadro 2. Conjunto Arcene

El error de clasificación en las pruebas realizadas con cada uno de los conjuntos analizados se calcula sumando el número de aciertos incorrectos y dividiendo esto para el número de aciertos correctos. Para OvarianCD\_PostQAQC5.zip y Arcene el error de clasificación obtenido fue de 5,263 % y 1,156 % respectivamente.

#### 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos al analizar los conjuntos *OvarianCD\_PostQAQC5.zip* y *Arcene* usando la metodología descrita en este artículo reflejan la efectividad de esta al alcanzar rendimientos superiores al 95 % de efectividad. Las curvas de medición de error usando validación cruzada reflejan además que los clasificadores modelados usando los datos del conjunto  $D^{red}$  poseen una gran resistencia a los efectos del infraentrenamiento y sobreentrenamiento, lo que disminuye la probabilidad de detección de falsos positivos o negativos.

#### 5. TRABAJOS FUTUROS

Debido a la versatilidad de la EM como técnica de adquisición de datos, así como también de la metodología propuesta en este trabajo, se plantean las siguientes líneas de investigación basadas en este artículo:

1. Complementar la metodología descrita en este trabajo con la traducción de los biomarcadores a proteínas y antígenos.
2. Análisis de la composición química de plantas medicinales usadas en el tratamiento de enfermedades crónicas. [41,42]. La EM permite obtener información muy precisa acerca de la composición química de las muestras analizadas, en base a bibliotecas de compuestos químicos disponibles en internet se puede aplicar la metodología propuesta en este trabajo para realizar búsquedas exhaustivas de estos compuestos en plantas medicinales endémicas de Ecuador [43].
3. Implementar la metodología usada en plataformas de supercomputación en donde se pueda controlar la dimensión del conjunto de datos analizados, pudiendo elevar la resolución de las mediciones de estos sin sacrificar el tiempo de procesamiento, memoria, ni otros recursos computacionales.

#### 6. CONCLUSIONES

- La metodología propuesta en este trabajo es sencilla y requiere una supervisión mínima. No es necesario definir arbitrariamente un número de posibles características del conjunto analizado, ya que

la metodología define por sí sola el número de posibles características de los patrones de biomarcadores.

- La combinación de la *t-test* y *Mann-Whitney U test* en el filtro estadístico propuesto en este artículo resulta poderosa a la hora de extraer información. Ambas pruebas estadísticas definen un número menor de zonas de interés en comparación a cuando se las combina. El número de zonas de interés definido por la combinación de estas técnicas ofrece una mayor cantidad de información sobre posibles patrones de biomarcadores, los cuales presentan mayor resistencia a los fenómenos de infraentrenamiento y sobreentrenamiento en el modelamiento de sistemas de clasificación de datos.
- La sencillez de la metodología presentada en este trabajo presenta cualidades para ser optimizada e implementada en plataformas basadas en tarjetas procesadoras gráficas. Los cálculos realizados son básicamente operaciones numéricas sobre matrices masivas.

#### REFERENCIAS

- [1] BAOLIN Wu, ABBOTT Tom, FISHMAN David, McMURRAY Walter, MOR Gil, STONE Kathryn, WARD David, WILLIAMS Kenneth y ZHAO Hongyu, *Comparison of statistical methods for classification of ovarian cancer using mass spectrometry data*, Bioinformatics Journal, Print ISSN 1367-4803. Online ISSN 1460-2059
- [2] WRIGHT Michael, HAN David, AEBERSOLD Ruedi, *Mass spectrometry-based expression profiling of clinical prostate cancer*, Molecular & Cellular Proteomics Journal, Print ISSN 1535-9476, Online ISSN 1535-9484.
- [3] PAULO A. Joao, KADIYALA Vivek, BANKS A. Peter, CONWELL L. Darwin, STTEN Hanno, *Mass Spectrometry-based Quantitative Proteomic Profiling of Human Pancreatic and Hepatic Stellate Cell Lines*, Genomics, Proteomics & Bioinformatics Journal, ISSN: 1672-0229.
- [4] CHO William C. S., YIP Timothy T. C., YIP Christine, YIP Victor, THULASIRAMAN Vanitha, NGAN Roger K. C., YIP Tai-Tung, LAU Wai-Hon, AU Joseph S. K., LAW Stephen C. K., CHENG Wai-Wai, MA Victor W. S., y LIM Cadmon K. P., *Identification of Serum Amyloid A Protein As a Potentially Useful Biomarker to Monitor Relapse of Nasopharyngeal Cancer by Serum Proteomic Profiling*, Clinical Cancer Research (CCR) Journal, Print ISSN: 1078-0432; Online ISSN: 1557-3265.
- [5] ZHANG Z, BAST RC Jr, YU Y, LI J, SOKOLL LJ, RAI AJ, ROSENZWEIG JM, CAMERON B, WANG YY, MENG XY, BERCHUCK A, VAN Haaften-Day C, HACKER

- NF, HW Bruijn DE, VAN der Zee AG, IJ Jacobs , ET Fung,DW Chan , *Three biomarkers identified from serum proteomic analysis for the detection of early stage ovarian cancer*, Cancer Research (CanRes) Journal, Print ISSN: 0008-5472; Online ISSN: 1538-7445.
- [6] Dr. PETRICOIN Emanuel F. PhD., ARDEKANI Ali M. PhD., HITT Ben A. PhD., LEVIANE Peter J. , FUSARO Vincent A., STEINBERG Seth M. PhD., MILLS Gordon B. MD., SIMONE Charles MD., FISHMAN David A. MD., KOHN Elise C. MD., LIOTTA Lance A. MD., *Use of proteomic patterns in serum to identify ovarian cancer*, The Lancet Journal ( Vol. 359, Issue 9306, Pages 572-577 ), ISSN: 0140-6736.
- [7] WADSWORTH J. Trad , MD.;SOMERS Kenneth D. PhD.; BRENDAN C. Stack, Jr, MD.;CAZARES Lisa, BS.; GUNJAN Malik, PhD.; BAO Ling Adam, PhD.;WRIGHT George L. Jr, PhD.; O. John Semmes, PhD., *Identification of Patients With Head and Neck Cancer Using Serum Protein Profiles*, JAMA Otolaryngology–Head & Neck Surgery Journal, Print: ISSN 2168-6181, Online: ISSN 2168-619X.
- [8] O. J. Semmes, L. H. Cazares, M. D. Ward, L. Qi, M. Moody, E. Maloney, J. Morris, M. W. Trosset, M. Hisada, S. Gygi y S. Jacobson, *Discrete serum protein signatures discriminate between human retrovirus-associated hematologic and neurologic disease*, Leukemia Journal, ISSN: 0887-6924, EISSN: 1476-5551.
- [9] FERRARI Lorenza , SERAGLIA Roberta , ROSSI Carlo Riccardo , BERTAZZO Antonella ,LISE Mario , ALLEGRI Graziella y TRALDI Pietro ,*Protein profiles in sera of patients with malignant cutaneous melanoma*Rapid Communications in Mass Spectrometry Journal, ISSN: 1097-0231.
- [10] WOODING Kerry M. y AUCHUS Richard J., *Mass spectrometry theory and application to adrenal diseases*, Molecular and Cellular Endocrinology Journal, ISSN: 0303-7207.
- [11] McDONALD Jeffrey G., MATTHEW Susan ,AUCHUS Richard J., *Steroid profiling by gas chromatography-mass spectrometry and high performance liquid chromatography-mass spectrometry for adrenal diseases*, Hormones and Cancer Journal, ISSN: 1868-8497 (print version) ISSN: 1868-8500 (electronic version).
- [12] LAPOLLA Annunziata, MOLIN Laura , and TRALDI Pietroi, *Protein Glycation in Diabetes as Determined by Mass Spectrometry*, International Journal of Endocrinology, ISSN: 1687-8337.
- [13] LAPOLLA Annunziata,FEDELE1 D. y TRALDI Pietroi, *Diabetes and mass spectrometry*, Diabetes/Metabolism Research and Reviews Journal, ISSN: 1520-7560.
- [14] LI Xiang , LUO Xiangxia , LU Xin, DUAN Junguo y XU Guowang , *Metabolomics study of diabetic retinopathy using gas chromatography–mass spectrometry: a comparison of stages and subtypes diagnosed by Western and Chinese medicine*, Molecular BioSystems Journal, ISSN: 1742-206X (print).
- [15] FERNANDEZ Llama P., *Aportaciones de la proteómica al estudio de las enfermedades cardiovasculares*, Revista Hipertensión y Riesgo Vascular, ISSN: 1889-1837.
- [16] CAO Yuan, HE Kun , CHENG Ming , SI Hai-Yani,ZHANG He-Lin, SONG Wei , LI Ai-Ling, HU Cheng-Jin , y WANG Na, *Two Classifiers Based on Serum Peptide Pattern for Prediction of HBV-Induced Liver Cirrhosis Using MALDI-TOF MS*, BioMed Research International Journal, ISSN: 2314-6133.
- [17] A. K. Batta, R. Arora, G. Salen, G. S. Tint, D. Eskreis y S. Katz, *Characterization of serum and urinary bile acids in patients with primary biliary cirrhosis by gas-liquid chromatography-mass spectrometry: effect of ursodeoxycholic acid treatment*, Journal of Lipid Research, ISSN 0022-2275.
- [18] MUSUNURI Sravanii , WETTERHALL Magnusl ,INGELSSON Martin , LANNFELT Lars , ARTEMENKO Konstantin ,BERGQUIST Jonas , Kúltima Kim , and SHEVCHENKO Ganna, *Quantification of the Brain Proteome in Alzheimer’s Disease Using Multiplexed Mass Spectrometry*, Journal of Proteome Research, ISSN: 1535-3893.
- [19] MATTHIESEN Rune and MUTENDA Kudzai E., *Introduction to Proteomics*, pp. 1-37, Mass spectrometry data analysis in proteomics / edited by Rune Matthiesen, ISBN-13: 978-1-58829-563-7.
- [20] FUSHIKI Tadayoshii, FUJISAWA Hironori y EGUCHI Shinto, *Identification of biomarkers from mass spectrometry data using a çommon”peak approach*, BMC Bioinformatics Journal, ISSN 1471-2105.
- [21] PHAM P., *A Novel Algorithm for Multi-class Cancer Diagnosis on MALDI-TOF Mass Spectra*, Bioinformatics and Biomedicin IEEE Journal, pages 398-401, ISBN 978-1-4577-1799-4, 12-15 Nov. 2011.
- [22] JELONEK Karol , ROS Malgorzata ,PIETROWSKA Monika, WIDLAK Piotr, *Cancer biomarkers and mass spectrometry-based analyses of phospholipids in body fluids*, Clinical Lipidology Journal, ISSN 1746-0875, pages 137-150, 2013/2.
- [23] PIETROWSKA M., JELONEK K., MICHALAK M., ROS M.,RODZIEWICZ P.,CHMIELEWSKA K ,POLAMSKI K ,POLANSKA J,KLOSOK A Gdowicz,GIGLOK M,SUWINSKI R,TARNAWSKI R , DZIADZIUSZKO R, RZYMAN W ,WIDLAK P, *Identification of serum proteome components associated with progression of non-small cell lung cancer*, Acta biochimica Polonica Journal, 2014/5.

- [24] G. A. GOWDA Nagana , ZHANG Shucha, GU Haiwei , ASIAGO Vincent , SHANAI AH Narasimhamurthy, y RAFTERY Daniel, *Metabolomics-Based Methods for Early Disease Diagnostics - A Review*, Expert Review of Molecular Diagnostics Journal, Sep 2008; 8(5): 617-633, ISSN 1473-7159.
- [25] TARAWNEH Sandra K. Al, BORDER Michael B., DIBBLE Christopher F., y BENCHARIT Sompop, *Defining Salivary Biomarkers Using Mass Spectrometry-Based Proteomics - A systematic review*, OMICS A Journal of Integrative Biology, ISSN: 1536-2310.
- [26] Dr. LEE Yu Hsiang, Phd. y Dr. WONG David T., DMD., DMSC. *Saliva - An emerging biofluid for early detection of diseases*, Am J Dent 2009;22:241-8.
- [27] KHADIR Abdelkrim and TISS Ali, *Proteomics Approaches towards Early Detection and Diagnosis of Cancer*, Carcinogenesis & Mutagenesis Journal, ISSN: 2157-2518.
- [28] GIL Alterovitz, RAMONI Marco F., *Systems Bioinformatics: An Engineering Case-based Approach*, cap. 4, Editorial: Artech House; Edición: Har/Cdr (1 de marzo de 2007), ISBN-10: 1857431820.
- [29] EIDHAMMER Ingvar, FLIKKA Kristian, MARTENS Lennart, MIKALSEN Svein-Ole, *Computational Methods for Mass Spectrometry Proteomics*, Wiley & Sons Publications, January 2008, ISBN: 978-0-470-51297-5.
- [30] EIDHAMMER Ingvar, BARSNES Harald, EGIL EIDE Geir, MARTENS Lennart, *Computational and Statistical Methods for Protein Quantification by Mass Spectrometry*, Wiley & Sons Publications, February 2013, ISBN: 978-1-119-96400-1.
- [31] TESSITORE Alessandra, GAGGIANO Agata, CICCARELLI Germanai, VERZELLA Daniela, CAPECE Daria, FISCHIETTI Mariafausta, ZAZZERONI Francesca, y ALESSE Edoardo, *Serum Biomarkers Identification by Mass Spectrometry in High-Mortality Tumors*, International Journal of Proteomics, Volume 2013 (2013), Article ID 125858, 15 pages, ISSN 1874-3919.
- [32] SAEYS Yvan, INZA Inaki y LARRANAGA Pedro, *A review of feature selection techniques in bioinformatics*, Bioinformatics Journal, ISSN 1460-2059, 2007.
- [33] HE Ping, *Classification Methods and Applications to Mass Spectrometry Data*, PhD. Thesis, Hong Kong Baptist University, 2005.
- [34] XU Q. , MOHAMED S.S. , SALAMA M.M.A., KAMEL M. y RIZKALLA K., *Mass Spectrometry-Based Proteomic Pattern Analysis for Prostate Cancer Detection Using Neural Networks with Statistical Significance Test-Based Feature Selection*, Science and Technology for Humanity (TIC-STH), 2009 IEEE Toronto International Conference.
- [35] GUYON, I., GUNN, S., NIKRAVESH, M., ZADEH, L.A., *Feature Extraction - Foundations and Applications*, pp. 90, Studies in Fuzziness and Soft Computing, Vol. 207, Springer Publications, ISBN 978-3-540-35488-8.
- [36] SINGH Ajit P. , HALLORAN John , BILMES Jeff A. , KIRCHOFF Katrin , NOBLE William S. , *Spectrum Identification using a Dynamic Bayesian Network Model of Tandem Mass Spectra*, Proceedings of the Twenty-Eighth Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence (UAI2012), ISSN 2159-5399.
- [37] BJM Webb-Robertson , *Support vector machines for improved peptide identification from tandem mass spectrometry database search*, Mass Spectrometry of Proteins and peptides: Methods in Molecular Biology Journal, Vol 146. Humana Press, New York, NY, ISSN 1064-3745.
- [38] WU Baolin, ABBOTT Tom, FISHMAN David, MCMURRAY Walter, MOR Gil, STONE Kathryn, WARD David, WILLIAMS Kenneth and ZHAO Hongyu., *Comparison of statistical methods for classification of ovarian cancer using mass spectrometry data*, March 6, 2003, Bioinformatics Journal, ISSN 1367-4803.
- [39] QU Yinsheng, ADAM Bao-Ling, YUTAKA Yasui, WARD Michael D., CAZARES Lisa H., SCHELLHAMMER Paul F., FENG Ziding, SEMMES O. John, and WRIGHT JR. George L., *Boosted Decision Tree Analysis of Surface-enhanced Laser Desorption/Ionization Mass Spectral Serum Profiles Discriminates Prostate Cancer from Noncancer Patients*, October 2002 vol. 48 no. 10 1835-1843, Clinical Chemistry Journal, ISSN 0009-9147.
- [40] NARSKY Ilya , PORTER Frank C., *Statistical Analysis Techniques in Particle Physics: Fits, Density Estimation and Supervised Learning*, Wiley-VCH; 1 edition (October 24, 2013), ISBN: 9783527677290 - 3527677291.
- [41] HETHELYI E., TETENYI P., DABI E, DANOS B., *The role of mass spectrometry in medicinal plant research*, Biological Mass Spectrometry Journal, Online ISSN: 1096-9888.
- [42] IDOYAGA Moliona Natilde y LUXARDO Natalia, *Medicinas no convencionales en cáncer*, Medicina (B. Aires) [online]. 2005, vol.65, n.5, pp. 390-394. ISSN 1669-9106.
- [43] MANZANO SANTANA Patricia , ORELLANA LEÓN Tulio , MARTÍNEZ MIGDALIA Miranda C., ABREU PAYROL C. Juan , RUÍZ Omar , PERALTA GARCÍA C. Esther L., *Algunos parámetros farmacognósticos de Vernonia patens (Kunth) H. Rob. (Asteraceae) endémica de Ecuador*, Rev Cubana Plant Med vol.18 no.1 Ciudad de la Habana ene.-mar. 2013, ISSN 1028-4796.

# A Multi-Level Thresholding Method based on Histogram Derivatives for Accurate Brain MRI Segmentation

## Un método de umbralización multinivel basado en derivadas del histograma para la segmentación precisa de imágenes cerebrales de RM

Pérez M.\*; Sánchez A.\*\*; Moreno B.\*\*; Nunes E.\*\*\*; Andaluz V.\*\*\*\*

\*Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial, Universidad Técnica de Ambato, Ambato (Ecuador)  
e-mail: maria.espanya@gmail.com

\*\*Departamento de Ciencias de la Computación, Universidad Rey Juan Carlos, 28933 Móstoles (Spain).  
e-mail: {angel.sanchez; belen.moreno}@urjc.es

\*\*\*Fundação CAPES, Ministério da Educação, 70047-900 Brasília (Brazil)  
e-mail: eldman.nunes@gmail.com

\*\*\*\*Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE  
vhandaluz1@espe.edu.ec

**Resumen:** Este trabajo describe la implementación y evaluación cuantitativa de un método automático para la segmentación precisa de imágenes cerebrales de resonancia magnética (RM). El método se basa en la umbralización adaptativa multinivel del histograma de la imagen con el fin de clasificarla en un número variable de clases de tejidos cerebrales. Inicialmente, se realiza una etapa de preproceso para eliminación de ruido y realzado de la imagen. Después, se calcula el histograma de la imagen que es suavizado usando un filtro piramidal. La derivada de dicho histograma se usa para determinar una lista de picos y valles en la correspondiente función. El número de clases de tejidos cerebrales a segmentar se corresponde al número de umbrales buscados en el histograma más uno, y dichos umbrales se determinan usando los valores los valles de la función derivada que minimizan los errores en la clasificación de los píxeles de la imagen. El método propuesto se usó para segmentar cuatro clases de tejidos en las imágenes cerebrales (materia blanca, materia gris, líquido cefalorraquídeo y fondo, respectivamente) correspondientes a un conjunto de imágenes sintéticas de resonancia magnética cerebral obtenidas usando la base de datos BrainWeb. El método propuesto se comparó con otros dos métodos de segmentación implementados: el primero basado en modelos de mezcla de gaussianas y el segundo basado en el algoritmo de las k medias. Nuestra propuesta produjo resultados de clasificación correcta por encima del 95%, que son equivalentes a los de los algoritmos comparados.

**Palabras clave:** Análisis de imágenes médicas; imágenes cerebrales de resonancia magnética; segmentación automática; umbralización multinivel; derivada de histograma; BrainWeb.

**Abstract:** This work describes the implementation and quantitative evaluation of an automatic and accurate brain magnetic resonance image segmentation method. This is based on adaptive multi-level thresholding to classify the images into variable number brain tissue classes of interest. The method includes a denoising and enhancement image preprocessing stage. After that, the image histogram is computed and smoothed using a pyramid filter. Then, this histogram is differenced to determine a list of peaks and valleys (i.e. local minima) on it. As the number of considered tissue classes to segment is the number of searched histogram thresholds plus one, the histogram thresholds were chosen using the values of valleys that minimize the classification errors. The proposed method was used to segment four tissue classes (i.e. white matter, gray matter, cerebrospinal fluid and background, respectively) in a collection of synthetic brain MR slice from BrainWeb database. The method was compared to other two implemented segmentation approaches: one based on Gaussian mixture models and other one based on k-means clustering. Our multi-level thresholding segmentation algorithm produced equivalent correct classification results (above 95%) than the other two compared methods of the literature.

**Keywords:** Medical image analysis; magnetic resonance (MR) brain images; automatic segmentation; multi-level thresholding; histogram derivative; BrainWeb.

### 1. INTRODUCTION

Current neuroimaging techniques allow researchers and doctors to detect the activity and/or possible complications

within the human brain without needing invasive neurosurgery [1]. There exists a number of safe imaging techniques accepted nowadays in hospitals throughout the world. Methods for creating structural and functional human brain images include among other ones: Electro-Encephalography (EEG), Magneto-Encephalography (MEG), Positron Emission Tomography (PET), Single-photon

emission computed tomography (SPECT), Transcranial Magnetic Stimulation (TMS), Structural Magnetic Resonance Imaging (MRI) and Functional Magnetic Resonance Imaging (fMRI) [1][2].

Structural magnetic resonance imaging (MRI) [3][4] is a radiology technique that uses magnetic fields, radio waves and computers to produce 2D or 3D high-quality images of certain body structures. A MRI scan has the advantage of avoiding the X-ray radiation exposure and with not known side effects. Moreover, MRI presents a precise accuracy in detecting structural abnormalities in the body internal organ being explored [2]. MR brain image segmentation into several tissue classes has significant interest to visualize and quantify individual anatomical structures. This segmentation task was first performed manually by the radiologist in a clinical environment and it could be difficult to reproduce. Currently, many different algorithms have been presented in the literature for the computerized segmentation of brain MR images (see for example [5], [6], [7] and [8]). However, the brain medical image segmentation is an open question [4], considering the variety of individual pathologies and the related clinical requirements for accuracy. The automatic brain segmentation methods (or the semi-automatic ones with minimal interaction for human operators) are still current topics of research for the cases of large number of tissue classes [9] or for some specific applications [10].

Image segmentation [11][12] is an essential process in most subsequent tasks of image analysis. The goal of image segmentation is to cluster its pixels into salient image regions that correspond as closely as possible with the objects in the scene. The segmentation result could be used for object recognition. In particular, many of the existing techniques for image description and recognition depend highly on the segmentation results.

Thresholding [11][12] is perhaps the simplest approach used for image segmentation. It allows separating the objects from the background in an image by using a threshold value to transform one gray-level image into a binary one. According to Sezgin and Sankur [13], these thresholding methods can be classified into six main categories: *histogram-based* where the peaks and valleys of the smoothed histogram are analyzed, *clustering-based* where the gray-level values are clustered in two groups (i.e. background and objects) or modeled as a mixture of two Gaussians, *entropy-based* that compute the entropy of the objects and background to separate both regions, *object attribute-based* that search a similarity measure between the gray-levels and the binarized images, *spatial methods* which use higher-order probability distribution of the pixels, and *local methods* which adapt the threshold value on each pixel to the local image characteristics.

The simpler thresholding methods only use one threshold value to extract the objects of interest, which in many situations, doesn't result to be a good segmentation of the image. Multi-level thresholding is an extension of this segmentation method category which uses several thresholds

and enables the partitioning of an image into multiple classes [14][12]. Several multi-level thresholding methods have been proposed in the literature. Tsai [15] suggests a method based on the conservation of moments of the histogram. Bolon et al. [16] present a thresholding method, based on distribution histograms of gray levels, which applies the minimization of the sum of inertia criterion to determine the thresholds between the different classes. Ritter and Wilson [17] describe an approach for multilevel segmentation that extends the bimodal approach proposed by Otsu [12]. Cheriet et al. [18] suggest a general recursive solution that is also an extension of Otsu's method. Three other thresholding approaches were proposed by Yan [19]: Yan-Otsu, Yan-Kittler and Yan-Huang methods, respectively, referred as a whole as the unified thresholding method by Yan. AboudNeta et al. [20] present a method, based on the division of the histogram into sub-regions, where a threshold is determined for each of these sub-regions. In general, many of these thresholding methods produced good segmentation results. However, some of the approaches demand a high processing time, which making these methods impractical when the number of thresholds used exceeds three for multi-class segmentation [21]. Other approaches are not fully automatic, requiring a prior knowledge of the classes in the histogram. Finally, other methods are sensitive to the uniformity of the histogram, which is a factor extremely important for the success in the segmentation. As the MRI images contain non-uniformities that introduce a substantial variability in the intensities of pixels from the same tissue class [22], these last methods are not applicable in many situations.

This paper presents an automatic and accurate multi-level thresholding method for brain MR image segmentation, which can handle successfully the abovementioned difficulties from other approaches. The proposed method is a substantial extension of a preliminary work [23] by the same authors. The rest of the paper is organized as follows. In Section II, the theoretical basis of the proposed multi-level thresholding method is briefly described. Moreover, this section sketches the two used segmentation algorithms for comparison purposes and it enumerates the performance metrics applied in the evaluation. In Section III, we describe the experimental framework for the qualitative and the quantitative validation of our method, and also compare it to other two implemented brain MRI segmentation methods. Finally, the conclusions of this study are drawn in Section IV.

## 2. MATERIALS AND METHODS

In this section, we first review histogram-based multi-level thresholding types and proposals. Next, the proposed multi-level thresholding method is explained. As this segmentation method is compared to two implemented segmentation approaches, these algorithms are summarized. Finally, we outline the quantitative evaluation metrics used to compare the presented brain MRI segmentation method with the other considered segmentation approaches.

## 2.1 Histogram-Based Multi-Level Thresholding

Segmentation by histogram thresholding is based in grouping image pixels into regions with different gray level ranges when choosing one or more thresholds to find the best separation among these regions. Thresholding is a simple but often effective image segmentation technique when the different image elements (i.e. objects and background) have contrasting intensities. In consequence, the image histogram can be partitioned into a number of peaks (where each one could correspond to an image region) and there exist some local minima or valleys between pairs of adjacent peaks where the histogram thresholds are located.

When selecting one single histogram threshold, the image objects are separated from the background. More formally, thresholding converts an input gray level image input image  $f(x,y)$  into an output binary image defined as follows:

$$g(x,y) = \begin{cases} 1, & \text{iff } f(x,y) \geq T \\ 0, & \text{iff } f(x,y) < T \end{cases} \quad (1)$$

where pixels labeled as 1 in  $g(x,y)$  can correspond to the objects (or to background), whereas pixels labeled as 0 correspond to the background (or to objects).

Several methods have been proposed to find the histogram peaks and then to select the threshold value as the minimal point between them, in order to obtain a better separation among regions. The main difficulty in automatic thresholding is to select an appropriate  $T$  value that produces the best segmentation result. However, due to the possibility of finding many possible local minimum values in the image histogram, the determination of relevant peaks and valleys can be a difficult problem.

When just one threshold is used to segment the image, the process is called global thresholding. However, in most cases the histograms of real images present more than two distinct peaks. The non-uniform image lighting conditions or the presence of noise, for example, can produce changes on the gray levels of the objects and on the background making the use of a single threshold inappropriate for the segmentation. In this case, better results can be obtained by analyzing the intensities of the pixels in an image region to determine several local thresholds. Global thresholding can be generalized to consider an arbitrary number of threshold values. In multi-level thresholding, the purpose is to determine several  $T_i$  values (where  $i > 1$ ) that effectively extract the different regions of interest (i.e. the objects) in the image, as illustrated in Figure 1.

Using multi-level thresholding using  $i=3$  threshold values, the image  $g(x,y)$  can be segmented as follows.

$$g(x,y) = \begin{cases} L_1, & \text{if } f(x,y) \leq T_1 \\ L_2, & \text{if } T_1 < f(x,y) \leq T_2 \\ L_3, & \text{if } T_2 < f(x,y) \leq T_3 \\ L_4, & \text{if } f(x,y) > T_3 \end{cases} \quad (2)$$

where:  $L_{i+1}$  are the four regions of pixels (i.e. the classes) obtained after the application of the three  $T_i$  thresholds. This is illustrated by the histogram example shown in Fig. 1.

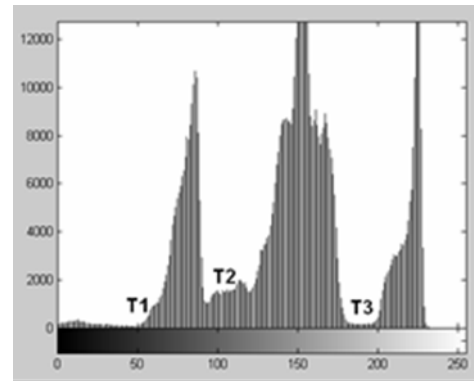


Figure 1. Multi-level thresholding example for  $i=3$

## 2.2 Proposed Segmentation Method

The proposed automatic and adaptive method for multi-level thresholding of a brain MR histogram image consists of two main stages: pre-processing and histogram thresholding, respectively.

In the *pre-processing stage*, the initial brain MR image is filtered with a Gaussian filter (with  $\sigma=0.5$  and kernel size of  $3 \times 3$ ) to reduce the impulsive noise. After that, a decorrelation stretch stage is applied on the result (using the decorrstretch function of MATLAB) as a way to enhance the image contrast. Next, the image histogram  $h$  is calculated and then smoothed using a pyramid filter  $p$  of size  $1 \times N$ , where  $N$  is defined by the user. The pyramid-type filter has the edges increased symmetrically in one unit until the central pixel, which has the largest value. For example, if  $N=5$  then the filter is defined as  $p = [1, 2, 3, 4, 5, 4, 3, 2, 1]$ . This filter is applied (i.e. convolved) to the image histogram in order to minimize the presence of shallow valleys and short peaks that could cause an excessive detection of histogram thresholds.

In the *histogram thresholding stage*, a one-dimensional array  $z$  is created by the derivative of the histogram  $h$  as follows:

$$z(i) = \begin{cases} 1, & \text{if } h(i+1) - h(i) < 0 \\ 0, & \text{if } h(i+1) - h(i) \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

where:  $h(i)$  and  $h(i+1)$  correspond to consecutive histograms bins.

After that, the derivative of  $z$  is computed as:



$$z'(i) = z(i) - z(i+1) \quad (4)$$

Two lists of the intensities in the histogram corresponding to the peaks  $PL$  (Eq. 5) and to the thresholds  $TL$  (Eq. 6) are determined next:

$$PL = \{i \mid (z'(i) = -1) \cap (0 \leq i \leq 255)\} \quad (5)$$

$$TL = \{i \mid (z'(i) = 1) \cap (0 \leq i \leq 255)\} \quad (6)$$

The number of possible classes in the segmented image is equal to the number of histogram thresholds increased by one. As the number of classes to be found in the brain MR image segmentation and also the minimal percentage of image pixel belonging to each class are known in advance, then a test is performed on each histogram class. The goal is to determine if each class contains this corresponding minimum percentage of pixels in relation with the image size. The threshold whose class fulfills this parameter for the class is accepted; otherwise, this threshold is rejected and the class is grouped to the next one in the histogram, so that all segmented classes finally contain the minimum percentage of pixels required.

Optionally, in a *post-processing* stage, it is possible to assign different colors to the pixel classes according to the list of thresholds produced. This way, as a final result, a color image representing the segmentation result can be returned. Fig. 2 summarizes the proposed multi-level thresholding algorithm for segmenting the brain MR images.

```

Inputs: I = Brain MR image
          N = Size of pyramid-type filter mask
          k = number of classes to segment the brain image I
          pk = minimum percentage of pixels in each segmented class k

Output: I' = Image with pixels labeled to one of classes

Algorithm:

I1 = RGB_Gray (I); //Convert image I into a gray level one
I2 = GaussianFilter (I1, Gσ); // Convolve I1 with a Gaussian filter Gσ to reduce
noise
I3 = ContrastEnhancement (I2); // Increase contrast of I2 by decorrelation
stretch
h = ImageHistogram (I3); // Compute image histogram of I3
pN = PyramidFilter (N); // Create a pyramid-based filter of size 1xN
h' = FilterHistogram (h, pN); // Smooth image histogram h with a filter
pyramid pN
z = DifferenceHistogram (h'); // Construct array z of the histogram
derivative
z' = SecondDifferenceHistogram (z); // Second derivative of the histogram
PL = PeaksList (z'); // Compute list of peaks of the smoothed histogram z'
TL = PeaksList (z'); // Compute list of thresholds of the smoothed histogram
z'
TL' = CheckHistogramClasses (z', k, pk, PL, TL); // Check histogram classes
to see if they have
// the minimum percentage (%) of pixels and
// to set the final list of thresholds TL'
I' = LabelClasses (I, TL') // Label pixel classes in final image I' using final
list of thresholds TL'

```

**Figure 2.** Pseudo-code of proposed histogram-based multi-level thresholding algorithm.

### 2.3 Other segmentation approaches considered

In this Subsection, we summarize the two other implemented brain MR image segmentation algorithms that will be compared to our proposed multi-level thresholding method on the same test images.

The first algorithm is an adaptation of the hybrid Bayesian segmentation and classification

approaches proposed by Mignotte et al [24]. This algorithm produced good results when segmenting brain SPECT images into three tissue classes: white matter, grey matter and cerebrospinal fluid, respectively. Both the segmentation and classification methods apply a Bayesian estimation stage to determine, from the training images, the parameters of a Gaussian Mixture Model (GMM) using the iterative Expectation-Maximization (EM) algorithm. The parameter estimation step, used in the segmentation, considers the diversity in the distribution mixture of the SPECT images. Next, a set of features extracted both from edge segmentation and from Gaussian mixture distribution are combined into a feature vector describing each image database. Mignotte et al. applied  $k$ -means clustering to classify these feature vectors into two brain classes: “healthy” and “diseased” ones. We adapted this approach for segmenting our brain MR images into four classes (i.e. by adding the background region to the three previous classes). Before estimating the parameters of the GMM for the brain segmentation, a pre-processing for the enhancement and denoising of the MR images was performed as follows. First, the image was multiplied by an appropriate scalar value to correct non-uniform illumination. Next, the difference between the application of the top-hat and bottom-hat morphological filters (a disk-shaped structuring element of size 5 was used for both filters) on the previous MR image was computed to increase the contrast. Finally, a decorrelation stretch stage was applied on the resulting image as a way to enhance the color differences in it.

The second brain MR image segmentation algorithm to be compared with our method uses the same pre-processing for the enhancement of MR images in the previous algorithm. After that, the  $k$ -means clustering procedure (with  $k = 4$ ) was applied separately to segment each color channel of the brain image. Finally, the three segmented channel are combined to produce the segmentation result.

### 2.4 Statistical Validation Metrics used for Evaluation

The classification errors of each segmentation method is determined by comparing the results produced by the manual segmentation created by the radiologist (and considered as ground truth) and by the automatic segmentation produced by each of the three implemented algorithms. The following quantitative measures were used to evaluate the quality of the tested brain MR segmentation methods: *Jaccard similarity coefficient (JC)* [25], *Positive Predictive Value (PPV)* or *Precision*, and *Accuracy (AC)*, respectively. Next, we summarize each of the considered evaluation metrics.

- Jaccard *similarity coefficient* ( $JC$ ):

In general, this coefficient determines the similarity between two sets, and it is defined as the size of the intersection divided by the size of the union of these sets. This measure can be adapted to compare two digital images  $RI$  and  $SI$ , with spatial resolution  $M \times N$ , as follows:

$$JC(RI, SI) = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \begin{cases} = 1, & \text{if } RI(i, j) = SI(i, j) \\ = 0, & \text{if } RI(i, j) \neq SI(i, j) \end{cases}}{M \times N} \quad (7)$$

The coefficient varies between zero when the compared images do not have any similarity and one when both images are identical.

- *Positive Predictive Value* ( $PPV$ ) or *Precision*:

Let  $TP$  and  $TN$  be the respective number of correctly classified pixels as positive and as negative ones after the segmentation task in the final image  $SI$ , and  $FP$  and  $FN$  the respective numbers of false positive and false negative pixels in this same image. The Positive Predictive Value ( $PPV$ ) or Precision is defined as follows:

$$PPV(SI) = \frac{TP_{SI}}{TP_{SI} + FP_{SI}} \quad (8)$$

- *Accuracy* ( $AC$ ):

In a similar form, the accuracy measure describes the ratio of positive cases (i.e. pixels) which were classified correctly.

$$AC(SI) = \frac{TP_{SI} + TN_{SI}}{TP_{SI} + TN_{SI} + FP_{SI} + FN_{SI}} \quad (9)$$

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

First, a short description of the brain images used in the experiments is presented. Next, we continue with the quantitative results achieved. These results are compared to other segmentation approaches using the same validation metrics. Finally, a short discussion on the results is given.

#### 3.1 Brain MRI Datasets.

The effectiveness of the proposed segmentation method was tested on the *Simulated Brain Database (BrainWeb)* [26][27] which is a database of realistically simulated MRI data volumes. This method was also compared to other two segmentation approaches implemented in this work (referred as *GMM method* and *k-means method*, respectively, in the experiments).

The MRI data volumes of the *BrainWeb* Database are produced by a MRI simulator developed in the McConnell Brain Imaging Centre of the Montreal Neurological Institute, at McGill University (Canada). Simulated brain MRI data can be based on two anatomical models: “normal” and “multiple sclerosis” ones. In our experiments, most of the images were created using the following MRI acquisition parameters: T1-w (weighting) mode, 1 mm thickness slices and resolution of  $181 \times 217 \times 181$  voxels (i.e.  $181 \times 217$  slice size), noise levels of 0% and 3%, and non-uniform intensity levels of 20%, repetition time (RT) equal to 18 ms and echo time (ET) equal to 10ms in an angle of 30 degrees at MINC stored in the 16 bit little endian format for integers.

#### 3.2 Experimental Results.

We present both qualitative (i.e. visual) and quantitative results for the *BrainWeb* images used, where the ground truth segmentation is known. The corresponding results on the same MR slices are compared for all the segmentation algorithms being tested.

Next, the qualitative results achieved with several slices (of the same MR volume) for the three segmentation method are shown. Four tissue classes are considered in the segmentation: white matter (WM), gray matter (GM), cerebrospinal fluid (CFS) and background (BG), respectively.

The results are also compared to the segmentation produced for each slice using the SPM8 tool [28]. SPM is a software analysis tool (suite of MATLAB) available for the interpretation of neuroimaging data. The SPM8 version was released in 2009 and it includes a segmentation algorithm (i.e. the *unified segmentation algorithm*) adapted from [29].

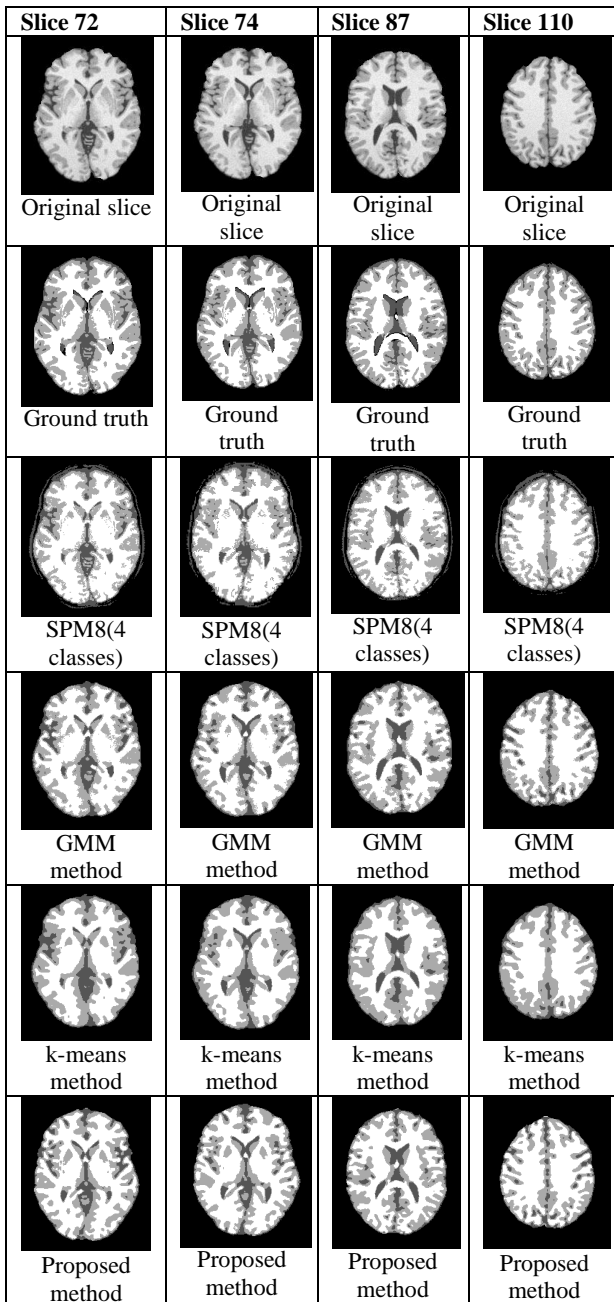
Figure 3 shows the 4-class segmentation results of different brain MR slices of the same volume acquired using *BrainWeb* database (for the T1-w MRI modality). Each column corresponds to one brain slice and, for each of them, the following images are visualized: original slice, corresponding ground truth image, segmentation produced by the SPM8 software (for 4 classes), and respective automatic segmentation produced by the GMM method, the *k-means* method and the proposed multi-level thresholding method.

In Figure 4 we visualize the segmentation results achieved with our proposed method for the same brain slice acquired using the respective weighted MRI modalities T1-w (i.e. longitudinal relaxation time) and T2-w (i.e. transverse relaxation time). The result produced by the pre-processing (i.e. denoising and contrast enhancement) stage of the multi-level thresholding method is shown in the third column in this figure. It can be noticed that the proposed algorithm achieved accurate segmentation results for both modalities.

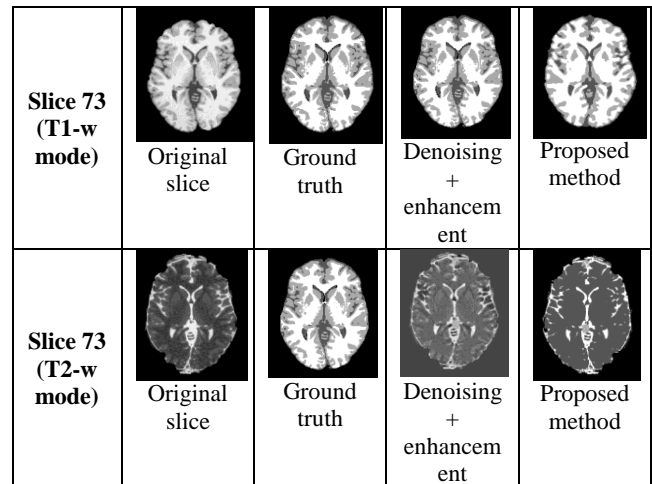
Quantitative results corresponding to the statistical validation metrics described in the previous section are presented next.

These results, shown by Table 1, correspond to the three segmentation methods experimented.

It can be noticed that the proposed multi-level thresholding algorithm produces very similar results to the other two compared ones (GMM and k-means, respectively) with respect to three considered metrics. Moreover, our method outperforms in average the SPM8 segmentation for these metrics as follows: 1.88% using Jaccard coefficient, 5.35% in precision and 3.5% in accuracy, respectively.



**Figure 3.** Visual comparison of the different implemented segmentation methods (where each column corresponds to a brain slice): original slice, ground truth, SPM8 segmentation, and respective GMM, *k*-means and proposed multi-level thresholding automatic segmentation results



**Figure 4.** Segmentation results produced by our multi-level thresholding algorithm for the same brain slice acquired under the weighted MRI T1-w and T2-w modalities.

**Table 1.** Quantitative results produced by the compared segmentation methods.

Slice	Metric	SPM8	GMM method	<i>k</i> -means method	Proposed method
72	Jaccard	0.9561	0.9801	0.9831	0.9760
	Precision	0.9221	0.9727	0.9786	0.9699
	Accuracy	0.9220	0.9626	0.9682	0.9551
74	Jaccard	0.9574	0.9817	0.9848	0.9767
	Precision	0.9246	0.9750	0.9810	0.9713
	Accuracy	0.9245	0.9657	0.9714	0.9566
87	Jaccard	0.9625	0.9838	0.9862	0.9763
	Precision	0.9303	0.9765	0.9818	0.9707
	Accuracy	0.9303	0.9683	0.9728	0.9540
110	Jaccard	0.9681	0.9878	0.9886	0.9873
	Precision	0.9296	0.9930	0.9958	0.9932
	Accuracy	0.9296	0.9712	0.9732	0.9702

### 3.3 Discussion.

Several authors consider that segmentation methods based on Gaussian Mixture Models (GMM) produce good results in the automatic segmentation of brain MR images [30][31][32].

In particular, those models which are based on finite mixtures. With the addition of the preprocessing stage, the proposed automatic segmentation algorithm is works well on difficult images that originally present a low contrast (i.e. the quantitative segmentation metrics on the test MR slices produce similar results than those achieved by the GMM method).

Moreover, the denoising and contrast enhancement preprocessing stages included by our method clearly improve the original image quality and make the histogram analysis task much more manageable.

Additional favorable comparisons with the unified segmentation algorithm (implemented in SPM) also give value to the algorithm proposed in this work. For the three

analyzed metrics, correct classification results above 90% were achieved for all the images tested with our method. In this sense, the results on the precision and the accuracy metrics above 60% on smaller brain structures and above 80% on large structures make our algorithm applicable on real clinical brain MR images.

#### 4. CONCLUSIONS

This paper presented a multi-level thresholding segmentation method applied to brain MR images. The method includes a denoising and enhancement pre-processing stage to improve quality of the original images. After that, the image histogram is computed, and detection of peaks and valleys through the derivative of the smoothed histogram was fast and flexible making it possible the effective location of the multiple thresholds in an unsupervised form.

Our method produced accurate segmentation results (i.e. above 95% of precision and accuracy on the tested brain slices) which are equivalent to the other two compared algorithms, and better than those produced by the SPM software on the same test images. The method was also successfully experimented using brain slices acquired under the two weighted MRI T1-w and T2-w modalities.

These achieved results make the proposed segmentation method applicable on real clinical images as a future work. Moreover, as the presented method remains sufficiently general, as another future work we aim to apply it to other types of images (i.e. SPECT) or to other medical data classification problems (i.e. for breast tissues).

#### ACKNOWLEDGEMENTS

The authors gratefully thank the institutional support provided by the PrometeoProgramme, the SENESCYT and the DIDE-UTA (Ecuador). We also thank the UTA-Ecuador Research Project 2340-CU-P-2013 and the Spanish Ministry of Science and Innovation Project TIN-29827-C02-01.

#### REFERENCIAS

- [1] P.A. Bandettini. "What's new in neuroimaging methods?". *Ann. N.Y. Acad. Sci.* 1156, pp. 260–293. New York. USA. 2009.
- [2] P. Bright (ed). "Neuroimaging Methods". InTech. 358 pp, ISBN: 978-953-51-00973. 2012.
- [3] E. Pagani, A. Bizzi, F. di Salle, N. de Stefano and M. Filippi. "Basic concepts of advanced MRI techniques". *Journal of the Neurological Sciences.* 29(3), pp. 290-295. 2008. ISSN: 0022-510X. DOI: 10.1007/s10072-008-1001-7.
- [4] S. Bauer, R. Wiest, L.-P Nolte and M. Reyes. "A survey of MRI-based medical image analysis for brain tumor studies". *Physics in Medicine and Biology.* 58(13), pp. 97-129. 2013. ISSN: 0031-9155. DOI:10.1088/0031-9155/58/13/R97
- [5] Y. Zhang. M. Brady and S. Smith. "Segmentation of Brain MR Images through a Hidden Markov Random Field Model and the Expectation-Maximization Algorithm". *IEEE Transactions on Medical Imaging.* 20(1), pp. 45-57, 2001. ISSN: 0278-0062. DOI: 10.1109/42.906424.
- [6] R.A. Heckemann, J.V. Hajnal, P. Aljabar, D. Rueckert and A. Hammers. "Automatic anatomical brain MRI segmentation combining label propagation and decision fusion". *NeuroImage.* 33(1), pp. 115–126. 2006. ISSN: 1053-8119. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2010.01.072.
- [7] A.T. Thankam and A.K.S. Viji. "Abnormality Segmentation of MRI Brain Images using Fuzzy Nearest Neighbour Approach". *International Journal of Computer Applications* 67(19), pp. 6-12. 2013. ISSN: 0975 - 8887. DOI: 10.5120/11501-7215.
- [8] A. Ortiz, J.M. Gorriz, J. Ramirez and D. Salas-Gonzalez. "Unsupervised Neural Techniques Applied to MR Brain Image Segmentation". *Advances in Artificial Neural Systems.* Vol. 2012, 7 pages. 2012. ISSN: 1687-7594. DOI: /10.1155/2012/457590.
- [9] A. Zavaljevski, A.P. Dhawan, M. Gaskil, W. Ball and J.D. Johnson. "Multi-level adaptive segmentation of multi-parameter MR brain images". *Computerized Medical Imaging and Graphics.* 24(2), pp. 87-98, 2000. ISSN: 0895-6111. DOI: 10.1148/rg.282075083.
- [10] P.D. Sathya and R. Kayalvizhi. "Optimal segmentation of brain MRI based on adaptive bacterial foraging algorithm". *Neurocomputing.* 74(14-15), pp. 2299-2313. 2011. ISSN: 0925-2312. DOI: 10.1016/j.neucom.2011.03.010.
- [11] R.C. Gonzalez and R.E. Woods. "Digital Image Processing". Prentice Hall, Third Edition, Upper Saddle River, New Jersey, USA. ISBN: 9780131687288. 2008.
- [12] M. Sonka, V. Hlavac and R Boyle. "Image Processing, Analysis, and Machine Vision", Second Edition. PWS Publishers, Pacific Grove, USA. ISBN: 1133593607. 2000.
- [13] M. Sezgin and B. Sankur. "Survey over image thresholding techniques and quantitative performance evaluation". *Journal of Electronic Imaging.* 13(1), pp. 146–165. 2004. ISSN: 1017-9909. DOI: 10.1117/1.1631315.
- [14] D. M. Tsai and Y. H. Chen. "A fast histogram-clustering approach for multilevel thresholding". *Pattern Recognition Letters.* 13(4), pp. 245-252, 1992. ISSN: 0167-8655. DOI: 10.1016/0167-8655(92)90075-B.
- [15] W. Tsai. "Moment-Preserving Thresholding: A New Approach". *Computer Vision, Graphics and Image Processing.* 29, pp. 377-393. 1985. ISSN: 0734-189X. DOI: 10.1145/321119.321123.
- [16] P. Bolton et al. "Image Analysis: Filtering and Segmentation" (In French). Ed. Masson. Paris. France. 1995.
- [17] G.X. Ritter and J.N. Wilson. "Handbook of computer vision algorithms in image algebra". CRC Press, Boca Raton, USA. ISBN: 0849326362. 1996.
- [18] M. Cheriet, J.N. Said and C.Y. Suen. "A Recursive Thresholding Technique for Image Segmentation". *IEEE Transactions on Image Processing.* 7(6), pp. 918-921, 1998. ISSN: 1057-7149. DOI: 10.1109/83.679444.
- [19] H. Yan. "Unified Formulation of a Class of Image Thresholding Techniques". *Pattern Recognition.* 29(12), pp. 2025-2031. 1996. ISSN: 0031-3203. DOI: 10.1016/S0031-3203(96)00050-7

- [20] S. R. AboudNeta, L. V. Dutra and G. J. Erthal. "Automatic Thresholding in Multi-Modal Histograms" (In Portuguese). Proc. 7th Brazilian Conference on Dynamics, Control and Applications. Sao Paulo. 2008.
- [21] C.C. Chang and L.L. Wang. "A Fast Multilevel Thresholding Method Based on Lowpass and Highpass Filtering". Pattern Recognition Letters. 18, pp. 1469-1478. 1997. ISSN: 0167-8655. DOI: 10.1016/S0167-8655(97)00134-7.
- [22] E. Fletcher, O. Carmichael, and C. DeCarli. "MRI Non-Uniformity Correction through Interleaved Bias Estimation and B-Spline Deformation with a Template". Proc. Intl. Conf. IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. pp. 106-109. San Diego (USA). 2012.
- [23] E. de O. Nunes and G. Perez. "Medical Image Segmentation by Multilevel Thresholding Based on Histogram Difference". Proc. 17th International Conference on Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP '10). pp. 284-287. Rio de Janeiro, Brazil. 2010.
- [24] M. Mignotte, J. Meunier, J.-P. Soucy, and C. Janicki. "Segmentation and classification of brain SPECT images using 3D Markov random field and density mixture estimations". Proc. 5th World Multi-Conf. Systemics, Cybernetics and Informatics. Orlando. USA. Vol. X, pp. 239-244. 2001.
- [25] P. Sneath and R. Sokal. "Numerical Taxonomy: The Principles and Practice of Numerical Classification". Freeman. San Francisco. USA. ISBN: 0-7167-0621-0. 1973.
- [26] BrainWeb: Simulated Brain Database. URL: brainweb.bic.mni.mcgill.ca/brainweb. Accessed: 15-04-2014.
- [27] C.A. Cocosco, V. Kollokian, R.K.-S. Kwan and A.C. Evans. "BrainWeb: Online Interface to a 3D MRI Simulated Brain Database". NeuroImage. 5(4), p. 425, 1997. ISSN: 1053-8119. DOI: 10.1.1.51.3917.
- [28] Statistical Parametric Mapping (SPM). SPM8 Release Notes. 2009. URL: <http://www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm/software/spm8/> Accessed: 15-03-2014.
- [29] J. Ashburner and K.J. Friston. "Unified segmentation". NeuroImage. 26, pp. 839-851. 2005. ISSN: 1053-8119. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2005.02.018.
- [30] [30] M. A. Balafar, A.R. Ramli, M.I. Saripan and S. Mashohor. "Review of brain MRI image segmentation methods". Artificial Intelligence Review. 33(3), pp 261-274. 2010. ISSN: 0269-2821. DOI :10.1007/s10462-010-9155-0.
- [31] Z. Ji, Y. Xia, Q. Sun, Q. Chen, D. Xia and D.D. Feng. "Fuzzy local Gaussian mixture model for brain MR image segmentation". *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*. 16(3), pp. 339-347. 2012. ISSN. 1089-7771. DOI: 10.1109/TITB.2012.2185852.
- [32] María G. Pérez, "Métodos de eliminación de ruido y segmentación de tejidos cerebrales en imágenes médicas de resonancia magnética nuclear," Ph.D. dissertation, Dept. of Computer Science, Rey Juan Carlos Univ., Madrid, Spain, 2012.

## Diseño de una Red para Brindar Acceso a Internet a las Instituciones Educativas del Cantón Pujilí

**Caiza M. J.\*; Proaño C. E.\*\*; Jiménez M. S.\*\*\***

\*Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica

Quito, Ecuador (Tel: 593-3-2724-499; e-mail: majito-cs@hotmail.com)

\*\*Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica

Quito, Ecuador (Tel: 593-2-2531-623; e-mail: ceduardopm@hotmail.com)

\*\*\*Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica

Quito, Ecuador (Tel: 593-7-4051-000; e-mail: maria.jimenez@epn.edu.ec)

**Resumen:** Este artículo presenta el diseño de una red para brindar acceso a Internet a las instituciones educativas del cantón Pujilí. En primera instancia se realiza una comparación de tecnologías alámbricas e inalámbricas aplicables a las condiciones del cantón, después se analiza las condiciones socioeconómicas y geográficas de cada parroquia para definir el tipo de tecnología que será empleada en cada sector; también se analiza la situación de las instituciones educativas para determinar los requerimientos de la red. En base a los resultados se calcula el presupuesto de potencia; para los enlaces de acceso, distribución y núcleo se determina la capacidad de transmisión; luego se seleccionan los equipos y elementos necesarios. Para la red inalámbrica se define la ubicación de las estaciones base y estaciones suscriptoras. Adicionalmente, se realiza el diseño del NOC (Network Operation Center).

**Palabras clave:** Fibra Óptica, Comunicaciones Ópticas, WiMAX, Redes Inalámbricas.

**Abstract:** This paper shows the design of a network to provide Internet to the main educational institutions of Pujilí. First a comparison of wired and wireless technologies was done, this was based on geographical and socioeconomic characteristics of each parish of Pujilí. Then the best technology for each sector was defined. Also the technological situation of schools was analyzed for determining the network requirements. With these results, power budget was calculated. For access, distribution and core links, the capacity of transmission was obtained; then the equipment and devices were selected. For wireless network the location of the base stations and subscriber stations was defined. Finally the design of NOC (Network Operation Center) was done.

**Keywords:** Fiber Optic, Optical Communications, WiMAX, Wireless Networks.

### 1. INTRODUCCIÓN

El cantón Pujilí presenta una situación climática, geográfica, económica y social muy variada. Al realizar un recorrido por el cantón, se pudo evidenciar que en la zona rural la mayoría de obras que han realizado las autoridades, se han enfocado a proyectos de vialidad, agricultura y sobretodo se ha intentado priorizar las necesidades más básicas de los habitantes; y, dadas las condiciones climáticas extremas y el difícil acceso especialmente para la zona rural, no resulta atractivo para las empresas de telecomunicaciones brindar sus servicios, ya que se requiere una gran inversión inicial.

Se realizó este proyecto, de carácter eminentemente técnico y con un fin social, que permitirá satisfacer una necesidad prioritaria y poner la ingeniería al servicio de los sectores menos favorecidos, con el objetivo principal de fomentar el acceso a la información a la población del cantón y que contribuya al desarrollo del proceso de enseñanza - aprendizaje en las instituciones educativas del cantón Pujilí, mediante el uso de la tecnología.

### 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

#### 2.1 Tecnologías Inalámbricas

Algunas de las tecnologías inalámbricas que podrían ser utilizadas en el diseño de la red; considerando las condiciones geográficas y económicas del cantón Pujilí son: WiMAX[4][8], WiFiy VSAT. A continuación en la Tabla 1 se presentan sus principales características.

De la comparación realizada en las Tablas 1 y 2, se puede observar que WiMAX presenta mejores características, además de sus ventajas adicionales, como son: el uso de antenas inteligentes, mantenimiento económico y compatibilidad con protocolos de transporte variados; que pueden facilitar la elaboración de un diseño de red, por lo que en caso de requerir de una tecnología inalámbrica, se optará por WiMAX.

**Tabla 1.** Ventajasy desventajas deWiMAX, WiFi y VSAT

Tecnología	Ventajas	Desventajas
WiMAX	Costo de instalación bajo. Fácil administración y rápida implantación. Mantenimiento de la red económico. Escalable Seguridad mediante autenticación de usuarios y encriptación de datos. Infraestructura que soporta multiservicios. Compatible con protocolos de transporte. Manejo de antenas inteligentes.	Potencia limitada para evitar interferencias. Dispositivos con alto consumo de potencia en el estándar móvil (802.16e). En algunos países aún no existe una normativa legal para su implementación
WiFi	Trabaja en bandas no licenciadas. Evita el uso de un sistema cableado. Compatibilidad entre marcas Soporta roaming.	Susceptible a interferencias WEP ( <i>WiredEquivalentPrivacy</i> ), fue el primer protocolo de seguridad inalámbrica, fácilmente violado.
VSAT	Tecnología multiservicio Permite llegar a lugares de difícil acceso. Fácil administración de la red. Niveles de disponibilidad promedios de 99,5% con un BER de 10 <sup>-7</sup> . Costos de operación de red constantes.	Alta inversión inicial. Presenta retrasos e interferencias. Red dependiente del satélite. Transmisión de datos insegura.

**Tabla 2.** Distancias y velocidadesparatecnologías inalámbricas

Tecnología	Distancia	Velocidad
WiMAX (802.16d)	5 a 10 km aprox. (alcance máximo de unos 50 km)	Hasta 70 Mbps con canales de 10 MHz
WiFi (802.11n)	49 metros	300 Mbps

## 2.2 Tecnologías Alámbricas

Las tecnologías alámbricas son utilizadas principalmente en las zonas urbanas y unas pocas se han diseñado para sectores rurales o de bajos recursos económicos. El medio de transmisión cableado presenta varias ventajas, entre las que destacan su mayor seguridad y robustez frente a interferencias externas. Sin embargo, las tecnologías alámbricas también presentan desventajas como mayores costos de instalación y mantenimiento; además, en este tipo de medio de transmisión disminuye la flexibilidad y la movilidad de los usuarios.

A continuación, en las Tablas 3 y 4 se presenta una comparación de las tecnologías alámbricas que podrían ser implementadas en el cantón Pujilí: *ADSL*[3], *PLC* y *FTTx*[6][7].

En base al análisis de las características técnicas de las tecnologías presentadas en las Tablas 3 y 4, se observa que *FTTx* tiene mayores ventajas y supera a las otras opciones en capacidad de transmisión y en cobertura.

**Tabla 3.** Ventajas y desventajas de PLC, ADSL y FTTx

Tecnología	Ventajas	Desventajas
PLC	Proceso de instalación sencillo y rápido para el cliente final. Combina servicio eléctrico e Internet las 24 horas Solo necesita un equipo de conexión conocido como modem PLC.	Problemas técnicos al llevar la tecnología a producción. Requiere filtros que impidan interferencia de la señal eléctrica con la de datos.
ADSL	Soporte para servicios implementados sobre ATM o sobre TCP/IP ( <i>Transmission Control Protocol/IP</i> ). Emplea el cable utilizado para las comunicaciones telefónicas. Internet y Telefonía de manera simultánea. Separa la troncal de datos de la de voz evitando congestiones. Costos de implementación económicos.	Es necesaria una línea telefónica para implementar el servicio. Velocidad de subida baja. No toda línea telefónica puede soportar el servicio. Susceptible a fallas en el cableado del usuario final.
FTTx	Cambios en la capacidad de enrutamiento de tráfico bajo demanda La fibra óptica es inmune a la interferencia electromagnética. Tecnología en continuo desarrollo. Expandible. Transparente (acepta todo tipo de tráfico) Soporta QoS	Costo de mantenimiento elevado Sensible a fallos de equipos principales.

**Tabla 4.** Velocidades y distancias tecnologías alámbricas

Tecnología	Distancia	Velocidad
ADSL (ADSL2+)	2.5 Km	24 Mbps
PLC	300 m	45 Mbps
PON (GPON)	20 Km	Hasta 2.5 Gbps

Si bien el costo de la inversión inicial es alto, ya que se debe realizar el tendido de fibra desde cero, se trata de una tecnología robusta vigente a nivel comercial, contrario a *PLC*, la cual al momento de ser puesta en producción presentó problemas para soportar gran cantidad de usuarios simultáneos; encambio *ADSL* requiere de un proveedor que brinde el servicio telefónico a donde se quiera llegar con conectividad de datos, por lo que está limitada en ciertos sectores.

También se debe considerar que una red de fibra óptica es fácilmente escalable y con un mantenimiento adecuado tiene un tiempo de vida útil que compensa el costo inicial.

Por todo lo mencionado, se considera a la fibra óptica como la mejor opción para el diseño entre las tecnologías alámbricas presentadas.

## 2.3 Consideraciones de Diseño de Radioenlaces

Para elaborar un diseño de red robusto y confiable se deben considerar algunas variables: condiciones geográficas y tecnológicas del cantón, para determinar las zonas que requerirán tecnología alámbrica o inalámbrica para sus conexiones, la distancia de transmisión, el ancho de banda que tendrá el canal de datos, la tasa de bits errados, los

límites de atenuación del enlace, potencia necesaria para la transmisión, la escalabilidad de la red, la topología de la misma, etc.[1].

Para conseguir un diseño adecuado es necesario realizar diferentes análisis y cálculos a fin de determinar el equipo que mejor se adapte a las condiciones del radioenlace.

Un modelo de propagación predice las pérdidas de potencia y el comportamiento de las ondas en un ambiente determinado. El modelo ITM (*Irregular Terrain Model*) es utilizado por el software Radio Mobile, con el cual se realizará el cálculo de los enlaces.

Se deben también determinar las zonas de Fresnel a fin de conocer la altura ideal en la cual se deben colocar el emisor y el receptor para poder realizar un enlace confiable; este cálculo depende íntegramente de la frecuencia y distancia para las cuales se vaya a diseñar el enlace.

#### 2.4 Conceptos Básicos de Fibra Óptica

Existen varias ventajas de los sistemas de fibra óptica: alta velocidad de transmisión, baja atenuación, inmunidad a la interferencia electromagnética (EMI, *Electromagnetic Interference*) y de radiofrecuencia, alto grado de seguridad, menor degradación de la señal y gasto de energía que en un alambre de cobre, flexibilidad, etc.

Sin embargo, el costo de los equipos es elevado y se requiere de personal especializado para realizar el mantenimiento e instalación, los costos de la inversión inicial son altos en comparación con las tecnologías de cobre y al ser un medio guiado su implementación se ve limitada a ciertos lugares.

Existen dos maneras de transmitir la señal a través de la fibra óptica. Cuando la luz es guiada por una sola trayectoria (monomodo) y cuando es enviada a través de varias trayectorias (multimodo).

Para fibras multimodo la atenuación es superior a la de las fibras monomodo, estando en el orden de las décimas a unidades de dB/Km. Este parámetro limita el alcance de una transmisión.

La dispersión modal la de mayor consideración en las fibras multimodo y la dispersión cromática en las monomodo. Este parámetro limita el ancho de banda y consecuentemente la velocidad de transmisión.

Entre los principales componentes que intervienen en un enlace óptico se tienen: transmisores y receptores ópticos, multiplexores y demultiplexores de longitud de onda, filtros, aisladores, conectores, acopladores, atenuadores, conmutadores, entre otros.

### 3. SITUACIÓN ACTUAL DE LOS CENTROS EDUCATIVOS DEL CANTÓN PUJILÍ

#### 3.1 Datos Generales del Cantón

El cantón Pujilí se encuentra ubicado en la provincia de Cotopaxi, a 10 Km del costado occidental de la ciudad de Latacunga, en el centro del Ecuador. En la Fig. 1 se muestra la división política del cantón.

#### 3.2 Descripción de las Parroquias del Cantón [2]

A continuación se presentan las condiciones geográficas, climáticas, tecnológicas y sociales de cada parroquia.

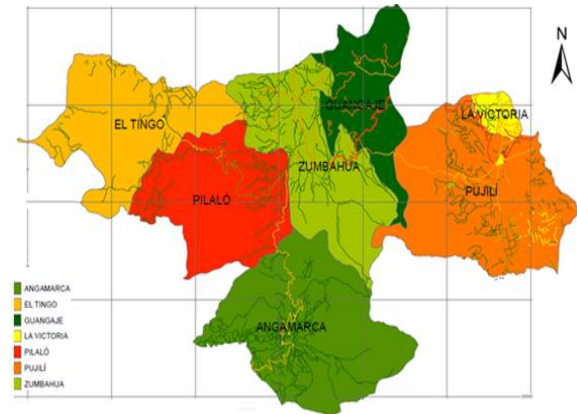


Figura 1. Mapa de división política de Pujilí

#### 3.2.1 La Matriz

Es la cabecera cantonal de Pujilí, la zona urbana se caracteriza por tener las mejores estadísticas en cuanto a servicios básicos, en contraste la zona rural presenta una situación similar o incluso peor a las de las parroquias más lejanas.

#### 3.2.2 La Victoria

Es la parroquia más pequeña del cantón Pujilí, Las principales instituciones ubicadas en el centro de la parroquia cuentan con la mayor cantidad de alumnos y disponen de Internet a través de CNT. Las instituciones ubicadas en El Tejar y Collantes reciben Internet por medio del MINTEL, a través de enlaces radiales brindados por el proveedor MEGADATOS.

#### 3.2.3 Zumbahua

En esta parroquia, el MINTEL ha brindado Internet a varias instituciones, a través de radioenlaces o VSAT. En el centro de la parroquia se encuentra la Unidad Educativa del Milenio “Cacique Tumbalá”, a donde asiste la mayor parte de la población estudiantil, incluso de las parroquias vecinas (Pilaló, El Tingo-La Esperanza y Guangaje); esto se debe a que cuenta con herramientas actualizadas de educación como laboratorios de computación, Internet, pizarras virtuales, salones de consulta, laboratorios de ciencias naturales, etc.

#### 3.2.4 Guangaje

La escuela “Leopoldo N. Chávez” ubicada en la zona central de la parroquia cuenta con Internet a través de VSAT, implementado como parte de un proyecto que está llevando a cabo el MINTEL, pero que no abarca a todas las escuelas de la parroquia.

#### 3.2.5 Pilaló

Durante la visita a las instituciones de la parroquia se pudo apreciar que todas poseen energía eléctrica, a excepción de la institución “José Joaquín de Olmedo”. La infraestructura de las demás escuelas está bastante deteriorada, los maestros no cuentan con material didáctico actualizado y algunos establecimientos son unidocentes. Además existen instituciones como la “Sin Nombre de Chilca”, ubicada en la



comunidad de Chilca y “Miguel Valverde” ubicada en la comunidad Redrován, en donde no existe acceso vehicular y las vías se encuentran en mal estado. Ninguna institución cuenta con Internet y solo los establecimientos José Joaquín de Olmedo, Juan Manuel Ayala y Gral. Condorazo poseen computadores.

### 3.2.6 El Tingo – La Esperanza

Al realizar las visitas se pudo confirmar que las instituciones educativas de la parroquia no cuentan con recursos modernos como son computadores o acceso a Internet para poder complementar la educación que reciben los estudiantes.

### 3.3 Análisis de Datos

Se determinó el número real de instituciones que recibirán el servicio de Internet; para esto se consideró que con el paso de los años han desaparecido los establecimientos educativos, “América” y “Milton Borja” ubicados en la parroquia La Matriz y, una institución sin nombre ubicada en la parroquia Pilaló. Por otro lado no se consideró las escuelas de la Parroquia Angamarca, porque no existen vías de acceso a las mismas, adicionalmente fue imposible llegar a las instituciones Sin Nombre de Unacota en la parroquia Zumbahua y Ciudad de Santo Domingo en la parroquia Guangaje; ya que su situación geográfica y climática impidió el acceso a esas zonas. En base a lo cual el número total de planteles educativos a considerar en el diseño es 142.

El MINTEL se encuentra realizando proyectos de este nivel, por tanto se tomará en cuenta varias de las recomendaciones y requisitos determinados por esta institución para la realización de presente proyecto.

En la parroquia La Matriz se creará una ruta de fibra que irá desde las oficinas del GADMCP; en donde se encontrará el NOC; hasta el límite entre La Matriz y Guangaje, siguiendo la vía Latacunga – Pujilí – La Maná. Este tendido será el backbone principal de la red, aproximadamente tendrá 8 Km de longitud. No obstante, estos criterios podrían ser modificados durante la fase de diseño.

Por la poca cantidad de escuelas, pequeña extensión geográfica y cercanía a La Matriz, se tomará a la parroquia La Victoria como parte del sector rural. Para esta zona se utilizarán radioenlaces con tecnología WiMAX dependientes de la ruta de fibra central; para los casos más lejanos y complicados se tendrán repetidoras conectadas hacia las escuelas más cercanas que cuenten con acceso a Internet, de manera que se pueda brindar cobertura a la mayoría de instituciones.

El acceso de las instituciones educativas a la red también dependerá de las condiciones existentes en las mismas; para los establecimientos ubicados en la zona urbana se buscará llegar con acceso de fibra óptica; y, para la zona rural se necesitará recurrir en la mayoría de los casos a accesos inalámbricos, para lo cual se usará la misma tecnología con enlaces multipunto, tratando de utilizar la menor cantidad de repetidoras para dar servicio a todas las escuelas.

Para Zumbahua, Guangaje, El Tingo – La esperanza y Pilaló, se diseñará un backbone basado en WiMAX, el cual

convergerá con el backbone principal de fibra, en el punto límite entre La Matriz y Guangaje.

## 4 DISEÑO DE LA RED

En esta sección se realizará el diseño de cada capa de la red en base a tecnología escogida; los requerimientos y parámetros de diseño utilizados están basados en las especificaciones que planteen tanto el MINTEL como los estándares aprobados para cada tecnología.

### 4.1 Consideraciones sobre el crecimiento de la Red

Al ser una red estudiantil no sigue un patrón lineal y el número de computadores de cada institución será equivalente al número de usuarios; generalmente no es común para las instituciones educativas de cantones marginales adquirir frecuentemente nuevos computadores y es por esto que para el tiempo de vida útil de la red, el crecimiento será imperceptible.

### 4.2 Dimensionamiento de la Red

Para calcular la capacidad de canal necesaria, son consideradas las aplicaciones que serán utilizadas y la capacidad requerida por cada una de ellas (ver Tabla 5), el número de usuarios simultáneos que se conectarán a la red y el porcentaje de uso de cada aplicación.

Tabla 5. Capacidad requerida por las aplicaciones

SERVICIO	CAPACIDAD REQUERIDA
Correo electrónico	53.27 Kbps
Navegación Web	135.65 Kbps
Transferencia de archivos	341.33 Kbps
Mensajería instantánea	2 Kbps
Video bajo demanda	256 Kbps

El porcentaje de uso de las aplicaciones depende del patrón de uso que los estudiantes dan a la red, estos datos se obtuvieron de los docentes y autoridades de cada plantel. Los porcentajes se presentan en la Fig.2.

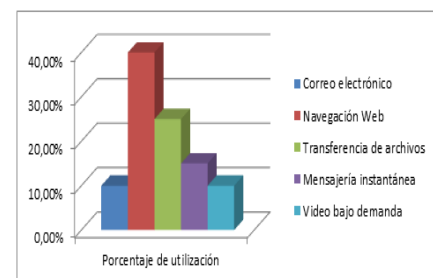


Figura 2. Porcentaje de utilización de las aplicaciones

Otro factor importante a considerar es el número de usuarios simultáneos que utilizarán la red, este valor depende de la fase de su hora de clases (ver Tabla 6), puesto que durante los primeros minutos se dedican a entregar tareas, revisar correo, etc.. Para los cálculos se utilizará el promedio, 78.75%.

**Tabla 6.** Porcentaje de utilización por intervalo de tiempo

Intervalo de tiempo (min)	% de Utilización
0-10	100
10 – 30	70
30 – 80	55
80- 90	90

Una vez determinados los valores necesarios, se puede calcular el número de usuarios simultáneos en base a:

$$U_s = U_t * \% \text{simultaneidad} * \% \text{uso aplicación}$$

$U_s$  = Usuarios Simultáneos,  $U_t$  = Usuarios totales

% simultaneidad = Factor de simultaneidad

% de uso de aplicación = Porcentaje de uso por aplicación

### 4.3 Capacidad Requerida Teórica

Para calcular la capacidad requerida real, un proveedor de servicios maneja tres tipos de conexiones; corporativa, empresarial y residencial, las cuales están claramente diferenciadas por los valores de MIR, CIR y SLA. Para elegir el tipo de conexión más conveniente en el diseño de la red, se realizó un análisis del tipo y modo de trabajo de las instituciones educativas del cantón Pujilí. En base a esto se establecieron 4 clases de instituciones: pequeñas, medianas, grandes y la institución educativa Cacique Tumbalá por ser un caso especial debido a que cuenta con 3 laboratorios y mayor cantidad de alumnos. Realizada esta división se pudo determinar el nivel de compartición de las instituciones educativas (ver Tabla 7).

**Tabla 7.** Compartición en instituciones educativas

TAMAÑO	TIPO	CAPACIDAD TEÓRICA	COMPARTICIÓN
Pequeña	1 docente	1 Mbps	6:1
	2 ó 3 docentes	1 Mbps	6:1
Mediana	1 paralelo/año	1 Mbps	6:1
		1.5 Mbps	4:1
		2 Mbps	4:1
		2.5 Mbps	2:1
	2 paralelos/año	2.5 Mbps	2:1
		3 Mbps	2:1
Grande	3 paralelos/año	3 Mbps	Dedicadas
	4 paralelos/año	4.5 Mbps	Dedicadas
		6 Mbps	Dedicadas
		6.5 Mbps	Dedicadas
		9.5 Mbps	Dedicadas

En base a esta información la capacidad real de canal sería:

- Instituciones pequeñas:

$$Capacidad_{UNIDOCENTES} = 1 \text{ Mbps} * \frac{46}{6} = 7.67 \text{ Mbps} \quad (1)$$

$$Capacidad_{2 \text{ ó } 3 \text{ DOCENTES}} = 1 \text{ Mbps} * \frac{43}{6} = 7.17 \text{ Mbps} \quad (2)$$

- Instituciones medianas:

$$Capacidad_{1 \text{ PARALELO}} = \left(1.5 \text{ Mbps} * \frac{12}{4}\right) + \left(2 \text{ Mbps} * \frac{15}{4}\right) + (2.5 \text{ Mbps}) = 14.5 \text{ Mbps} \quad (3)$$

$$Capacidad_{2 \text{ PARALELOS}} = \left(2.5 \text{ Mbps} * \frac{5}{2}\right) + \left(3 \text{ Mbps} * \frac{6}{2}\right) = 15.25 \text{ Mbps} \quad (4)$$

- Instituciones grandes:

$$Capacidad_{3 \text{ PARALELOS}} / \text{AÑO} = 3 \text{ Mbps} * 1 = 3 \text{ Mbps} \quad (5)$$

$$Capacidad_{4 \text{ PARALELOS}} / \text{AÑO} = (4.5 \text{ Mbps} * 3) + 6 \text{ Mbps} + 6.5 \text{ Mbps} + 9.5 \text{ Mbps} = 35.5 \text{ Mbps} \quad (6)$$

Para los planteles pequeños y medianos se tendrá una conexión residencial 6:1, 4:1 ó 2:1. Para los grandes se tendrá una conexión empresarial, en planteles que requieren hasta 4.5 Mbps (CIR=3 Mbps y MIR=4.75 Mbps). Por último para los 3 establecimientos que requieren mayor capacidad se necesitará de una conexión dedicada. Sin embargo estos valores podrán variar dependiendo si son enlaces de fibra o radiales.

### 4.4 Diseño de la Red

Las instituciones del cantón Pujilí se encuentran dispersas a través de toda la extensión geográfica. Se realizó la simulación que permita encontrar los puntos donde se podrían ubicar las torres de comunicación, las cuales utilizarán antenas sectoriales u omnidireccionales. Se escogieron las frecuencias: 2.4 GHz para el acceso y 5.8GHz para el backbone.

#### 4.4.1 Ubicación de las torres

Los lugares de ubicación de las torres de backbone y repetidores, con sus respectivos equipos de comunicación, fueron determinados con el software Radio Mobile.[5]

Existen instituciones en las cuales no fue posible encontrar línea de vista hacia ninguna repetidora, en estos casos, se decidió que en lugar de utilizar una torre para cada plantel aislado, se le brindará el servicio a través de otro plantel.

Para evitar el diseño lineal de la red WiMAX, se decidió colocar cuatro enlaces redundantes en lugares estratégicos, ya que las condiciones topográficas del terreno no permiten una redundancia total, además de que los costos de la red serían muy elevados. No obstante, para las torres que brinden acceso a Internet a varias instituciones educativas es crucial contar con un enlace de respaldo, que se habilite manualmente desde la administración de la red cuando falle el principal.

#### 4.4.2 Cálculo de enlaces inalámbricos

Para el cálculo de enlaces inalámbricos se deben considerar algunos parámetros, los que se mencionan a continuación y se incluyen las fórmulas de cálculo de los mismos, que se utilizaron para el diseño de cada uno de los radioenlaces:

- Pérdidas de línea

$$L_L = L_c + L_{pg} + L_{ac} + L_b \quad (7)$$

Dónde:

$L_L$  = Pérdidas de línea,  $L_c$  = Pérdidas del cable

$L_{pg}$  = Pérdidas de *pigtail*,  $L_{ac}$  = Pérdidas por acoplamiento

$L_b$  = Pérdidas en el branching

- Pérdidas de propagación

$$L_p = 32.44 + 20 \log_{10} d + 20 \log_{10} f \quad (8)$$

Dónde:

$L_p$  = Pérdidas por trayectoria en dB

$d$  = Distancia en Km,  $f$  = Frecuencia MHz

- Potencia de Receptor

$$P_r = P_t + G_t + G_r - L_{Lr} - L_{Lt} - L_p \quad (9)$$

Dónde:

$P_r$  = Potencia del receptor,  $P_t$  = Potencia del transmisor

$G_t$  = Ganancia del receptor,  $L_{Lr}$  = Pérdida de línea del receptor

$L_{Lt}$  = Pérdida de línea del transmisor,  $L_p$  = Pérdida por trayectoria

- Margen de desvanecimiento

$$F_m = 30 \log d + 10 \log(6A \cdot B \cdot f) - 10 \log(1 - R) - 70 \quad (10)$$

$F_m$  = Margen de desvanecimiento

$d$  = Distancia (Km),  $A$  = Factor de rugosidad

$B$  = Factor Climático,  $f$  = Frecuencia (Hz)

$1-R$  = Factor de confiabilidad del enlace

- Sensibilidad de receptor

$$S = P_r - F_m \quad (11)$$

$S$  = Sensibilidad del receptor en dBm

$P_r$  = Potencia del receptor,  $F_m$  = Margen de desvanecimiento

Si el valor obtenido teóricamente supera el valor máximo que se ha encontrado en equipos existentes en el mercado; se deben modificar los valores de potencia y/o ganancia del transmisor y del receptor, respetando la normativa de potencias vigente en el Ecuador.

- Margen de umbral

$$M_u = P_r - S \geq F_m \quad (12)$$

$M_u$  = Margen de Umbral,  $P_r$  = Potencia de recepción

$S$  = Sensibilidad del receptor,  $F_m$  = Margen de desvanecimiento

A continuación se realizará un ejemplo de cálculo del presupuesto de potencias de los enlaces inalámbricos para las peores condiciones en un enlace de backbone:

#### 4.4.3 Cálculo de enlace TP02 - R03

Se toma el enlace TP02 - R03 que presenta la mayor distancia; considerándose para las operaciones:  $d = 8.40$  Km y  $f = 5800$  MHz.

- Pérdida de Propagación (8)

$$L_p = 32.44 + 20 \log_{10}(8.40) + 20 \log_{10}(5800) = 126.19 \text{ dB} \quad (13)$$

- Pérdidas de Línea

Para el caso analizado se ha considerado que ningún cable tendrá más de un metro de longitud, por lo que se tomará el valor de 1 dB para las pérdidas por cable y de 0,2 dB para las pérdidas por acoplamiento. Según (7):

$$L_L = 1 + 0.4 + 0.2 + 0.4 = 2 \text{ dB} \quad (14)$$

- Potencia del Receptor

Se considera una ganancia de 20 dBi con una potencia de salida de 27 dBm para las antenas en los enlaces de backbone, ya que existen fabricantes como Airmax, Alvarion, Aperto, etc. que poseen equipos con este tipo de características. Según (9):

$$P_r = 27 \text{ dBm} + 20 \text{ dBi} + 20 \text{ dBi} - 2 \text{ dB} - 2 \text{ dB} - 126.19 \text{ dB} = -63.19 \text{ dBm} \quad (15)$$

- Margen de Desvanecimiento

Por ser un enlace en clima tropical se han tomado  $A = 1$  y  $B = 0.5$ . Para el caso de enlaces ubicados en la sierra con condiciones climáticas más adversas y un terreno rugoso, se tomarán  $A = 0.25$  y  $B = 0.25$ . De acuerdo a (10):

$$F_m = 30 \log(8.4) + 10 \log(6 \times 1 \times 0.5 \times 5800) - 10 \log(0.0001) - 70 = 40.13 \text{ dB} \quad (16)$$

Una vez obtenido este valor, se podrá determinar la sensibilidad teórica del receptor, lo que permitirá realizar una comparación con valores reales de sensibilidad de equipos en el mercado y así determinar si el enlace es viable con las condiciones que se han manejado.

- Sensibilidad del receptor (11)

$$S = -63.19 \text{ dBm} - 40.13 \text{ dB} = -103.32 \text{ dBm} \quad (17)$$

El valor obtenido teóricamente supera el valor máximo que se ha encontrado en equipos existentes en el mercado; para resolver este inconveniente se deben modificar los valores de potencia y/o ganancia del transmisor y del receptor, respetando la normativa de potencias vigente en el Ecuador; por lo que se utilizará  $P_t = 30$  dBm y  $G_t = G_r = 20.3$  dBi.

A continuación se presentan los cálculos con los valores de potencia y ganancia modificados:

- Potencia del Receptor

$$P_r = 30 \text{ dBm} + 20.3 \text{ dBi} + 20.3 \text{ dBi} - 2 \text{ dB} - 2 \text{ dB} - 126.19 \text{ dB} = -55.59 \text{ dBm} \quad (18)$$

- Sensibilidad del receptor

$$S = -55.59 \text{ dBm} - 40.13 \text{ dB} = -95.73 \text{ dBm} \quad (19)$$

Sensibilidad existente en equipos del mercado, por lo que estos valores serán los definitivos para este enlace. Según (12):

$$M_u = -55.59 - (-96) \geq F_m$$

$$M_u = 40.41 \text{ dBm} \geq 40.13 \text{ dBm} \quad (20)$$

En conclusión el enlace entre TP02 - R03 es viable.

Simulación del enlace TP02-R03:

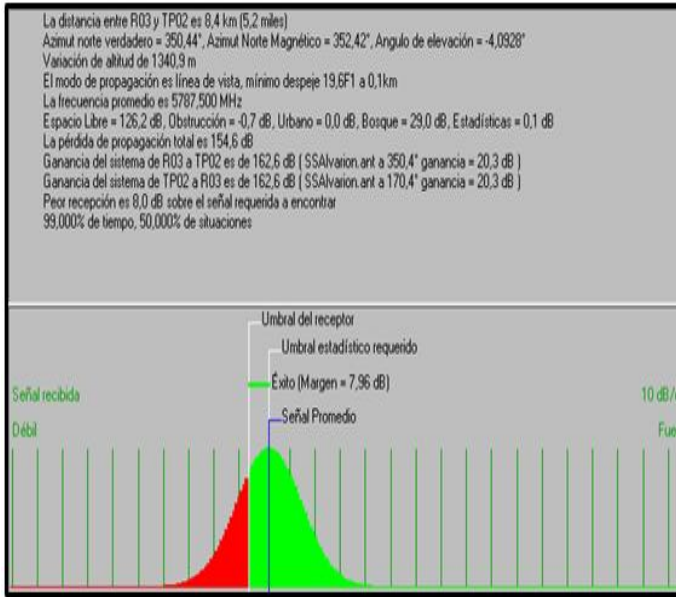


Figura3. “Detalles y Distribución” del enlace TP02 – R03”

En las Figs. 3 y 4 se muestran los resultados de la simulación en Radio Mobile, para el enlace del ejemplo.

Para la simulación se utilizaron patrones de radiación de equipos ALVARION que operan en la banda de los 5.8 GHz. Gracias a esto se pudo realizar una simulación más real y por ende obtener resultados más confiables.

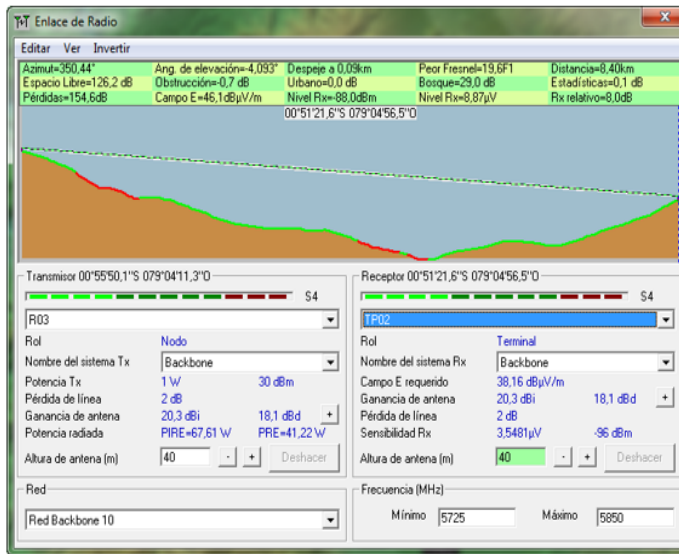


Figura4. Perfil del radio enlace TP02 –R03

#### 4.4.3 Cálculo de la capacidad requerida

- Acceso

Una vez identificadas las instituciones educativas que se enlazarán en cada torre, la capacidad requerida por cada una y los valores de compartición; se puede definir la capacidad necesaria para cada torre de acceso, y con esto la de los enlaces de backbone, tanto principales como de backup.

Para definir el CIR de cada plantel educativo, se consideró la capacidad teórica calculada, multiplicada por el valor de la compartición. Luego se realizó la sumatoria del CIR de cada

institución y una aproximación para facilitar la asignación de la capacidad de transmisión. Ver Tabla 8.

- Backbone

Para el cálculo de la capacidad que deben soportar los radioenlaces, se consideran las dependencias de cada torre, de manera que cada enlace soporte su capacidad requerida y la de sus conexiones dependientes. Ver Tablas 9 y 10.

Tabla 8. Capacidad torres de acceso

Torres	Suma CIR	Capacidad (Mbps)
TP03	1.71	2.00
TP02	0.5	1.00
TP01	1.5	2.00
TP04	1.17	1.50
TZ01	4.29	4.50
TZ02	0.5	1.00
TZ03	15.96	16.50
Z06	1.88	2.00
TG01	2.25	2.50
TG02	1	1.50
TG03	1	1.50
TG04	0.67	1.00
FIN	5.42	5.75
TPR1	3.46	3.75
TPR2	4.17	4.50
TPR3	2.67	3.25
Capacidad Total (Mbps)		54.25

Tabla 9. Capacidad enlaces de backbone

Enlace	Capacidad (Mbps)
TP02-R03	1.00
TP01-R03	2.00
R03-TP03	3.00
TP03-R02	5.00
R02-TP04	1.50
R02-TZ01	6.50
TZ01-TZ02	11.00
TZ02-TZ03	12.00
Z06-TZ03	2.00
TZ03-TG01	30.50
TG04-TG01	4.00
TG03-TG04	3.00
TG02-TG03	1.50
R01-TG01	37.00
R01-FIN	37.00
TPR1-R04	7.75
TPR2-R04	4.50
TPR3-R04	3.25
R05-FIN	11.50
R05-TPR1	11.50
FIN-NOC	54.25

**Tabla 10.** Capacidad enlaces de backup

Enlace	Capacidad (Mbps)
NOC - TPR2	54.25
R01 - R05	48.50
TG03-R01	37.00
TZ01-TG03	34.50
R03-R02	5.00

**4.4.4 Determinación de equipos activos**

Los equipos deben trabajar en las frecuencias previamente escogidas, es decir 2.4 GHz para acceso y 5.8 GHz para backbone, y cumplir con el estándar 802.16d (WiMAX).

Además, el diseño considera un equipo de conectividad en cada nodo, por lo que para evitar un exceso de cableado eléctrico se plantea como requisito que los equipos radiales y el equipo de conectividad manejen alimentación eléctrica PoE.

Como requisitos mínimos para la administración de los equipos radiales, es necesario disponer de un acceso remoto que permita cambios de configuraciones o revisiones sin necesidad de la presencia de un técnico en el nodo, por lo que se solicitará que los equipos deben permitir acceso a través de HTTP o telnet y si la disponibilidad en el mercado lo permite deben manejar protocolo SNMP por lo menos hasta la versión 2, de manera que se puedan monitorear de una forma más precisa. En cuanto a equipos radiales, podría darse el caso que no soporten SNMP, sin embargo, los equipos de conectividad como switches y routers deberán obligatoriamente manejar SNMP por lo menos hasta versión 2.

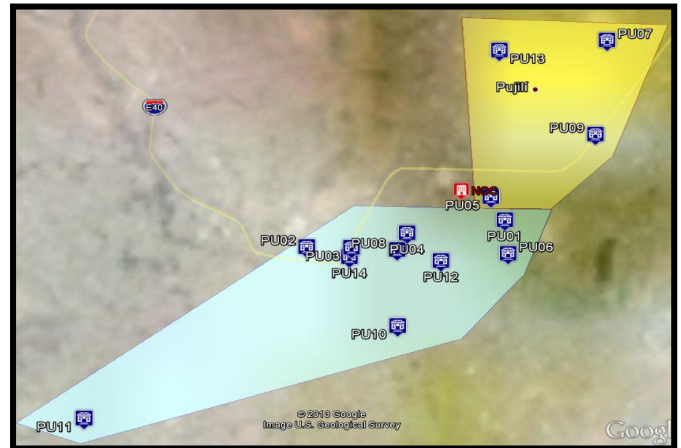
**4.5 Diseño de la Red De Fibra Óptica**

Debido a que el núcleo de la red estará ubicado en la parroquia La Matriz, se ha optado por una tecnología de fibra óptica, ya que ofrece alta capacidad de transporte, flexibilidad y robustez. Además se ha decidido que los planteles educativos ubicados en el sector urbano también reciban el servicio de Internet a través de este medio.

**4.5.1 Sectorización**

En consenso con el GADMCP, se ha decidido ubicar el NOC en el sector central de la parroquia La Matriz, en una instalación cercana a las oficinas del Municipio, debido a las facilidades de acceso y a la distribución de los planteles, puesto que divide a la zona urbana en dos sectores por el tipo de tendido de cables que presenta; sur (tendido subterráneo) y norte (tendido aéreo).

En la Fig. 5 se muestran la zona norte, zona sur, el NOC y los planteles educativos.



**Figura 5.** Sectorización de la red de fibra óptica

**4.5.2 Selección del tendido de cable**

El tipo de tendido del cable óptico seleccionado para las instituciones educativas, se muestra en la Tabla 11.

**Tabla 11.** Selección de tendido de cable

TIPO DE TENDIDO	INSTITUCIÓN
TENDIDO AÉREO	Provincia de Cotopaxi
	Pedro Vicente Maldonado
	Monseñor L. Proaño
	JatariUnancha
	14 de Octubre
TENDIDO MIXTO (AÉREO y SUBTERRÁNEO)	Técnico Pujilí
	Antonio Aristarco Jácome
	Pablo Herrera
	Belisario Quevedo
TENDIDO SUBTERRÁNEO	Marianita de Jesús
	9 de Octubre
	Pujilí
	Semillitas
	Inés Cobo Donoso

- Cable para tendido aéreo

Se decidió utilizar cable ADSS concéntrico, ya que es el que genera mayores facilidades de instalación, mantenimiento, convergencia con el tendido subterráneo y también menor costo, por esto el que mejor se adapta a las condiciones de diseño del sistema. En la Tabla 12 se muestran las características principales del cable escogido.

En la parroquia La Matriz del cantón Pujilí los ductos subterráneos son de cemento y son utilizados tanto para el tendido eléctrico como para el de telecomunicaciones, con sus debidas separaciones; por lo que se ha decidido utilizar un cable blindado dieléctrico, el cual es la mejor opción para este tipo de circunstancias, puesto que si se emplea una armadura metálica, también se deberían considerar los gastos y procesos que implican aterrizar los cables para no causar interferencia con el cableado eléctrico.

**Tabla 12.** Características cable ADSS concéntrico

CARACTERÍSTICA ADSS CONCÉNTRICO	CALIFICACIÓN
Área de sección transversal	Excelente
Resistencia del viento y acumulación del gel	Excelente
Transición de la red aérea para red subterránea en ductos	Excelente
Facilidad de mantenimiento	Excelente
Tendencia de transferir esfuerzos a la fibra	Baja
Facilidad de instalación	Excelente

- Cable para tendido subterráneo

4.5.3 *Diseño del Núcleo de la Red*

El núcleo de la red se ubicará en el NOC, aquí se tendrá la interconexión con el proveedor y los equipos de conectividad hacia la capa de distribución.

Este segmento de la red debe ser totalmente resistente a fallas (eléctricas, mecánicas, etc.), requiere de una alta capacidad de enlaces y CPU. Para ubicar los equipos necesarios se precisa un armario de telecomunicaciones, en el cual se deberá colocar un rack con los elementos para interconexión y administración de la red.

4.5.4 *Diseño de la Red de Distribución*

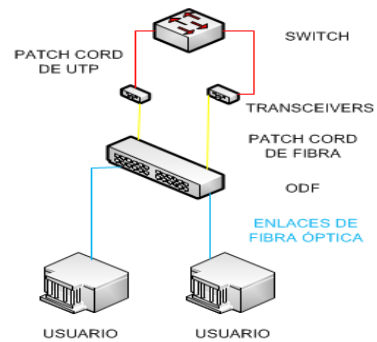
Para realizar el diseño de la red de distribución, es necesario escoger la topología que mejor se adapte a las características topográficas, viales, etc. de cada zona.

Para esto se hizo un análisis de las condiciones de tendido actuales de la parroquia La Matriz del cantón Pujilí; en la zona Norte cuyo tendido es netamente aéreo se encuentran 4 instituciones educativas; el resto de planteles educativos se encuentran en la zona Sur y requieren tendido subterráneo o mixto.

- Zona Norte

La zona Norte tendrá una topología tipo estrella sin redundancias con su concentrador en el NOC.

La distancia del cable de fibra de distribución no deberá superar los 1000 metros, e irá desde un ODF ubicado en las instalaciones del NOC hasta cada establecimiento educativo que supere los 400 metros de distancia. Para esto se emplearán cables de 8 hilos de fibra y las instituciones educativas también harán el papel de nodos. En la Fig. 6 se muestra el diagrama de la capa de distribución en la zona Norte.

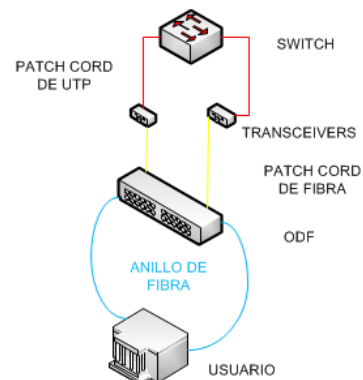


**Figura 6.** Diagrama de la capa de distribución de la zona Norte

- Zona Sur

Para la zona Sur se consideró una topología tipo anillo con origen y fin en el NOC, se eligió esta topología ya que al tener el sistema de ductos previamente instalado en el sector central, se lo puede aprovechar mediante un anillo de fibra de varios hilos redundante que garantiza el servicio a las instituciones de la zona y además pueda tener un crecimiento a futuro de acuerdo a las necesidades del cantón.

Al anillo se conectan 9 establecimientos educativos, por lo que se decidió utilizar un cable de 16 hilos de fibra, ya que permite tener holgura suficiente para un futuro crecimiento de la red. En la Fig. 7 se muestra el diagrama de la zona sur.



**Figura 7.** Diagrama de la red de distribución de la zona Sur.

4.5.5 *Diseño de la red de acceso*

Para el acceso se utilizará un cable de 2 hilos de fibra óptica; cuya distancia máxima deberá ser de 400 metros; ya que en caso de daño resulta más fácil y económico el remplazo.

**Tabla 13.** Instituciones educativas, distancia y número de postes

Establecimiento educativo	Número de postes	Distancia del cable (m)
Pablo Herrera	4	103.63
Belisario Quevedo	4	124.43
Técnico Pujilí	12	389.52
Pedro Vicente Maldonado	4	98.17
Semillitas	NA	75
Pujilí	NA	5
Inés Cobo Donoso	NA	58
Marianita de Jesús	NA	13
9 de Octubre	NA	92

En la Tabla 12 se muestra el nombre de los establecimientos educativos, la distancia hasta el anillo de distribución y el número de postes en el caso de los planteles que requieren de un tendido aéreo.

#### 4.5.6 Presupuesto de potencia para la red de fibra

Es un cálculo que permite garantizar que una transmisión óptica se realice con éxito y que el receptor capte la señal de luz sin distorsión a pesar de las pérdidas del sistema.

$$\text{Valor}_{sup.RD} \geq P_{Tx} - L_{totales} + G \geq \text{Sensibilidad}_{Rx} + \text{margen seguridad} \quad (21)$$

$\text{Valor}_{rup.RD}$  = Valor superior o inferior del rango de sensibilidad del receptor.

$P_{Tx}$  = Potencia de transmisión,

$L_{totales}$  = Pérdidas totales del sistema

$G$  = Ganancia del sistema

Sin embargo, para el valor superior, se deben considerar 2 escenarios: para el usuario más cercano, asegurándose de que no se sature su detector y para el usuario más lejano, asegurándose de que la señal que llega al destino alcance a ser detectada.

- Pérdidas totales

Hace referencia a la sumatoria de todas las posibles pérdidas en un sistema de transmisión óptica, pueden ser:

- a) Pérdidas en la fibra

$$L_{fibra} (dB) = \alpha \left( \frac{dB}{Km} \right) \times d (Km) \quad (22)$$

$L_{fibra}$  = Pérdidas en el cable de fibra óptica

$\alpha$  = Coeficiente de atenuación de la fibra

$d$  = Distancia del tendido de la fibra

- b) Pérdidas por conectores

$$L_{conectores} (dB) = \beta_{conector} (dB) * N_{conector} \quad (23)$$

$L_{conectores}$  = Pérdidas totales por conectores

$\beta_{conector}$  = Coeficiente de atenuación de cada conector

$N_{conector}$  = Número de conectores

- c) Pérdida por empalmes

$$L_{empalme} (dB) = \beta_{empalme} (dB) * N_{empalme} \quad (24)$$

$L_{empalme}$  = Pérdidas totales por empalmes

$\beta_{empalme}$  = Coeficiente de atenuación individual por empalme

$N_{empalme}$  = Número de empalmes

- d)

- e) Pérdidas por pigtailes y patchcords de fibra

De acuerdo al estándar los pigtailes y patchcords tienen un coeficiente de atenuación máximo de 0.1 dB/m.

- f) Pérdidas por acoplamiento

Son pérdidas que se generan al acoplar la fuente de luz hacia la fibra y la fibra hacia el receptor, en las fibras monomodo estas pérdidas son imperceptibles.

- Sensibilidad del receptor

Los valores de sensibilidad pueden fluctuar entre -15.8 dBm hasta -0.1 dBm para enlaces de hasta 10 Km; mientras que la potencia de transmisión puede variar entre -4.7 dBm hasta 4 dBm para la misma distancia.

- Ganancia

En un enlace de fibra óptica, las pérdidas totales se incrementan con la distancia y el número de componentes pasivos que se empleen. No obstante en enlaces que superan las decenas de kilómetros y operan a altas velocidades, estos valores se pueden incrementar lo suficiente como para degradar la señal transmitida, por lo que para solventar este problema se utilizan amplificadores.

- Margen de seguridad

Es un valor adicional de pérdidas que se considera para asegurar que un enlace trabaje de manera adecuada, es decir este valor es una precaución ante errores de cálculo, degradación de los componentes del enlace, reparaciones menores del sistema, etc. Se utilizará 3 dB, ya que es el valor estándar para márgenes de seguridad de presupuestos de potencia.

A continuación se muestra un ejemplo de cálculo del presupuesto para el enlace backup de la escuela Antonio Aristarco Jácome, ya que es el que presenta la peor condición (valor mayor de pérdidas para el enlace).

$$-0.1 \text{ dBm} \geq -4.7 \text{ dBm} - 2.91 \text{ dB} + 0 \text{ dB} \geq -15.8 \text{ dBm} + 3 \text{ dB} \quad (25)$$

$$-0.1 \text{ dBm} \geq -7.61 \text{ dBm} \geq -12.8 \text{ dBm} \quad (26)$$

- Tipo de multiplexación

La tecnología WDM (Wavelength Division Multiplexing), que se utiliza en el diseño, envía dos o más longitudes de onda a través de un solo hilo de fibra, lo que permite establecer una conexión full dúplex con varios canales, minimizando el número de hilos de fibra necesarios.

- Capacidad

Otro factor a tomar en cuenta es la capacidad que se entregará a cada enlace de fibra óptica. No se proporcionarán enlaces dedicados a todas las instituciones educativas; esto dependerá del número de alumnos y requisitos de cada establecimiento.

Dado que el factor de compartición es variable, se necesita un equipo que permita fijar valores de MIR y CIR para cada enlace; por lo que se utilizará un administrador de ancho de banda.

**Tabla 14.** Valores de CIR Y MIR

ID	Capacidad teórico (Mbps)	Capacidad compartido (Mbps)	CIR	MIR
PU01	1.50	0.38	1.00	1.75
PU02	4.50	4.50	3.00	4.75
PU03	4.50	4.50	3.00	4.75
PU04	2.50	1.25	1.25	2.75
PU05	6.50	6.50	6.50	6.75
PU06	3.00	1.50	1.50	3.25
PU07	2.50	1.25	1.25	2.75
PU08	2.50	1.25	1.25	2.75
PU09	6.00	6.00	6.00	6.25
PU10	3.00	1.50	1.50	3.25
PU11	2.00	0.50	1.00	2.25
PU12	3.00	1.50	1.50	3.25
PU13	2.50	1.25	1.25	2.75
PU14	3.00	3.00	2.50	3.25

#### 4.5.7 Centro de cómputo genérico

Se realizó el modelo de centro de cómputo genérico con adaptaciones a los requerimientos promedio, así:

- Se tomará un máximo de 20 computadores, incluso con crecimiento de la red.
- Se utilizará un switch de 24 puertos.
- El patch panel será de 24 puertos.

#### 4.6 NOC(Network Operation Center)

El NOC se va a ubicar en las instalaciones brindadas por el GADMCP; en este punto se realizará la interconexión con el proveedor de Internet, así como la conexión con la red diseñada. Además, aquí se ubicarán los servidores de aplicación y monitoreo para la red.

##### 4.6.1 Interconexión con el proveedor

Se requiere contratar 94.25 Mbps de capacidad; 40 Mbps que se deben repartir en la red de fibra óptica y 54.25 Mbps para la red radial.

El proveedor que se escoja instalará su CPE, el cual irá directamente conectado a un equipo cortafuegos que será el último salto de la red diseñada antes de que el tráfico pueda salir a la red del proveedor.

El firewall es necesario para registrar el uso de Internet y para bloquear el acceso a direcciones web consideradas como ofensivas o dañinas para la red y los usuarios de las instituciones educativas. Después del firewall se colocará un administrador de ancho de banda; cuyo propósito es permitir un control del tráfico que genere cada segmento de red; y para el caso de la red de fibra óptica permitirá cumplir con los valores de MIR y CIR ofrecidos para los enlaces de las instituciones educativas.

#### 4.7 Modelo de Administración y Gestión de Red

##### 4.7.1 Determinación del SLA

Durante el periodo de clase se deberá garantizar la disponibilidad del servicio el 99.99% del tiempo. También se debe definir un proceso de recepción de requerimientos, normalmente se establece un call center, el cual debe encargarse de la recepción y solución de cada evento reportado por los planteles educativos.

##### 4.7.2 Modelo de gestión

A través del modelo de gestión, se busca tener un control total de la red, detectar problemas y atender requerimientos de forma rápida y sencilla, procurando mantener la red operativa la mayor parte del tiempo mediante un monitoreo constante y el establecimiento de procedimientos para gestión de eventos en la red.

Los equipos monitoreados serán en la red de acceso: router CPE, radio suscriptor de cada institución, radio de la estación base ubicado en la torre. No se considera para el monitoreo a los switches internos de cada institución, en caso de un requerimiento o incidencia se deberá reportar por el personal encargado de la administración de la red.

En la red de distribución WiMAX se monitorearán: los equipos radiales para enlaces punto a punto (backbone), los switches ubicados en cada nodo, la UPS ubicada en cada nodo. En tanto que en la red de distribución de fibra óptica serán monitoreados: los switches ubicados en cada nodo, la UPS ubicada en cada nodo y el administrador de ancho de banda. En el núcleo de la red deberán monitorearse: el router de interconexión con el proveedor, el switch de interconexión hacia los nodos, Proxy y UPS.

Se recomienda utilizar Nagios, ya que permite monitorear y alertar en tiempo real, posee más características que la mayoría de programas similares, es fácil de utilizar y al ser software libre no representa un costo extra.

## 5. CONCLUSIONES

El proyecto es necesario para la población en general, ya que el carecer de medios de educación y comunicación actualizados retrasa en gran medida el desarrollo intelectual y profesional de los seres humanos.

El proyecto es viable desde el punto de vista técnico y económico, ya que mediante los estudios de las condiciones actuales del cantón, se ha justificado plenamente la necesidad de realizarlo; también se ha mostrado mediante el diseño que es posible realizar la red que dé cobertura a las zonas involucradas y brinde acceso a Internet a los planteles educativos.

De acuerdo a lo indicado por el GADMCP, el valor del proyecto de \$ 372594.91, podría ser financiado para realizar la implementación del diseño por etapas, de manera que a futuro se tenga la totalidad de la red instalada y funcionando.



## REFERENCIAS

- [1] D. Benítez y A. Martínez, Diseño de un backbone inalámbrico para una red de voz, datos y video en base al estándar IEEE 802.16 (WiMAX) y acceso de última milla considerando aspectos de calidad de servicio para la provincia de Galápagos.
- [2] GADMCP, Plan de Desarrollo Estratégico del Cantón Pujilí, Pujilí, 2009.
- [3] J. Perriard, «ADSL,» Febrero 2014. [En línea]. Available: <http://es.kioskea.net/contents/669-adsl>.
- [4] L. Negro, «Las Ventajas de la tecnología WiMAX,» 30 Junio 2011. [En línea]. Available: <http://www.aquienvalladolid.com/es/edicion1/economia/1273/>. [Último acceso: 2012].
- [5] P. Mickenna, «Irregular TerrainModel (ITM) (Longley-Rice) (20 MHz – 20 GHz),» [En línea]. Available: <http://www.its.bldrdoc.gov/resources/radio-propagation-software/itm/itm.aspx>.
- [6] G. Keiser, FTTX concepts and applications, Wiley-Interscience, 2006.
- [7] M. S. Jiménez, Folleto de Comunicaciones Ópticas, EPN - Quito, 2014.
- [8] IEEE, Standard 802.16: A Technical Overview of the WirelessMAN™ Air Interface for Broadband Wireless Access, 2005.

# Desarrollo de una Herramienta de software que implemente Cloud Computing de Modelo Privado para Ofrecer Infraestructura como Servicio

Salazar A.; Calderón X

*Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Electrónica y Redes de la Información, Quito, Ecuador  
e-mail: acse77@yahoo.es;xavier.calderon@epn.edu.ec*

**Resumen:** En el presente artículo se explica el proceso de diseño e implementación de una herramienta de software que implementa Cloud Computing de modelo privado para ofrecer Infraestructura como servicio, y servirá como guía de desarrollo para quienes deseen realizar su propio Cloud. La herramienta permite que el usuario acceda a sus entornos de sistema operativo desde cualquier lugar de la nube, utilizando un explorador web Windows. Consta de dos componentes primordiales: un servicio de virtualización y una aplicación web de cliente que permite el acceso al servicio de infraestructura que ofrece el software. El servicio de virtualización es expuesto a la nube mediante un servicio web java, mientras que la aplicación web accede al mismo y se encuentra publicada en un servidor web Windows Server 2008. La aplicación posee una base de datos que permite el registro de usuarios, entornos virtuales y conexiones realizadas.

**Palabras clave:** Computación en la nube, Servicio Web, Virtualización, C# y JAVA.

**Abstract:** This article explains a process of design and implementation of a software tool that implements private cloud computing model. This software tool offers infrastructure as a service, and it may help a guide of development applications so that people could make their own cloud. This tool could allow users log into the operating system from any place in the cloud through a Windows web browser. This tool has two main components: a virtualization service and a client web application. These components allow to log into infrastructure service that software offers. The virtualization service is showed in the cloud through a java web service whereas web application allows to log in the cloud as the same as virtual service, but it is published in a windows server 2008. The application has a database that allows user registration, virtual environments and connections.

**Keywords:** Cloud Computing, Web Service, Virtualization, C# y JAVA.

## 1. INTRODUCCIÓN

La herramienta está orientada a satisfacer necesidades tanto en el ámbito empresarial como educativo. En pequeñas y medianas empresas es esencial aprovechar al máximo los recursos, especialmente en cuanto al costo del hardware, es por esta razón que un concepto muy antiguo como la virtualización se ha retomado actualmente. Particularmente la virtualización de escritorios ha tenido una gran acogida dentro de las pequeñas y medianas empresas debido a que nos permite centralizar los recursos en un servidor y acceder a ellos mediante terminales ligeros, lo que representa una gran ventaja en cuanto a costos, administración, mantenimiento y flexibilidad de crecimiento.

Sin embargo, se encuentran disponibles únicamente herramientas que funcionan en ambiente LAN, lo que se encuentra estrechamente relacionado con la idea de que los terminales que acceden al servidor deben ser terminales ligeros. La idea de desarrollar un servicio para una WAN elimina este paradigma, aprovecha las ventajas de la virtualización, amplía el campo de acción a nivel global,

optimiza la comunicación, elimina conflictos de interoperabilidad y aprovecha terminales pesados obsoletos. Cuando se utilizan las herramientas en un ambiente LAN, la principal preocupación es el dispositivo de acceso para clientes ligeros, dicho dispositivo generalmente ocupa algún tipo de puerto serial y es el mayor limitante en cuanto al número de usuarios que pueden ser atendidos, por lo general hasta 5 usuarios simultáneos; el servicio que será desarrollado no posee este limitante y el número de usuarios depende del dimensionamiento del servidor.

Cloud Computing soluciona los problemas expuestos anteriormente al permitir la posibilidad de ofrecer una infraestructura como servicio (IaaS), que tiene una amplia gama de aplicaciones y al mismo tiempo permite la flexibilidad del diseño completo de una aplicación que se ajuste a necesidades específicas de organizaciones privadas. Sin embargo, contratar este servicio tiene un costo y su utilización se da en base a las características que el propietario nos brinde. La herramienta desarrollada permite que se tenga un control total sobre el servicio de infraestructura que ofrece y a la vez, su personalización según los requerimientos que se deseen añadir.

La herramienta web desarrollada combina tecnologías de servicios web en JAVA y .NET (C#); aplicando el modelo de 3 capas.

El artículo está organizado de la siguiente manera: presenta como primer punto una sección de conceptos utilizados como base para la implementación del sistema, a continuación el Diseño de la herramienta de software, donde se explica tanto el esquema del servicio de virtualización, como el de la aplicación web de uso del cliente. Como tercer punto presenta la Implementación del sistema, señalando detalles de cómo se lo desarrolló. Como cuarto punto el resumen del Diseño del servidor de virtualización, mismo que alberga el servicio de virtualización y para finalizar, una sección de conclusiones obtenidas posteriormente a la implementación de esta herramienta. [1][6][8][9][10]

## 2. DESCRIPCIÓN DE CONCEPTOS UTILIZADOS EN EL DESARROLLO DEL SERVICIO DE INFRAESTRUCTURA QUE OFRECE CLOUD COMPUTING

*Cloud de tipo Infraestructura como Servicio.-* El Cloud de tipo Infraestructura como Servicio (IAAS - Infrastructure as a service/Infraestructura como servicio) ofrece como servicio a los clientes varios recursos computacionales, entre los más destacados: abastecimiento de procesamiento, espacio de almacenamiento y equipos de red. Se brinda este servicio mediante una plataforma de virtualización, el usuario no administra la infraestructura de Cloud Computing ni incurre en gastos de operación, él sólo tiene el control sobre los sistemas operativos y aplicaciones desplegadas.

La Fig. 1. indica los componentes que ofrece el servicio de infraestructura de Cloud Computing. Básicamente se oferta un clúster de nodos controladores, que permiten el alojamiento de varias máquinas virtuales. En la figura se puede ver la comparación entre XEN y VMWare, cuya diferencia es que VMWare cuenta con un nivel de Broker. Sin importar qué tipo de infraestructura se ofrezca, se tiene controladores de clústeres y almacenamiento para todos los entornos virtuales de cualquier gestor que se utilice.

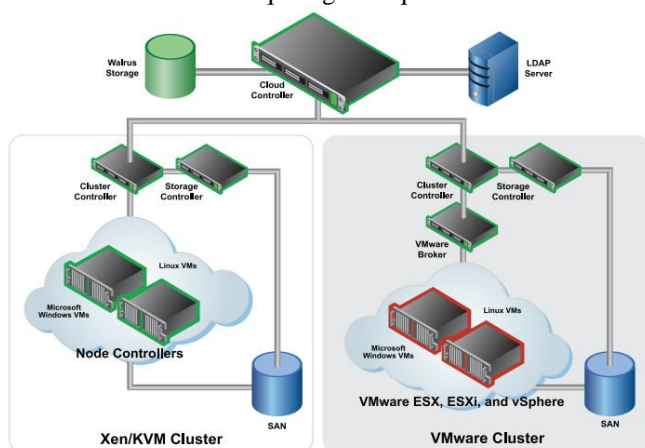


Figura 1. Infraestructura como Servicio (IAAS) [16].

*VIRTUALIZACIÓN*[4][6][9][10][14].- En términos generales, virtualización es la creación de una versión virtual de una plataforma de hardware autónoma incluyendo un sistema operativo completo que se ejecuta como si estuviera instalado; en otras palabras, es la emulación de un computador físico dentro de un sistema operativo que toma el papel de anfitrión, mediante una aplicación.

El objetivo primordial es aprovechar al máximo los recursos de hardware de un computador con el fin de obtener mayores beneficios en cuanto a costos, tanto de adquisición como de mantenimiento. De esta manera se tiene un solo computador físico, pero varios trabajando a la vez.

Para construir una máquina virtual se debe asignar algunos recursos físicos, tales como: espacio de disco duro, memoria RAM o número de procesadores del anfitrión. Adicionalmente, se debe indicar el sistema operativo que se alojará en la nueva máquina virtual.

### 2.1 Técnicas de Virtualización [6][7][10][11][12][13][14].-

#### 2.1.1 Emulación del hardware subyacente

Se trata de emular la infraestructura física del computador mediante una aplicación llamada hypervisor, con el fin de tener varios sistemas operativos que la utilicen de manera compartida a la vez. De esta forma se separa la ejecución del sistema operativo y aplicaciones del hardware para encapsularlo dentro de un entorno simulado por software.

La Fig 2 muestra por un lado las capas necesarias para que funcione un computador físico y por otro, las capas que son recreadas por el hipervisor para cumplir con las mismas funciones que un computador físico. Componentes como CPU, memoria, red y disco duro son provistos por el sistema anfitrión.

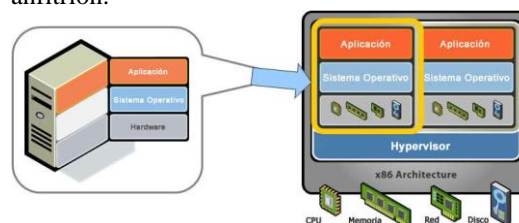


Figura 2. Proceso de emulación del software subyacente[15].

La emulación incluye sistema operativo, aplicaciones y datos del computador, es aplicable a servidores y equipos de escritorio.

#### 2.1.2 Consolidación de hipervisores

Consiste en ejecutar varias máquinas virtuales en un mismo servidor anfitrión, reduciendo el número de máquinas físicas.

El reducir las máquinas físicas es disminuir también el costo eléctrico y de mantenimiento de las mismas.

La Fig. 3 compara el proceso de restauración de máquinas físicas con el de máquinas virtuales haciendo notar que una restauración física posee muchas más etapas a seguir que una virtual, donde solamente se restaura un entorno virtual para luego encenderla. El proceso de restauración física comprende la configuración del hardware del nuevo computador, instalación de sistema operativo, configuración del mismo, instalación de agente de respaldo para luego, empezar la recuperación automática del entorno. El tiempo de diferencia entre las dos soluciones es alto.



Figura 3. Proceso de restauración de máquinas físicas a virtuales [15]

## METODOLOGÍA KANBAN

“El Kanban es un sistema de gestión donde se produce exactamente aquella cantidad de trabajo que el sistema es capaz de asumir. Es un sistema de gestión del trabajo en curso, que sirve principalmente para asegurar una producción continua y sin sobrecargas en el equipo.”

Kanban es una herramienta proveniente de la filosofía Lean, de tipo “pull”, lo que significa que los recursos deciden cuándo y cuánto trabajo se comprometen a hacer. Los recursos toman (“pull”) el trabajo cuando están listos, en lugar de tener que recibirlo (“push”) desde el exterior. Al igual que una impresora tira en la página siguiente sólo cuando está lista para imprimir sobre ella. Kanban se basa en la optimización de procesos continuos y empíricos, que se corresponde con el principio Lean. Enfatiza la respuesta al cambio por sobre seguir un plan.

### Metodología de desarrollo elegida

La metodología de desarrollo elegida fue KANBAN. KANBAN permite que se realice una entrega rápida de resultados al usuario y el trabajo de desarrollo en fases. Se realiza la organización de las fases y posteriormente la creación de tarjetas de casos de uso o escenarios de usuario que cumplirán con los requerimientos. No existen roles dentro de la metodología, lo que facilita su efectiva utilización en este proyecto de titulación que incluye un solo desarrollador.

## 3. DISEÑO DE LA HERRAMIENTA [10][9][8]

### Requerimientos del sistema

Los requerimientos funcionales del sistema son:

- Permitir la conexión de varios clientes al servicio para que éstos accedan a sus entornos virtualizados, almacenar los usuarios, contraseñas e identificador de máquina virtual en una tabla de base de datos.
- Permitir el manejo básico de las sesiones establecidas con el cliente: rechazo de la sesión, creación, reinicio y apagado de las máquinas virtuales asignadas a los clientes.
- Permitir la manipulación directa del servicio: inicio, reinicio y fin.
- Permitir relacionar un par de usuario y contraseña con una máquina virtual y tiene la funcionalidad de un mantenedor de esa información, usando una base de datos.
- Añadir seguridad en la transmisión, utilizando un certificado digital para que la información viaje cifrada.
- Llevar un registro de conexiones que permite visualizar gráficamente: usuarios conectados, tiempo de conexión y carga que introducen en el servidor, para detectar posibles intrusos.
- Mostrar un gráfico de carga en la CPU en tiempo real.

La interfaz web para uso de los clientes tendrá las siguientes características:

- Permitir la conexión con el servidor remoto para acceder a su entorno virtual mediante el envío de usuario y contraseña que serán procesados por el servidor.
- Permitir iniciar, reiniciar y finalizar la conexión con el servidor.
- Permitir el cambio de contraseña.

Entre los requerimientos no funcionales se encuentra el siguiente listado:

- No consume espacio de disco duro adicional en el computador cliente, ya que se encuentra alojado en un servidor web dentro de la nube. Se requiere solamente contar con un explorador web para sistema operativo Windows entre los siguientes: Internet Explorer, Google Chrome y Mozilla Firefox.
- La interfaz web para uso del cliente debe visualizarse y funcionar correctamente en los siguientes exploradores web para sistema operativo Windows: Internet Explorer, Google Chrome y Mozilla Firefox. No aplica para sistemas Linux.

Al aplicar esta metodología KANBAN; se procede a la propuesta de las diferentes fases que tiene la misma. Por lo tanto se realiza la organización de las fases y posteriormente la creación de tarjetas de casos de uso o escenarios de usuario que cumplirán con los requerimientos. No existen roles dentro de la metodología, lo que facilita su efectiva utilización.

Se requiere realizar dos componentes esenciales para tener el sistema completo; siendo éstos:

- Servicio de virtualización – Servicio que realiza el manejo de entornos virtuales.
- Aplicación para uso del cliente – Aplicación que permite que el usuario utilice los entornos virtuales alojados en el servidor de virtualización.

Como primer paso, se requiere tener todos los programas que permiten que el servicio de virtualización sea desarrollado y aquellos que permiten la conectividad con la aplicación web. Con esos componentes correctamente instalados, se puede desarrollar el servicio web y consumirlo desde la aplicación de cliente.

KANBAN indica que se debe realizar entregables visibles al usuario desde un inicio, por lo que es importante que en cada fase se pueda mostrar un incremento de producto que el usuario pueda percibir. Sin embargo, se tiene la fase preliminar, que permite realizar la abstracción y análisis de requerimientos, que permitirá tener un desarrollo más fluido. Pensando en esto, se realizó la siguiente planificación de desarrollo del sistema por fases:

- FASE 0: Requerimientos, análisis de requerimientos, esquemas y diseño del sistema.
- FASE 1: Preparación del ambiente de desarrollo del sistema y creación de un servicio Web de clonación de máquina virtual.
- FASE 2: Implementación de todos los Servicios de virtualización y estructura de base de datos para la aplicación.
- FASE 3: Creación de páginas de Contratación, Cambio de Contraseña y Reportes.
- FASE 4: Creación de Reportes del sistema y perfiles de usuario.

#### Componentes del sistema

Consta de dos componentes: un Servicio de virtualización, que se encarga del manejo de entornos virtuales y se encuentra alojado en un servidor al que llamaremos Servidor de Virtualización, y una aplicación web que utilizará el servicio de virtualización y permitirá que los usuarios accedan al sistema a través del internet y manejen sus entornos virtualizados.

El servidor de virtualización permite crear entornos virtuales con características básicas según el sistema operativo que se escoja, actualizar características de los entornos, borrarlos cuando se requiera e iniciarlos para poder acceder a ellos de manera remota.

La aplicación web se encuentra alojada en un servidor web y todos los usuarios que contraten el servicio podrán usarlo. Esta aplicación permite que el usuario se registre, se autentique, añada los entornos virtuales que necesite en la nube y pueda utilizarlos desde donde se encuentre. Incluye funciones de Registro de usuarios, cambio de contraseña, visualización de reportes según el rol que tenga y mantenimiento de entornos virtuales (añadir, actualizar características, borrar e iniciarlas para su uso). Ésta, utiliza el

servicio web para realizar todas las operaciones relacionadas a las máquinas virtuales.

Como se indica en la Fig. 4, el usuario se conecta directamente a la aplicación web desarrollada, mediante un navegador web Windows como Internet Explorer, Google Chrome o Mozilla Firefox. La aplicación se encuentra alojada en un servidor web y expuesta a la Internet, el servidor web se encuentra configurado en un computador con sistema operativo Windows Server 2008.

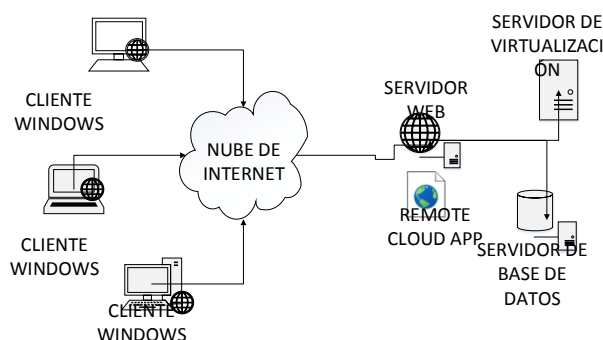


Figura 4. Diagrama general del sistema

La aplicación web a su vez, consume un servicio web java alojado en el servidor de virtualización y expuesto a la Internet, que se encarga del manejo de los entornos virtuales almacenados en el mismo servidor, mediante la herramienta de virtualización VirtualBox usando el sistema de scripting VBoxManage.

### 3.1 SERVICIO DE VIRTUALIZACIÓN[4][6][14]

El servicio de virtualización se encarga de poner a disposición del usuario la gama de operaciones disponibles a realizarse en sus entornos virtuales alojados en la nube. Se encarga de acceder directamente a ellos y manipularlos y posee las características especificadas en los requisitos funciones anteriormente ya detallados.

El servicio de virtualización se encarga de manejar los entornos virtuales en su totalidad. Permite crear, actualizar, iniciar, suspender y apagar un entorno virtual. Además, obtiene la carga del CPU para un número específico de muestras y lo pone disponible para visualizarlo posteriormente en un reporte.

Para realizar estas tareas, utiliza la herramienta de virtualización VirtualBox, que cuenta con un sistema de scripting denominado VBoxManage, mismo que permite manipular entornos virtuales desde la línea de comandos.

Como indica la Fig. 5, el servicio posee los siguientes componentes:

- Sistema Operativo servidor.
- Gestor de Máquinas virtuales.

- Aplicación del servicio (Servicio web Java).



Figura 5. Diagrama de bloques del Servicio de Virtualización

### 3.1.1 Gestor de virtualización (máquinas virtuales)

Se escogió la herramienta Virtual Box ya que posee las siguientes características:

1. Soporta el protocolo RDP (Remote Desktop Protocol/Protocolo de Escritorio Remoto), cuyo acceso se realiza mediante cualquier puerto que se le asigne a la máquina virtual. Los tres gestores de virtualización soportan el protocolo RDP.
2. Proporciona un API sencillo de manejar llamado VBoxManage, que permite realizar todas las operaciones en torno a la manipulación de los entornos virtuales. Este permite realizar operaciones que van desde la creación, asignación de discos, clonación de entornos virtuales, modificación de características de la máquina virtual, hasta procesos en tiempo de ejecución como envío de señal de apagado, suspensión de sesión, apagado de máquina virtual, etc.
3. Permite el inicio en segundo plano de las máquinas virtuales, mediante el uso sencillo del comando VBoxHeadless. Esta característica enciende la máquina virtual sin interfaz gráfica con acceso VDRP activado automáticamente y consume menos recursos en el sistema anfitrión. El usuario puede visualizar la interfaz gráfica del entorno virtual mediante un programa de acceso remoto. VMWare requiere de configuración de algunos archivos del programa y manipular de forma gráfica ciertas opciones para realizar esta funcionalidad.
4. Tiene una alta integración con los dispositivos de entrada y salida de sus máquinas virtuales.
5. El conocimiento requerido para la administración de las máquinas virtuales es bajo, es decir, no es necesario ser un usuario experto para utilizar el programa que administra las máquinas. El conocimiento de comandos de Linux requerido es básico.
6. Permite administrar los guest (máquinas virtuales) desde la consola, es decir, desde la línea de comandos se

puede realizar todas las funcionalidades que se requieren para la administración de un guest. Esto puede ser útil cuando tenemos un entorno sin interfaz gráfica.

### 3.1.2 Aplicación del servicio (servicio web Java)

El servicio web de virtualización permite el acceso al gestor de entornos virtuales desde la aplicación web del cliente, con el fin de que el usuario pueda manipular sus entornos de manera transparente usando su explorador web.

Se conecta al gestor de entornos virtuales mediante el manejo de scripts que usan la herramienta VBoxManage para la operación directa de los entornos virtuales. El hecho de tener un servicio independiente permite que se pueda acceder a él desde cualquier tipo de aplicación, sea ésta web, de escritorio o móvil.

Como indica la Fig. 6 el servicio web posee métodos que manejan scripts alojados dentro del servidor de virtualización. Éstos se conectan directamente con la herramienta VBoxManage, cuyo objetivo es la operación de entornos virtuales mediante consola, y mediante la ejecución de los scripts activa el funcionamiento de los mismos.

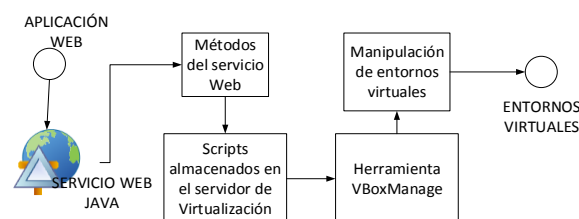


Figura 6. Procesos del servicio web de virtualización

### Operaciones del Servicio.

- Clonar máquina virtual.
- Iniciar máquina virtual.
- Actualizar máquina virtual.
- Suspender máquina virtual.
- Apagar máquina virtual.
- Medición de la carga de CPU del servidor.

**Clonar máquina virtual.**- En el servidor de virtualización se encuentran alojados algunos entornos virtuales, cada uno es un sistema operativo invitado disponible para utilizar, los sistemas operativos disponibles por el momento son:

- Windows XP
- Windows 7
- Centos
- Ubuntu

Al momento de ingresar a la página de creación de entornos virtuales, el usuario tiene un listado de los sistemas operativos disponibles para elegir. Cuando el usuario crea la máquina, el servicio de clonación se ejecuta y el nuevo entorno creado, adquiere las mismas características básicas

del original, esto es: sistema operativo escogido, memoria y espacio en disco del original. Se incluye la configuración de traducción de direcciones de red o NAT con el fin de permitir la conectividad adecuada de los sistemas invitados. Además, se incluye la activación del puerto VRDP (Virtual Remote Desktop Protocol) mediante un número de puerto que la aplicación genera automáticamente y envía al servicio para que lo asigne.

Posteriormente, se realiza una modificación del entorno creado, con el fin de configurarlo con los parámetros ingresados por el usuario, estos son: capacidad de memoria y capacidad de disco duro, valores ingresados desde la página de creación de máquina virtual.

El entorno creado tiene las siguientes características como se muestra en la tabla 1:

**Tabla 1.** Características del entorno

CARACTERÍSTICA	ELEGIDO POR EL USUARIO	MODIFICABLE
Sistema Operativo	Sí	No
Tipo de procesador X86 32 bits	No	No
Memoria RAM	Sí	Sí
Disco Duro	Sí	Sí
Driver USB Habilitado	No	No
Adaptador de Red NAT	No	No
Soporte VDRP Habilitado	No	No
Puerto de conexión RDP	No	No

El puerto de conexión RDP es generado automáticamente por la aplicación y asignado a cada entorno, no modificable.

Este proceso se realiza mediante el comando: `VBoxManage clonevm "[Nombre Máquina]" --register --name [Nombre Nueva Máquina] que clona una máquina`

**Iniciar máquina virtual.-** Este proceso se realiza mediante el comando `"VBoxHeadless --startvm"`. `"VBoxHeadless"` permite encender una máquina virtual en segundo plano, activando por defecto la virtualización remota, por lo que se encuentra accesible para cualquier otro computador de la red, y `"startvm"` se encarga de iniciar una máquina virtual.

**Actualizar máquina virtual.-** Este proceso se realiza mediante el comando `"VBoxManage --modifyvm"`. A continuación se coloca una lista de parámetros a modificarse en la máquina virtual: Capacidad de memoria, capacidad de disco duro y nombre de la máquina virtual.

**Suspender máquina virtual.-** Este proceso se realiza mediante el comando `"VBoxManage controlvm [Nombre de máquina] savestate"`. Este comando guarda el estado de la máquina virtual y la mantiene en estado suspendido.

**Apagar máquina virtual.-** Este proceso se realiza mediante el comando `"VBoxManage controlvm [Nombre de máquina]`

`poweroff"`. Este comando realiza un apagado rápido de la máquina virtual.

**Medición de la carga del CPU del servidor.-** Mediante el comando `"top"` de Linux, se obtiene un archivo con mediciones de la carga del CPU del servidor. Los resultados son almacenados en un archivo que se comparte a través de un servidor SAMBA. Dichos resultados son leídos desde la aplicación web y mostrados en un gráfico estadístico.

### 3.2. DISEÑO DE LA APLICACIÓN PARA EL CLIENTE

La aplicación web permite el acceso a los entornos virtuales mediante el consumo del servicio web java de manejo de máquinas virtuales para todos los usuarios. Almacena la información en una base de datos creada para registrar las operaciones realizadas dentro de sistema, usuarios y máquinas virtuales creadas.

Posee las siguientes características:

- Permite la conexión con el servidor remoto para acceder a su entorno virtual mediante el envío de usuario y contraseña que serán procesados por el servidor.
- Permite iniciar, reiniciar y finalizar la conexión con el servidor.
- Permite el cambio de contraseña.

La aplicación web se encontrará alojada en un servidor web y todos los usuarios que contraten el servicio podrán usarlo. Ésta permitirá que el usuario se registre, se autentique, añada los entornos virtuales que necesite en la nube y pueda utilizarlos desde donde se encuentre. Incluye funciones de Registro de usuarios, cambio de contraseña, visualización de reportes según el rol que tenga y mantenimiento de entornos virtuales (añadir, actualizar características, borrar e iniciarlas para su uso). Ésta, utiliza el servicio web para realizar todas las operaciones relacionadas a las máquinas virtuales.

#### 3.2.1 Tipo de Programación.-

El tipo de programación que se utilizó en la solución es la programación orientada a objetos. Esto permitió utilizar clases para realizar el mapeo de cada tabla de base de datos y llenarlas para enviarlas a guardar mediante LINQ.

#### 3.2.2 Lenguaje de Programación.-

El Framework utilizado para realizar la solución es ASP .NET 4.5.

La Fig. 7 muestra los componentes de la arquitectura ASP.NET para aplicaciones web: Servidor Web, Conexión con Base de datos y servicios web a los que acceden los usuarios desde su explorador. Esta arquitectura hace que sea poco complejo integrar todos estos componentes en la aplicación que se realizó.

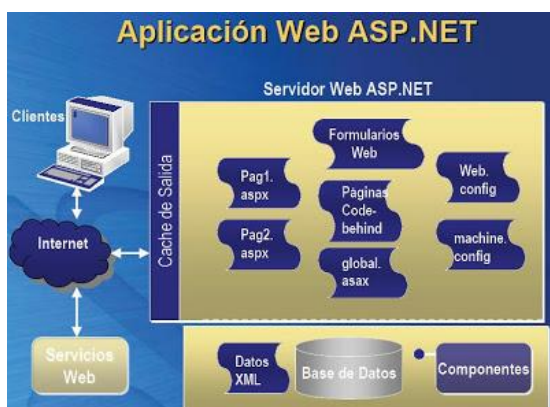


Figura 7. Infraestructura de ASP.NET [17]

Como lo indica la figura 7, ASP.NET permite la conexión a una base de datos que utilizamos para almacenar información propia de la aplicación del cliente, como: usuarios y claves, máquinas virtuales asociadas a usuarios y datos de conexiones para mostrarlos en reportes. Además, permite la fácil conexión con servicios web, que para este caso nos permite manipular los entornos virtuales.

### 3.2.3 Diseño de capas de la aplicación

La Fig. 8 detalla las capas dentro de la arquitectura web en una aplicación web cualquiera. El cliente interactúa con el servidor de aplicaciones web a través de su explorador y mediante el internet y el servidor web a su vez, interactúa con la base de datos, que permite el almacenamiento de cualquier información.

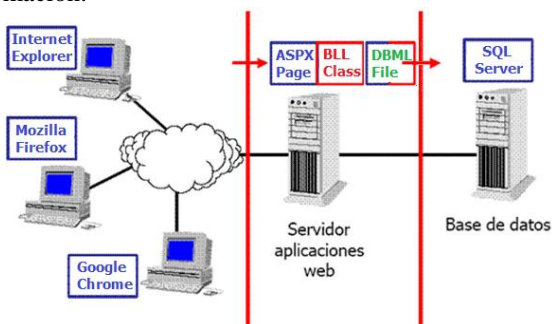


Figura 8. Arquitectura web en tres capas de la herramienta [18].

El desarrollo de la aplicación se basa en un modelo de tres capas:

1. Capa de datos (dbml)
2. Capa de manejo de datos o (DLL)
3. Capa de vista o formulario (páginas web)

### Capa de datos

La capa de datos se encarga de realizar el manejo de información de base de datos directamente, con el fin de procesarla y luego utilizarla dentro de la capa de manejo de datos. Dentro del sistema se creó un objeto de tipo "dbml" (DataBaseModelLayer), que crea una clase c# por cada tabla

de base de datos, permitiendo el acceso a ella a través del uso de LINQ y utilizando la clase como entidad.

### Capa de manejo de datos

Esta capa se encarga de acceder a la capa de datos directamente, con el fin de organizar la información proveniente de la base de datos según se requiera. Dentro del proyecto se utilizó LINQ para acceder a los datos, ya que constituye una herramienta sencilla y ágil de acceso a información. Se crearon muchos métodos para cada una de las tablas que se utilizan dentro del sistema, tales como métodos de obtención de datos, de inserción, de actualización, de borrado de datos, etc.

### Capa de formulario

Esta capa contiene el diseño de las interfaces visuales dentro del sistema. En el sistema se crearon formularios web, que permiten el manejo de usuarios, entornos virtuales, reportes, etc. Se utilizó el lenguaje de programación C# para código servidor y jquery para escribir código cliente.

### 3.2.4 Diseño de las páginas web dentro de la aplicación[3].-

La aplicación de uso del cliente permite que los usuarios ingresen a la misma con una cuenta de usuario y contraseña, si no la tiene, puede crearla mediante la página de registro de usuarios.

El usuario que pertenece a una empresa, necesita que se haya realizado un contrato de servicios de Remote Cloud (servicio que presta el sistema desarrollado) previo a utilizar cualquier funcionalidad de entornos virtuales. Luego de haberlo realizado, será capaz de visualizar una bandeja de entornos virtuales disponibles y de crearlos, actualizarlos, eliminarlos y utilizarlos como desee.

Para empezar la utilización del sistema web del cliente, es necesario realizar la autenticación al sistema mediante la página de Login para tener acceso a las demás páginas de la aplicación. Esto añade seguridad a la aplicación. Si el cliente no tiene un usuario dentro del sistema, puede crearlo mediante la página de Registro de Usuarios.

Una vez que el usuario se autentique en la aplicación, se verificará si tiene o no un contrato previo del servicio, si no cuenta con un contrato, será direccionado a la página de Contratación de servicio para que lo realice, si ya lo tiene, podrá acceder a la bandeja de entornos virtuales y realizar las operaciones que requiera allí. Cambiar contraseña y Reportes son páginas que se pueden acceder luego de haberse autenticado en la aplicación.

Se diseñaron las siguientes páginas dentro de la aplicación como se indican en la tabla 2:

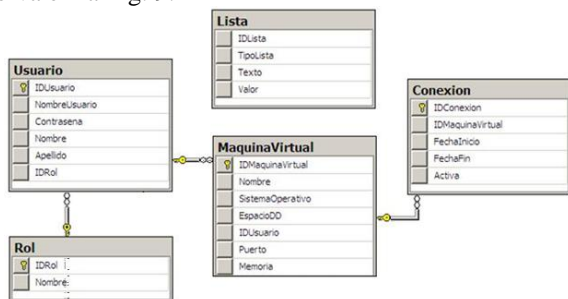


**Tabla 2.** Cuadro explicativo de páginas de la aplicación del cliente

PÁGINA	DESCRIPCIÓN
<b>Login</b>	Autenticación del usuario en el sistema.
<b>Registro de Usuario</b>	Registro de usuarios en el sistema.
<b>Contratación Del Servicio</b>	Contratación del servicio de Cloud.
<b>Bandeja De Entornos Virtuales</b>	Bandeja de máquinas disponibles que tiene el usuario. Tiene botones para las operaciones principales en los entornos virtuales.
<b>Crear/Actualizar Entorno Virtual</b>	Creación y Actualización de características de entornos virtuales.
<b>Visor De Máquina Virtual</b>	Visor del entorno virtual remoto.
<b>Cambiar Contraseña</b>	Cambio de contraseña del usuario.
<b>Reportes</b>	Selección de Reportes que se desea visualizar.
<b>Visor De Reportes</b>	Visor del Reporte.

### 3.2.5 Base de Datos

La base de datos del sistema se encarga de almacenar información referente a Usuarios, Máquinas Virtuales que poseen los mismos, Conexiones que realizan los usuarios a sus entornos, información relacionada con contratación inicial de servicios del Cloud, etc., y se encuentra asociada directamente con la aplicación web del cliente, como se observa en la Fig. 9.

**Figura 9.** Diagrama Entidad-Relación de la Base de datos del sistema

### 3.2.6 Plataformas donde Opera la aplicación

El sistema Remote Cloud App es una aplicación web, que se publica en la nube mediante un servidor web llamado IIS, por lo que su ejecución en el equipo cliente es mediante un explorador web. Esta aplicación está diseñada para ser soportada en Sistemas Operativos Windows con exploradores web: Internet Explorer, Mozilla Firefox o Google Chrome.

En el caso de Mozilla Firefox y Google Chrome, antes de empezar a utilizar la aplicación es necesario instalar un add-on que incluye la misma aplicación, al acceder a ella desde estos exploradores nos indicará el link de descarga.

### 3.2.7 Servidor Web

Un servidor web o servidor HTTP es un programa informático que procesa una aplicación del lado del servidor,

realizando conexiones bidireccionales y/o unidireccionales y síncronas o asíncronas con el cliente y generando o cediendo una respuesta en cualquier lenguaje o Aplicación del lado del cliente. El código recibido por el cliente suele ser compilado y ejecutado por un navegador web. Para la transmisión de todos estos datos suele utilizarse algún protocolo.

Generalmente se usa el protocolo HTTP para estas comunicaciones, perteneciente a la capa de aplicación del modelo OSI. El término también se emplea para referirse al computador que ejecuta el programa.

El servidor Web se configura en una máquina, de preferencia con un sistema operativo para servidores, se encuentra en espera de peticiones por parte del cliente, el que va a tener acceso a una página web en la nube, al teclear dicha página hace una petición http al servidor de la página, este responde enviando el código html de la misma, el software cliente interpreta este código y mediante una página web se lo presenta al usuario.

### Sistema Operativo para el Servidor Web

Se escogió mediante la herramienta “matriz de decisión” en base a algunos parámetros económicos y operativos el sistema operativo Windows Server 2008, ya que posee las siguientes características:

- Incluye el servidor web IIS (Internet Information Server) 7.0, que permite publicar aplicaciones realizadas en la plataforma ASP .NET, como es la que se desarrolló.
- Reduce tiempos de espera en los Terminal Services y en la creación de sesiones de usuario a gran escala.
- Se realizó la instalación de un servidor web en Windows Server 2008 y un servidor web en Linux Centos y se concluyó que el tiempo de instalación y configuración del servidor Windows Server 2008 es de aproximadamente 1 hora, mientras que del servidor Linux Centos es de aproximadamente 3 horas.
- El conocimiento requerido para Windows Server 2008 es bajo, es decir no se necesita de un usuario nivel experto para su administración, mientras que para los sistemas operativos Linux se necesita tener un vasto conocimiento sobre el sistema operativo para su administración.

## 4. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA

### 4.1 Desarrollo del servicio de virtualización.

Se crearon una serie de scripts bash que permiten realizar cada una de las operaciones disponibles en el servicio web. Éstos se encuentran en una carpeta física dentro del servidor de virtualización y serán accedidos por el servicio web java que se encarga de leerlos y ponerlos en ejecución cuando el usuario lo requiera, como se observa en la Fig. 10.

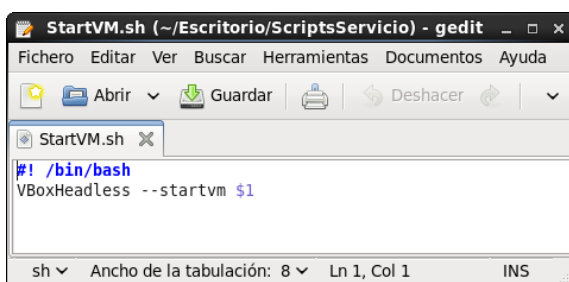


Figura 10. Ejemplo de script de inicio de una máquina virtual

El servicio web de virtualización fue desarrollado en la plataforma Java, dentro de un servidor Linux con distribución Centos, utilizando la herramienta VBoxManage para la manipulación de entornos virtuales en VirtualBox. Los entornos se encuentran alojados dentro del servidor de virtualización y están disponibles para los usuarios mediante un servicio web que opera directamente sobre ellos.

Se utilizó la herramienta Netbeans para Linux, que se encarga de leer los scripts localizados en una carpeta dentro del servidor y ejecutarlos cuando el usuario lo requiera. Consta de varios métodos, cada uno ejecuta una operación de las especificadas anteriormente: Inicio, Actualización, Clonación, Suspensión, Apagado de los entornos virtuales y Lectura de la carga del CPU del servidor de virtualización.

Se utilizan las clases Process y Runtime que permiten ejecutar scripts bash creados previamente mediante el método “getRuntime.exec()” y la librería java.io.\*.

La siguiente porción de código muestra un ejemplo de codificación que indica la manera en que se accede a los scripts bash para ejecutarlos posteriormente:

```
Process p = Runtime.getRuntime().exec("sh /home/andreita/Escritorio/ScriptsServicio/CloneVM.sh")
```

Cada uno de los métodos creados invoca a su respectivo script por cada operación, de modo que se pueda acceder a cada uno de ellos desde la aplicación.

### Carga del CPU del servidor de virtualización[2].-

Se creó un método web dentro del servicio, que ejecuta un script bash cuya función es obtener la carga del servidor un número de veces específica. Utiliza el método “top [nro. muestras]” para obtener las mediciones y coloca estos resultados en una carpeta compartida para que la aplicación del cliente pueda acceder a este archivo, lo procese y lo muestre en un gráfico estadístico.

“top” es una herramienta que proporciona información de los procesos que se están corriendo en ese momento en tiempo real con valores de uso de CPU, memoria, swap y la posibilidad de manipular procesos. Presenta una interfaz simple que cuenta con varias partes.

### Colocar archivo de resultados en una carpeta compartida

Este proceso se realiza después de obtener las estadísticas del servidor mediante el comando top y se encuentra definido dentro del mismo método web que realiza la operación de obtención de estadísticas. Copia el archivo con los resultados de carga del CPU a una carpeta compartida y expuesta mediante la configuración de un servidor SAMBA. El servidor SAMBA permite tener una carpeta accesible desde el servidor donde se encuentra alojada la aplicación web en la que se almacenará el fichero con la información de carga del CPU del servidor para que se pueda acceder desde la aplicación web y mostrar posteriormente en un gráfico.

### 4.2 Desarrollo de la Aplicación Web Cliente.

Se desarrolló una aplicación web que permita el acceso a los entornos virtuales mediante el consumo del servicio web java de manejo de máquinas virtuales para todos los usuarios. Almacena la información en una base de datos creada para registrar las operaciones realizadas dentro de sistema, usuarios y máquinas virtuales creadas.

La aplicación fue realizada en la arquitectura .NET, utilizando el lenguaje de programación orientada a objetos C#. Éste, permite que se utilice el control de acceso remoto a los entornos virtuales: ActiveX Remote Desktop Control, esto se visualiza en la Fig. 11.

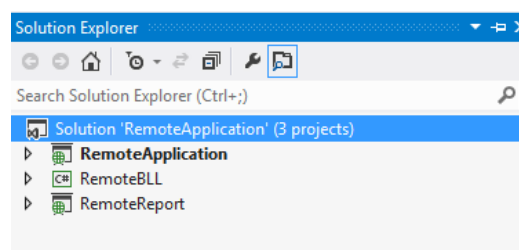


Figura 11. Estructura de proyectos de la aplicación web

La aplicación contiene varias páginas, con el fin de que el usuario pueda manejar registro de usuarios, máquinas virtuales, registro de conexiones, reportes, cambio de contraseña y manipulación de sus entornos, ésto se visualiza en la Tabla 3.

Tabla 3. Listado de páginas web existentes en el sistema

PÁGINA	DESCRIPCIÓN
Site.Master	Master page de la aplicación
HomePage.aspx	Muestra los entornos virtuales de cada usuario
Login.aspx	Autenticación del sistema
Manage.aspx	Cambio de contraseña
Máquina.aspx	Creación/Actualización de entornos virtuales
Register.aspx	Registro de usuarios en el sistema
About.aspx	Páginainicial del sistema
RDPPage.aspx	Visor de entorno virtual
Reportes.aspx	Reportes del sistema

## Visor de Entorno Virtual

El visor de entorno virtual fue creado con el fin de mirar la pantalla del entorno de manera remota. Utiliza el protocolo RDP (Remote Desktop Protocol/Protocolo de Escritorio Remoto) para acceder a las máquinas virtuales mediante un puerto asignado a cada una de ellas. Luego de haber sido creado el entorno virtual, se lo puede visualizar mediante el botón Iniciar.

Se utilizó el Control RDP(Remote Desktop Protocol) ActiveX, que permite conectarse a una máquina remota vía internet y muestra su interfaz gráfica dentro de sí. Éste puede ser embebido dentro de una página web mediante código HTML, utilizando vbscript para realizar operaciones de tipo cliente.

Este código sugerido, incluye en una página HTML normal el control RDP (Remote Desktop Protocol/Protocolo de Escritorio Remoto) ActiveX y luego, mediante funciones de vbscript realiza la conexión remota al computador especificado en el campo "Server" de la página.

Este código ha sido adaptado, la conexión la realiza de manera automática cuando se abre la pantalla del visor, y los parámetros de conexión, como: servidor remoto y puerto, se envían en la URL del visor para luego utilizarlos en la conexión.

La dirección IP remota es la del servidor de virtualización (sistema operativo anfitrión) y es fija, y el puerto es el que indica qué máquina se va a visualizar en el control RDP(Remote Desktop Protocol/Protocolo de Escritorio Remoto). Este puerto es generado automáticamente dentro de la aplicación, y asignado a la máquina virtual en el momento de creación del entorno virtual. Al dar clic en Iniciar entorno, se toma este puerto ya asignado y la dirección IP fija conocida, para enviarlos a la página de visor mediante su URL. Mediante código vbscript, se toma los valores de la URL para realizar la conexión automáticamente.

### Asignación de Puertos a cada Entorno

Los entornos virtuales dentro del servidor pueden ser accedidos desde la aplicación mediante el protocolo VRDP (Virtual Remote Desktop Protocol/Protocolo de Escritorio Remoto Virtual). El puerto por defecto es "3389", pero se puede configurar con puertos distintos a cada una de las máquinas, de modo que cada una sea accesible mediante su puerto específico asignado.

El servidor de virtualización tendrá como puerto de acceso RDP(Remote Desktop Protocol/Protocolo de Escritorio Remoto) al puerto 3389, de modo que la aplicación empezará a asignar los puertos para otras máquinas virtuales a partir del puerto 3390. A medida que se creen más máquinas, el valor del puerto asignado incrementará en 1.

## 5. CONCLUSIONES

Para realizar la aplicación para uso del cliente se utilizó el lenguaje de programación C#, que permitió se use el visor de entornos virtuales RDP ActiveX. Por otro lado, el lenguaje C# es bastante amigable con el desarrollador, ya que cuenta con sentencias de fácil comprensión, excelente set de métodos de manejo de listas, lo que hace que su uso sea intuitivo y sencillo.

La metodología KANBAN permitió que una sola persona pueda desarrollar de una manera ágil, de modo que se pueda presentar un incremento de producto al finalizar cada fase. SCRUM también puede ser utilizado como marco de trabajo de desarrollo, siempre que el número de personas dentro del equipo sea el suficiente para ejercer los roles establecidos por la metodología. En KANBAN no se requiere de cumplir con roles, ni posee ceremonias, se enfoca en la realización de entregables, lo que la hace más valiosa para cuando el desarrollador es una sola persona.

El servicio de virtualización java permitió que se acceda a los scripts de VBoxManage y compartir esta funcionalidad con la aplicación web para uso del cliente. Su realización resultó sencilla gracias a la interfaz gráfica que ofrece NetBeans.

El sistema desarrollado es un prototipo, por lo que se debe reconsiderar el diseño del servidor de virtualización de acuerdo con el número de usuarios que lo utilicen, si se lo va a aplicar en ambiente de producción de alguna compañía, tomando en cuenta los tipos de entornos que cada empresa puede requerir.

Se tuvo dificultades al momento de utilizar el visor de entorno virtual remoto en exploradores web para sistemas operativos Linux debido a que se utiliza un control ActiveX propio de sistemas operativos Windows. Por tanto, la aplicación web para el cliente se ejecuta en los exploradores de sistemas operativos Windows Internet Explorer, Mozilla Firefox y Google Chrome luego de realizar la descarga de un complemento. Éste está disponible para obtenerse desde la aplicación, dentro de la página de autenticación.

La principal ventaja de esta herramienta y su diferencia respecto con las de ambiente LAN, es básicamente que permite el acceso a su funcionalidad, desde cualquier computador ubicado en cualquier lugar de la nube mediante un navegador web para sistemas operativos Windows. Esto facilita su uso sin mayores requerimientos en la parte del cliente.

El sistema desarrollado ofrece la posibilidad de conexión con entornos virtuales ubicados en un servidor de virtualización mediante el uso del protocolo RDP(Remote Desktop Protocol/Protocolo de Escritorio Remoto), que permite el acceso remoto a los mismos. Además se encarga de manejarlos mediante un gestor de máquinas virtuales, que utiliza a su vez la herramienta VBoxManage, que es parte del software de virtualización Virtual Box.

La herramienta VBoxManage es un API sencillo y muy avanzado de gestión de máquinas virtuales sobre línea de comandos que pertenece a Virtual Box. Otras herramientas de virtualización poseen otros esquemas de manejo de entornos virtuales por “scripting” con propiedades avanzadas que tienen un nivel alto de dificultad. VboxManage, en cambio, destaca por su facilidad de utilización, ya que sus comandos son claros y sencillos.

El sistema realiza una asignación dinámica de puertos a cada máquina virtual alojada en el servidor de virtualización lo que permite el acceso remoto a ellas, utilizando una sola dirección IP, que es la del servidor de virtualización y el puerto que hace la diferencia para cada una de las máquinas virtuales. Esto evita la manipulación directa por parte del usuario sobre este parámetro sensible, que de ser modificado manualmente, el acceso al ordenador no funcionaría.

## REFERENCIAS

- [1] MENASCÉ, D. A.; ALMEIDA, V. A.; DOWDY, L. W.; DOWDY, L. Performance by design: computer capacity planning by example. [S.l.]: Prentice Hall Professional, 2004.
- [2] Cloud Security Alliance. “Guía para la Seguridad en áreas críticas de atención en Cloud Computing”. Noviembre 2009. PDF
- [3] MILLER, Michael. “Cloud computing, web based applications, that change The Way you work and Collaborate on Online”- Safari books online, 2008.
- [4]. Karen Scarfone. Guía de Seguridad para tecnologías de virtualización completa .Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST),2011.
- [5] . Peter Mell, Timothy Grance, The NIST Definition of Cloud Computing . Septiembre 2011 .pdf
- [6] TULLOCH, Mitch y Micosoft Corporation@. Understanding Microsoft Virtualization Solution. EstadosUnidos de América.2010
- [7] CLARK, Tom. Storage Virtualization: Technologies for simplifying data storage and management. Addison-Wesley Professional. COMER, Douglas. Interconectividad de Redes con TCP/IP Vol.2 3ed. Purdue University; David L. Stevens : Sequent Corporation, (aut.). Prentice Hall.2005
- [8] BONILLA, Jorge; CARRASCO, Daniel. Proyecto de Titulación: “Análisis en implementación de un prototipo de servidor utilizado sobre una distribución de Linux para el uso en Pymes”. Escuela Politécnica Nacional, Facultad Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Quito, febrero 2010.
- [9] CARRERA, Iván; RIVADENEIRA, Marco. Proyecto de Titulación: “Dimensionamiento de un Servidor para una red basada en la infraestructura LTSP (Linux Terminal Server Project) con clientes ligeros. Aplicación: Uso de NTICs en Educación General Básica y Bachillerato”. Escuela Politécnica Nacional, Facultad Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Quito, febrero 2011.
- [10] GUERRERO, Ana; MENA, Elisa. Proyecto de Titulación: “Implementación de un prototipo de Cloud Computing de modelo privado para ofrecer infraestructura como servicio (IaaS)”. Escuela Politécnica Nacional, Facultad Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Quito, Noviembre 2010.
- [11] Computer Security Division; Information Technology Laboratory; NIST.Cloud Computing: A Review of features, benefits, and risks, and recommendations for Secure, Efficient implementations. ITL Bulletin. 2012.
- [12] Gonzalo Nazareno. Sevilla. Proyecto de Innovación, Implantación y puesta a punto de la infraestructura de un Cloud Computing privado para el despliegue de servicios en la nube. Virtualización de servidores. Conceptos básicos. IES 2011. Pdf.
- [13] Isaac Triguero Velázquez “Seminario Cloud Computing “Infraestructure as a Service”.Universidad de Granada. 2013.
- [14] Dan Kusnetzky “Virtualization: A Manager’s Guide”. Kusnetzky Group LLC. Copyright © 2011 .

## FIGURAS:

- [15]<http://es.slideshare.net/pfsgrupo/soluciones-de-virtualizacion>
- [16]<http://blog.virtualizamos.es/2011/11/15/cuando-utilizar-tecnologias-open-source-para-construir-nuestra-nube/>
- [17] <http://paginawebareas.blogspot.com/2012/11/edith2web-creacion-de-sitios-web-con.html>
- [18] <http://aplicacionesweb2013.blogspot.com/2013/03/arquitecturacliente-servidor.html>

# Sucesión en las Empresas Familiares: Análisis de los factores estratégicos que influyen en la dinámica familia-empresa

Santamaría E.\*; Pico F.\*\*

\*Universidad Técnica de Ambato, Facultad de Ciencias Administrativas, Ambato, Ecuador

e-mail: edwinjsantamaria@uta.edu.ec

\*\* Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Sede Ambato, Facultad de Administración, Ambato., Ecuador

e-mail: pualinapico@hotmail.com

**Resumen:** Las empresas familiares que forman parte de la economía del país no han sido analizadas desde su realidad, donde los intereses de la familia y empresa en ocasiones ponen en riesgo su continuidad. Para ello, se plantea como objetivo analizar los factores estratégicos que influyen dentro de la empresa familiar.

Se considera una muestra de estudio de 280 casos de los cuales 267 poseen las características de empresa familiar en la provincia de Tungurahua – Ecuador, arrojando que el 95.4% de empresas son de este tipo y se constituye en fuente de empleo para 3 miembros de la familia y al menos dos personas externas, es decir, es una de las principales fuentes de ingresos económicos para la provincia. La vida de las empresas familiares está ligada al bienestar familiar por ello el 96% de empresas tienen más de dos años, llegando incluso el 4% a superar los 33 años de funcionamiento. Se encuentra que el estilo de dirección en la empresa está relacionado al tipo de liderazgo que aplica el propietario en la familia, es decir, puede ser autocrático o participativo con la familia y dentro de la empresa con los subordinados. Se estructura un modelo multivariante de correspondencias principales para determinar la relación entre los factores estudiados, determinando que: Liderazgo y Autoridad del propietario, Estrategias administrativas, Planes de mediano plazo en las empresas y Formación del empresario son los principales factores estratégicos que repercuten en la dinámica empresa familia.

**Palabras clave:** empresa familiar, factores estratégicos, familia empresaria, estrategia empresarial, sucesión, continuidad.

**Abstract:** Family businesses that are part of the economy have not been analyzed from their reality, where the interests of the family business and sometimes endanger their continuity. For this, it is essential to analyze the strategic factors that influence within the family business. It has been considered a study 280 cases of which 267 have the characteristics of family business in the province of Tungurahua - Ecuador, showing that 95.4% of companies are of this type and represents a source of employment for 3 members of the family and at least two external, that is to say, is the source of income for the province. The life of family businesses is linked to family welfare why 96% of companies have more than two years, even the 4% to exceed 33 years of operation. It is that management style in the company is related to the type of leadership that applies the owner in the family, that is to say, can be autocratic or participative with the family and within the company are subordinate. A multivariate model main correlation to determine the relationship between the variables studied structure, determining the strategic factors of family businesses are: Leadership and Authority owner, administrative strategies, medium-term plans in business, entrepreneur training.

**Keywords:** Family business, strategic factors, business family, business strategy, succession, continuity

## 1. INTRODUCCIÓN

Las empresas familiares son los elementos más efectivos en el desarrollo económico, generando puesto de trabajo [1], seguridad, oportunidad y progreso a los participantes activos y pasivos del proyecto familiar, a la comunidad y a la estructura económica nacional. [2]

Dentro del estudio de la estrategia y dirección de empresas existe poco espacio dedicado a la empresa familiar a pesar de su influencia en la economía, es así que, dentro de *Academy of Management*, la asociación más prestigiosa en el ámbito de dirección de empresas no contempla ningún apartado para la empresa familia [2], sin embargo se han observado en los últimos años la creación de otros espacios como observatorios académicos como el Instituto de la Empresa Familiar en Argentina, Colombia y muy recientemente en Ecuador.

En la ciencia económica no se ha considerado a la empresa familiar como objeto de estudio, ya que la empresa y la

Artículo recibido el 15 de diciembre, 2014; revisado 15 de diciembre, 2014.

E. J. Santamaría, Máster en Estadística Aplicada, Docente investigador para la Universidad Técnica de Ambato, Facultad de Ciencias Administrativas, edwinjsantamaria@uta.edu.ec, Cod. Postal: 180208 Ambato, Ecuador.

F. P. Pico, Magister en Gestión Empresarial, Docente Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Sede Ambato, paulinapico@hotmail.com, dirección: Pasaje B y Bolívar Sevilla, Ambato, Ecuador.

familia (agentes económicos) se abordan de manera independiente: la primera, como demandante de factores productivos y oferente de bienes y servicios; y la segunda, como oferente de factores productivos y demandante de bienes y servicios. Las relaciones entre estos dos sectores quedan establecidas en el modelo económico denominado “Flujo Circular de la Renta”. [3].

En Ecuador el 77% de las empresas más grandes del país son familiares, en la pequeña y mediana empresa es el 95%, generando el 51% del PIB del país, según lo menciona Josemaría Vásquez. [4]

Sin embargo, las empresas influyen en la economía pero son muy vulnerables a las condiciones de mercado y problemas de la familia, es por ello que se requiere analizar su problemática, siendo una de las principales causas la continuidad luego de cambios generacionales, observando cifras de esta debilidad como: La esperanza de vida de la empresa familiar baja, solo el 30% llega a la segunda generación y el 15% pasa a la tercera generación, según se manifestó en evento en Seminario Ecuador en el año 2009 [5].

Existen muchas razones por lo que las empresas familiares no logran sobrevivir, tales como: la carencia de un sistema administrativo, operación con un sistema inadecuado, manejo ineficiente de los recursos, y una carencia de control de la familia de acuerdo a investigaciones previas [6]

Se conoce de las empresas familiares son fruto de emprendimientos personales y cuentan con el apoyo de una familia, sin embargo, hay desconocimiento de cómo se han sostenido en el tiempo y cuáles son sus prácticas que le han hecho sobrevivir a las fluctuaciones económicas del país [6].

[7] Dodero reconoce que los propietarios de las empresas familiares en un 79% prefiere “seguir luchando contra viento y marea” por la subsistencia de la empresa, principalmente por los sentimientos afectivos que vinculan a la familia con la misma.

## 2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

Las definiciones de empresa familiar son variadas y aparece como término en la década de los 70 donde autores como Barnes y Harshon, Barry, Levinson y otros más introdujeron el concepto en el estudio de la empresa y posteriormente diversos trabajos reconocen su importancia como fuente dinamizador de economías. [2] Parte de estos estudios muestran la existencia de resistencia para el ingreso de nuevos socios que están fuera de la familia, llegando a considerar “extraños” y como un fracaso la inclusión de otros miembros [7], por otra parte tampoco existen muchos inversionistas interesados en comprar participaciones de empresas familiares, es decir la empresa familiar está fusionada a la familia.

En las empresas familiares existe la interacción de dos sistemas sociales y económicos (familia y empresa), lo cual constituye un sistema dual [8], del cual se han intentado aprovechar con programas de formación, capacitación y seguimiento empresarial. Del mismo modo la teoría general del sistema refuerza la visión de que es necesario dirigir nuestra atención a la interacción de diversos elementos en el

sistema para comprenderlo en el cual se observa a la empresa que está compuesto por tres subsistemas: empresa, familia y propiedad que interactúan de modo dinámico [9], criterio que es denominado como: modelo de los tres círculos [10]

De los modelos desarrollados, también se encuentra el modelo de los cinco círculos, donde se analiza la continuidad de la empresa familiar [11], haciendo énfasis en el proceso de sucesión y profesionalización de la familia; y, de esto dependerán las estrategias de la empresa, como se analiza en los siguientes temas.

### Proceso de sucesión

Aproximadamente una de cada tres empresas familiares logran pasar exitosamente a la siguiente generación, por lo que también para ellas son contrarias las posibilidades de supervivencia (*Handler, 1994*), como lo menciona Belausteguigoitia [9]

Los empresarios no planifican y ni siquiera eligen con tiempo a sus sucesores. En un estudio realizado por el *Raymond Institute* (2003), se determinó que sólo 42% de los propietarios que dejarán el negocio en los siguientes cinco años ha elegido a su sucesor, causando que el cambio sea sin planificación y de una forma precipitada. Esto se confirma con los hallazgos del mismo instituto, el cual encontró que en Estados Unidos el 63% de las empresas familiares carece de un plan estratégico y guían sus esfuerzos por acciones improvisadas. [9]

Frente al largo panorama sobre la sucesión, las empresas familiares pueden inspirarse en otras empresas exitosas. Existe una asociación mundial que agrupa a organizaciones de diversas partes del mundo que han conservado su naturaleza familiar por más de 200 años, llamada *Les Hénokiens*. Empresas como Codorniz (vinos, España, desde 1551), Bereta (armas, Italia, desde 1526), y J.D. Neuhaus (grúas, Alemania, desde 1745) son parte de esta asociación. [12]

Belausteguigoitia [9] menciona que la sucesión involucra a los tres subsistemas de la empresa familiar, de lo cual en la empresa, el cambio de mando genera una revolución que puede causar incertidumbre entre los que, de alguna manera, dependen de ella. [13]. Estos cambios afectan a la gestión propia de la empresa; creando una nueva gestión, propiedad y control de la misma. Quien controla la propiedad ejerce el poder y, si lo desea, la dirección de la empresa puede delegarse si se decide nombrar a un director general. [14] El cambio de propiedad suele suceder por aspectos como la jubilación y retiro del fundador, así como procesos de expansión y crecimiento que hacen de la sucesión una estrategia gerencial y de cuidado patrimonial.

### Profesionalización y formación del empresario

Según el diccionario de la real academia española, un profesional es aquella persona que realiza su trabajo con conocimiento y aplicación con fines de lucro. Las organizaciones están dispuestas a pagar el alto precio que eso supone si bien los beneficios suelen ser significativos.

Dentro de la empresa familiar se presenta el proceso de profesionalismo se maneja en forma empírica, liderazgo, autonomía y por último delegación. Inicialmente, el fundador

de la empresa es quien lidera los procesos de manera empírica. [15]

Después de cierto tiempo se presenta la primera crisis llamada de liderazgo. Si la empresa crece requerirá ser dirigida en forma adecuada y con una perspectiva diferente que contenga principios de administración.

Posteriormente, la autonomía se presenta, donde la dirección se ve en la necesidad de descentralizar las decisiones y delegar tanto responsabilidades como autoridad a sus colaboradores, para lo cual conforma grupos de trabajo especialistas en diferentes áreas de la empresa. Lo cual lleva a las empresas a otra etapa de crecimiento: delegación.

### Gestión Administrativa

Para definir el rol de la gestión administrativa se visualiza la gestión como un modelo sistémico donde se observa la planificación estratégica como pilar de la gestión y por último se expresa el rol que juega el control en los procesos operativos y productivos de las empresas [18].

La visión de la gestión como un sistema se ha alimentado de distintas corrientes teóricas: desde las teorías sociológicas, como la de Talcott Parsons. El fondo común de estas visiones de sistema puede limitarse a cuatro conceptos básicos. [16]

**Jerarquía.-** se parte del supuesto de que en el mundo existen jerarquías tanto entre organizaciones como al interior de cada una de ellas.

**Comunicación.-** Todo sistema establece unas interrelaciones con el medio, lo que puede darle una capacidad de reacción.

**Control.-** Junto con la noción de propiedad emergente, es tal vez el supuesto que más comparten todos los conceptos de gestión y control se han visto como sinónimos. [17]

**Objetivos y estrategia.-** El conjunto de prácticas directivas no sólo da una idea y delinea formas y modelos de gestión, sino también un estilo, una forma de liderazgo [18].

Tabla 1. Diferencias estratégicas y operativas

CARACTERÍSTICA	MODO ESTRATÉGICO	MODO OPERATIVO
Finalidad	(Recreación) del potencial de la empresa	Explotación del potencial de la empresa
Objetivo	Eficacia: alcanzar objetivos a largo plazo	Eficiencia: mejor los rendimientos a corto plazo
Tipo de pregunta	¿Se hacen las cosas necesarias?	¿Se hacen las cosas como es debido?
Consigna	Innovar	Optimizar
Tipo de proceso	Iniciativa empresarial	Incremental (mejoramiento marginal)
Actitud	Crear, modificar, basarse en las reglas de juego” (especialmente competitivo)	Gestionar dentro de las reglas de juego
Concreción	Decisiones en inversiones estratégicas	Acciones cotidianas (inversiones estratégicas)

Fuente: Adaptado de Chiavenato, 2011: Planeación estratégica.

### Estructura y organización

Las estructuras pueden, bajo la forma tradicional de gestión, ser burocráticas y centralizadas, o pueden tender, en su forma moderna, hacia una estructura más plana, con la consecuente

reducción de los niveles jerárquicos y una descentralización operativa que dé mayor autonomía y más responsabilidad a los individuos, pero dentro de una centralización estratégica que garantice una directriz, una coherencia y una eficacia global a la empresa. [19]

“La idea de controlar las actividades de una empresa industrial mediante un conjunto de resúmenes de datos bien sistematizados fue concebida entre los años de 1927 y 1930 por Polleen, hombre de gran experiencia en la dirección de negocios industriales”. [20]

El control puede realizarse en el interior de áreas funcionales, lo que les permite controlar el cumplimiento de sus metas particulares, por ejemplo, en la gerencia media, los objetivos de ventas, de producción, la liquidez; o en la alta gerencia, donde se evalúa el desempeño de todas las áreas y se toman decisiones que las afectan a todas ellas. [21]. Con la finalidad de fundamentar el concepto de control de gestión, se enuncian en la tabla 2 algunas de sus características.

Tabla 2. Característica del control de gestión

Complejidad	Temporalidad	Diseño	Relatividad
Económico	Permanente	Adaptado a estructura	Estándar
Sintético	Periódico	Formalizado	Cronología
Selectivo	Histórico	Por excepción	Referenciación
Numérico	Proyectado		
Gráfico			

Fuente: Adaptado de Blazquez, 2007 Control de gestión y sustentabilidad

### Estrategias, planes a mediano y largo plazo

La estrategia es acción: las organizaciones son un conjunto de acciones coordinadas. El éxito de una estrategia radica en realizar una acción compartida que justifique el uso de recursos que involucren y que permitan a cada persona y a la organización perfeccionarse simultáneamente. Hacer estrategia consiste en entender cómo juegan determinados factores asociados al entorno, y, en actuar sobre aquello que hace única a la organización. [22]

La “dirección estratégica es el proceso que, mediante las funciones de análisis, planificación, organización, ejecución y control persigue la consecución de una ventaja competitiva sostenible en el tiempo y defendible frente a la competencia, a través de la adecuación de los recursos y capacidades de la empresa y su entorno, a fin de satisfacer los objetivos de los múltiples grupo participantes en la organización” [23]. Por tanto la puesta en práctica de esta misión de la Dirección General se traducirá en un sistemático proceso de reflexión consistente en la acción planificada de los recursos con los que ésta cuenta para alcanzar los citados objetivos. [24]

Los objetivos estratégicos de una empresa giran alrededor de tres ejes: el primero, tiene que ver con la consolidación, supervivencia o estabilidad de la empresa, el segundo, con la rentabilidad de la empresa, y el tercero, contempla el crecimiento de la empresa [24].

### 3. METODOLOGÍA

Se adopta una corriente fenomenológica, en concordancia al enfoque cualitativo, que permita situarse en el marco de referencia interno del sujeto que lo vive y experimenta [25], por lo que este trabajo plantea como objetivo: Analizar los factores estratégicos que influyen en la dinámica empresa familia dentro de las empresas familiares.

La investigación científica se concibe como un conjunto de procesos sistemáticos y empíricos que se aplican al estudio de un fenómeno; la empresa familiar es dinámica, cambiante y evolutiva. [26]. En relación al valor y a la relevancia que tiene esta investigación se hace necesario acudir al enfoque mixto.

El enfoque cualitativo, se utiliza para identificar las fases necesarias previas al plan de sucesión, es decir revisar las estrategias administrativas y profesionalización que llevan a la empresa a la supervivencia en el tiempo. El mismo llevado a cabo a partir de las necesidades que se deben cubrir dentro del enfoque sistémico. Es decir, se debe cuidar los aspectos relacionados a la propiedad y su transferencia total o parcial, las relaciones familiares actuales y futuras y por último la gestión administrativa a través de los miembros de la familia más adecuados y preparados para realizarlo.

El enfoque cuantitativo se utiliza en segunda instancia, pretendiendo correlacionar la evidencia bibliográfica sobre las variables existentes dentro de la empresa familiar desde el punto de vista de factores estratégicos (Liderazgo y Autoridad, Estrategias administrativas, planes y formación del empresario) y el desarrollo práctico de las mismas, para esto se utiliza el enfoque de análisis multivariante, mediante el uso de correspondencias principales, determinando la influencia y relación entre los elementos que conforman las 8 variables consideradas y que son parte de los factores estratégicos.

Se toma como caso de estudio las empresas familiares en la provincia de Tungurahua, que concentran el 10% de empresas de Ecuador, una de las tasas más altas del territorio nacional [6].

Se utilizó como unidad de análisis el criterio de empresarios de los diversos sectores industriales que existen en la provincia, tomando en cuenta a 280 propietarios de empresas. La investigación se desarrolla bajo el tipo descriptivo buscando el análisis del conjunto de hechos de la gestión administrativa y la dinámica del proceso de sucesión.

La empresa familiar requiere del manejo de grupos donde se espera que "afloren sentimientos y motivaciones que de manera individual no se observarían". [27], Como bien señala Ander-Egg al respecto: "La experiencia ha demostrado que lo que se obtiene en una reunión de grupo, es diferente a la información que se puede obtener de la totalidad de los miembros que la integran, considerados individualmente" [28].

El desarrollo de la investigación parte desde la revisión de información que influye en la gestión administrativa hasta determinar la proyección de sucesión dentro de la empresa, de esta manera se reúne evidencias para identificar los factores estratégicos. El trabajo divide a la empresa en análisis de la estructura de la empresa, posteriormente

revisión de las áreas estrategias en la empresa y las estrategias dentro del proceso de sucesión dentro de la empresa familiar. Por último, se realiza el análisis relacional de los factores estratégicos que influyen en la empresa.

### 4. HALLAZGOS

#### Estructura y organización empresarial

Se analizaron 280 empresas de la ciudad de las cuales 267 tienen la característica de empresa familiar, constituyendo en la provincia el 95,4% de empresas como familiares, por tener dentro de sus características que el propietario de la empresa es quien administra y en varias ocasiones acompañado por otro miembro de la familia.

Tabla 3. Sector empresarial analizado

Sector empresarial	Frecuencia	Porcentaje
Comercial	84	31,5
Agrícola	8	3,0
Industrial-Producción	87	32,6
Artesanal	32	12,0
Financiero-Cooperativo	1	0,4
Servicios	55	20,6
Total	267	100,00

Cuando se analiza el sector comercial las empresas más pequeñas corresponden al emprendimiento de una familia o del jefe de hogar llegando al 100% negocios con características de empresa familiar, al igual que el sector artesanal. En los sectores de producción la cifra cambia por la aparición de socios en la formación de las empresas.

En el sector financiero, especialmente de cooperativas se encuentra que en su constitución está formado por socios, sin embargo la administración corresponde a una familia. De ello se analizó un solo caso donde los socios eran personas relacionadas a un grupo familiar.

Las empresas familiares (Tabla 3) se encuentran principalmente en el sector de producción y comercial con el 64% de empresas, seguido por la prestación de servicios el 20% de ellas, es decir, la actividad económica de la provincia está relacionada directamente con la empresa familiar y es responsable de los ingresos que se generan para la Provincia. Las empresas familiares en el 64.6% de casos está constituida como persona natural, esto principalmente por la facilidad de constituir una empresa unipersonal, frente a los requisitos que son necesarios para una compañía o sociedad anónima de acuerdo al criterio de los empresarios (Fig. 1). Del 17% de empresas que tienen personería jurídica han seleccionado esta modalidad principalmente por la inclusión de nuevos miembros a la familia empresaria (hijos y matrimonios de los hijos)



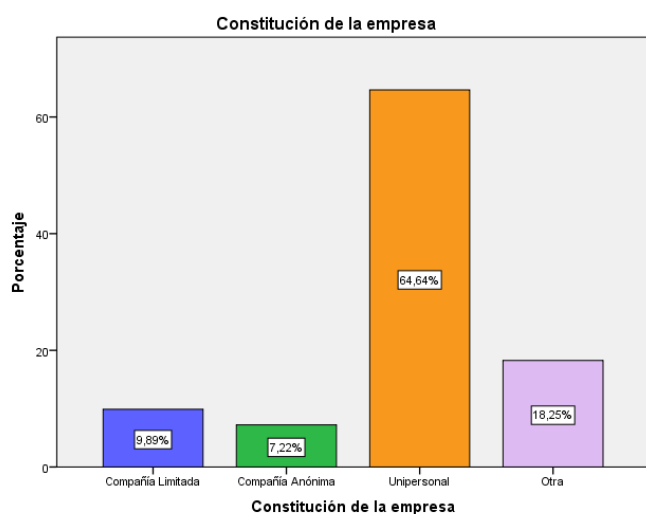


Figura 1. Constitución de las empresas

El 94% de las empresas estudiadas tienen más de 2 años de existencia, el 27% de casos supera los 15 años (Tabla 4) indicando que la empresa está muy ligada a la estabilidad financiera y social de la familia, haciendo que la actividad empresarial se mantenga en el tiempo. Además, el 75% de empresas posee de 1 a 10 trabajadores adicionales al propietario de la misma y el 18% de empresas llega hasta 25 empleados (Fig. 2) indicándonos que las gran mayoría de empresas familiares son micro, pequeña y mediana empresa.

Tabla 4. Tiempo de vida

Años de funcionamiento	Frecuencia	Porcentaje
<= 2 años	16	6,3
3 - 10 años	138	54,5
11 - 15 años	26	10,3
16 - 32 años	58	22,9
33+ años	15	5,9
Total	253	100,0

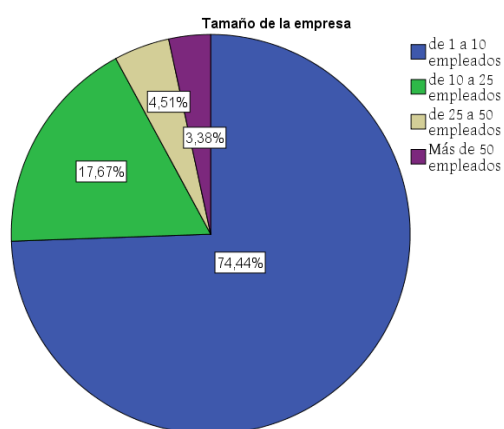


Figura 2. Cantidad de empleados

La empresa posee sistemas de gestión (Tabla 5) en más del 50% de casos, es así que sistemas de calidad poseen el 55% de empresas, el 63% posee un sistema de seguridad y salud

ocupacional y el 41% sistemas ambientales. Esto por exigencias del estado y decisión propia. Existen sistemas que van desde el poseer normas de cumplimiento del municipio o del estado hasta sistemas de gestión propios como: Buenas prácticas de producción, Normas ISO, control de desperdicio, normas ambientales, control de inventarios que serán de utilidad para la toma de decisiones en la empresa.

Tabla 5. Sistemas de gestión

Sistemas de gestión	Si	% Posee
Sistema de calidad	108	55.67%
Sistema de seguridad y salud ocupacional	130	63.41%
Sistema de gestión ambiental	81	41.32%

Tabla 6. Administración

Responsable en Gerencia	Frecuencia	%
El mismo que el fundador	216	80,9
Es el hijo del fundador	44	16,5
Es nieto del fundador	1	0,4
Es una persona contratada por la familia del fundador	4	1,5
No responde <sup>1</sup>	2	0,07
Total	267	100,0

<sup>1</sup> Empresas que no proporcionan esta información

Las empresas familiares (Tabla 6) en el 80% están a cargo del fundador de la misma, es decir son de primera generación, el 18% son de segunda generación, de las cuales el 1.5% son administradas por personas ajenas a la empresa; dentro del grupo de empresas analizadas solo el 0.4% llega a tercera generación. Esto tiene relación con la edad de las empresas, pues tenemos que el 5% de empresas tienen más de 33 años de existencia.

En el 78.4% de los casos (Fig. 3) se observa que, el representante de la empresa es el jefe de hogar. Es decir la empresa está relacionada directamente con la administración del hogar y por ello corren el riesgo de mezclar los roles empresa-familia. El gerenciamiento de la empresa está ligado con el liderazgo de hogar, uniendo los dos ambientes, convirtiéndose en ejemplo de su grupo familiar.

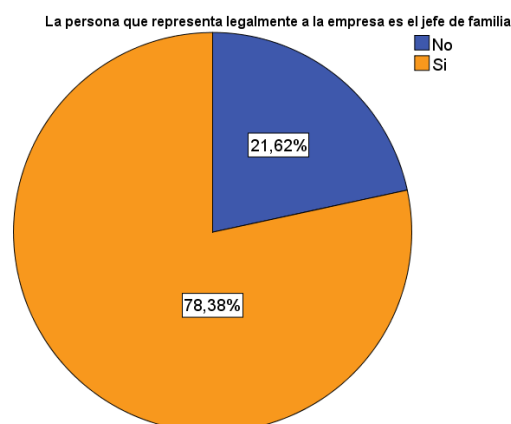


Figura 3. Representante de la empresa

La formación académica del grupo familiar propietario de la empresa es mayoritariamente a nivel de ingeniería o licenciatura como se observa en la Tabla 7, dando prioridad de estudio al Propietario, Hijos, Esposa y otros miembros de la familia, en ese orden. En muchos de los casos los emprendimientos también han surgido de la experiencia de su trabajo de lo cual se constituye el nuevo negocio.

**Tabla 7.** Estudios de la familia empresaria

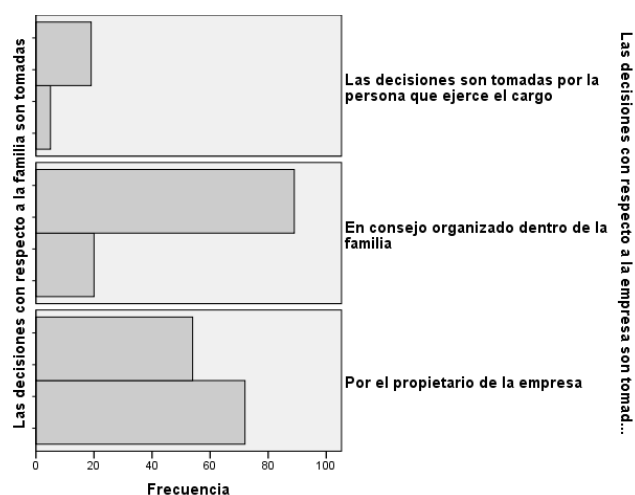
Estudios Realizados	Propietario de la empresa	Esposa del propietario	Hijo primogénito	Otro miembro en la empresa
Básico	51	45	10	1
Bachiller	91	69	57	27
Tecnólogo	19	15	7	3
Tercer nivel	83	59	65	24
Cuarto Nivel o +	9	5	7	5

Se observa (Tabla 8) que en promedio se encuentran 3 miembros de la familia dentro de una empresa, registrando mínimo 1 persona y máximo 15 personas de la familia dentro de la estructura empresarial. De lo cual, se puede encontrar que la principal fuente de ingresos de una familia es la empresa por lo cual, el cuidado y preocupación por la actividad económica de la misma se convierte en un elemento de discusión familiar.

**Tabla 8.** Cantidad de personas de la familia en la empresa

	Estadístico	Valor
	Dentro de la empresa familiar, cuantos miembros de la familia trabajan	Media
Media recortada al 5%		2,93
Mediana		3,00
Desviación Estándar		1,72
Mínimo		1
Máximo		15

De lo cual se observa que las decisiones tomadas en la empresa familiar tienen relación con el estilo de liderazgo del jefe de familia (Fig. 4), es decir las familias que toman la decisión autocrática, en la empresa son tomadas de la misma manera, siendo apoyados por la pareja del mismo. Para las empresas que poseen decisión en consenso familiar de igual manera lo realizan dentro de la empresa por medio de consejos familiares (se pueden considerar primitivos pues ejecutan actividades aunque no tengan las normas establecidas formalmente), las empresas que poseen personas que ejercen decisión dentro de la empresa surgen de familias donde las decisiones importantes son tomadas por los miembros de la familia en consenso.



**Figura 4.** Toma de decisiones familia-empresa

### Estrategias de la familia empresaria

Dentro de las estrategias de las empresas familiares, se reconoce que más del 65% de empresas estudiadas poseen una estrategia en los diversos aspectos de la misma (Tabla 9), con ello podemos evidenciar que la familia se preocupa de la actividad de la empresa. De esto se observa que la principal preocupación es el manejo financiero de la empresa y manejo de relaciones con los proveedores (más del 80% poseen estrategias financieras y de proveedores), seguido por los ingresos relacionados con las actividades de venta (Estrategias de mercado 77%, Diseño y desarrollo de productos 77%, calidad de productos 79%); la preocupación por el talento humano es una de las debilidades que enfrenta la empresa (67% se preocupa por estrategias de recursos humanos). De estas estrategias son realizadas en su mayoría en consenso entre los miembros que trabajan en la empresa y trabajadores fuera de la familia empresaria que están relacionados con el tema de las estrategias.

**Tabla 9.** Uso de estrategias dentro de la empresa

Áreas Estrategias	% Existe	En consenso	Solo el propietario
Gerenciales	72.0%	109	71
Mercado	76.8%	113	79
Producción	72.8%	97	77
Recursos humanos	67.2%	100	64
Financieras	82.3%	112	92
Diseño y desarrollo de productos	77.1%	124	61
Calidad	78.5%	124	70
Manejo de proveedores	88.0%	94	127

También, se observa que el fundador de la empresa está ligado a todos los ámbitos empresariales y requiere de una gran dedicación para el funcionamiento de la empresa.

De los instrumentos de información que existen dentro de la empresa (Tabla 10) se destaca que el área de tesorería, mercado y recursos humanos son las que menos información poseen, del resto de áreas se destaca que el uso de informes

son los más utilizados sobresaliendo el manejo de inventarios, compras, cuentas por cobrar y cuentas por pagar. Toda esta información está relacionada con el manejo económico y salud financiera de la empresa y por lo tanto de la familia al ser la principal fuente de ingresos como se indicó anteriormente.

**Tabla 10.** Instrumentos de información utilizados

	Ninguno	Reporte	Informe	Cuadro	Evaluación
Área Financiera	27	49	44	6	3
Área Contabilidad	20	56	55	3	7
Área Tesorería	48	22	29	6	1
Área Mercadeo	38	21	24	6	8
Área Ventas	15	59	45	9	8
Área Producción	29	30	42	3	3
Área Inventarios	17	31	54	7	6
Área Compras	16	43	48	8	10
Área Costos	26	25	31	10	6
Área Recursos Humanos	46	19	25	1	14
Área cuentas por cobrar	26	35	49	9	2
Área cuentas por pagar	20	40	48	10	2

El acceso a la información debe ser permanente dentro de la empresa, encontrando que la mayoría de empresas (Tabla 11) requiere de información semanal y mensual siguiendo la evolución de los resultados de la empresa, en pocas ocasiones la información es trimestral o un periodo más largo de tiempo. Haciendo evidente la preocupación de la familia por la salud de la empresa. Los dueños son quienes deciden la compra o inversiones de la empresa, en muy pocas ocasiones la decisión final está dada por la familia del empresario.

**Tabla 11.** Periodicidad de la información

	Semanal	Mensual	Trimestral	Otro
Área Financiera	74	93	20	11
Área Contabilidad	55	122	18	23
Área Tesorería	64	52	10	17
Área Mercadeo	55	49	34	17
Área Ventas	119	59	16	23
Área Producción	86	51	12	20
Área Inventarios	56	73	31	31
Área Compras	105	83	16	16
Área Costos	58	64	18	17
Área Recursos Humanos	40	67	23	20
Área cuentas por cobrar	86	88	16	12
Área cuentas por pagar	79	108	12	13

### Proceso de sucesión

La empresa en su proceso de sucesión se preocupa de proporcionar información para las nuevas generaciones, principalmente por el desarrollo de trabajo conjunto en el 44,6% de casos y proporcionando información general de la empresa el 30,7% de ocasiones facilitando el proceso de sucesión. Se reconoce que el 6,7% de fundadores acompaña al sucesor en el traspaso de funciones y el 8,2% posee procesos documentados, facilitando el proceso. En el 5,6% de casos la información se provee el momento de asumir la nueva gerencia su rol, estos, por casos fortuitos o problemas existentes en la dinámica familiar.

De la transparencia de información existente, se espera que las empresas se incrementen las que llegan a tener de vida y en manos de segunda y tercera generación.

Como preparación de las empresas para la sucesión, se analiza el destino de los recursos económicos de las empresas (Tabla 12) donde se reconoce que el 49,2% de ingresos se reinvierte dentro de la empresa haciendo posibles procesos de expansión de la empresa, y el 42,6% destina los excedentes o rendimientos de la empresa de una manera no ordenada dando prioridad a las necesidades existentes en la familia y la empresa. Esta es una debilidad de la empresa que puede ocasionar riesgos financieros por falta de liquidez de la empresa.

**Tabla 12.** Manejo de réditos económicos

Destino de Utilidades	Frecuencia	%
Reinversión dentro de la empresa	127	49,4
Se asigna para cubrir las necesidades familiares	20	7,8
Se les asigna a la empresa y familia de acuerdo a las necesidades que aparezcan	110	42,8
Total	257	100,0

En su relación con el sector empresarial se reconoce que las empresas familiares tienen rivalidad con sus competidores (37%) haciendo que las mismas no mantengan relaciones con el sector e impidan la aplicación de estrategias gubernamentales de fomento de las empresas. Al mismo tiempo el 50% reconoce que posee algún tipo de acuerdo o son representados por asociaciones, haciendo que las empresas estén en riesgo de rezagarse o que sean sujetas de medidas que no estén acorde a sus necesidades por falta de acuerdo dentro del sector.

### Relación de los Factores estratégicos de la Empresa Familiar

De la información obtenida se realiza un análisis correlacional entre las variables, para ello se debe en primer lugar definir las variables analizadas. Los factores estratégicos que se consideran para el estudio, se dividen en variables, es necesario la inclusión de elementos que lo conforman como tal, es decir, cada uno de los factores posee en su interior elementos que lo conforman.

Para la definición de las particularidades que conforman cada factor se mencionan los principales aspectos (llamadas variables durante el análisis) concernientes a la familia empresaria como se detalla a continuación:

Factor: Autoridad y Liderazgo

- Autoridad: las decisiones tomadas dentro de la empresa si están relacionadas con decisiones vitales de la misma.
- Liderazgo: si las decisiones son tomadas por la familia empresaria o se dejan en manos de terceros.

Factor: Estrategias administrativas

- Estrategias: mide la cantidad de estrategias existentes en la empresa familiar.

Factor: Planes a mediano plazo

- Planes: mide la cantidad de planes existentes para la empresa en un futuro superior a un año.

Factor: Formación del empresario

- Administración: Se considera si la empresa es administrada por el fundador de la empresa o un miembro de la familia con autoridad.
- Preparación: nivel de formación del propietario de la empresa.
- Representación: observa si la empresa está manejada por el representante legal de la empresa o está separado este aspecto.
- Sistema de información: corresponde a la existencia dentro de la empresa de un sistema de gestión que permita ordenar sus procesos y optimizar los recursos existentes.

En segundo lugar, se mide el peso que representa cada variable para el empresario y que fueron reconocidas como prioritarias (Tabla 13) donde los aspectos que están relacionadas con la subsistencia de la empresa familiar en el tiempo y la relación que puede existir entre ellos. Este trabajo se realiza mediante la asignación de peso a cada una, partiendo desde la media y desviación de cada variable.

Tabla 13. Variables estratégicas

Variables estratégicas	Media	Desviación típica
Sistema	1,86	0,770
Administración	1,36	0,792
Representación	1,77	0,425
Preparación	2,01	1,042
Liderazgo	2,66	1,228
Estrategia	6,53	1,834
Autoridad	3,36	0,817
Planes	3,45	1,934

De lo cual se obtiene la matriz de correlaciones entre las diversas variables (parte de los factores), midiendo la relación que existe entre las mismas (Tabla 14), de lo cual se

observa que las principales relaciones están entre estrategia y los sistemas de información y la formación del propietario.

Tabla 14. Matriz de correlaciones

Factores	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
Sistema (1)	1.00	0.01	0.04	0.01	0.05	0.29	0.01	0.08
Administración (2)		1.00	0.03	0.12	0.06	0.05	0.01	0.12
Representación (3)			1.00	0.23	0.19	0.20	0.03	0.16
Preparación (4)				1.00	0.02	0.04	0.10	0.00
Liderazgo (5)					1.00	0.08	0.14	0.08
Estrategia (6)						1.00	0.01	0.08
Autoridad (7)							1.00	0.19
Planes (8)								1.00

La matriz formada por estas 8 variables, cuya validez se determina mediante el contraste de independencia y de relación. Para ello se verifica por la prueba de contraste de Barlett y chi cuadrado que indica que existe relación entre las variables analizadas. Así mismo, KMO con un valor de 0.43 nos indica que las variables son independientes entre sí. Es decir, el modelo indica que las variables son independientes en su funcionamiento y entre sí están relacionadas, permitiendo validar que dichas variables reflejan el comportamiento de la empresa familiar.

Tabla 15. Contraste de hipótesis: KMO y prueba de Bartlett

Medida de adecuación muestral de Kaiser-Meyer-Olkin.		0,430
Prueba de esfericidad de Bartlett	Chi-cuadrado aproximado	41,575
	gl	28
	Sig.	0,048

Para la extracción de los valores (Tabla 16) se utiliza el método de análisis de componentes principales, considerando que las variables estudiadas son de tipo ordinal, de lo cual se observa que los auto valores transformados están cerca entre sí en el sistema, administración, representación, estrategia. Es decir en la empresa familiar estos factores serán importantes para el desarrollo de la empresa y familia.

Tabla 16. Matriz de correlaciones

	Inicial	Extracción
Sistema	1,000	0,649
administración	1,000	0,630
representación	1,000	0,637
preparación	1,000	0,701
Liderazgo	1,000	0,547
Estrategia	1,000	0,677
Autoridad	1,000	0,495
Planes	1,000	0,680

Método de extracción: Análisis de Componentes principales.

Reduciendo los factores analizados (Tabla 17) podemos representar el modelo hasta con los cuatro aspectos

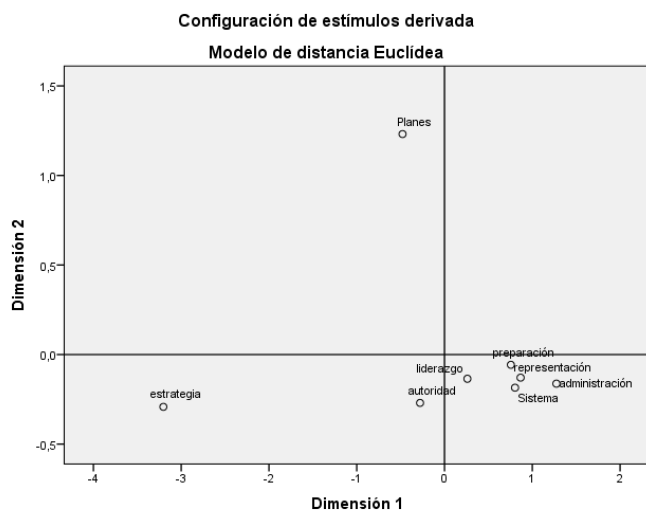
principales de la empresa familiar, haciendo fundamentales la estrategia, administración, representación y preparación.

**Tabla 17.** Matriz de componentes principales

	Componente			
	1	2	3	4
Sistema	0,294	0,642	0,182	0,343
Administración	0,127	-0,098	0,777	0,026
Representación	0,698	0,043	-0,103	-0,371
Preparación	-0,404	0,279	-0,352	0,580
Liderazgo	-0,472	0,158	0,547	0,030
Estrategia	0,410	0,713	-0,012	-0,030
Autoridad	0,404	-0,404	-0,127	0,391
Planes	-0,449	0,330	-0,202	-0,573

Método de extracción: Análisis de componentes principales.

Los componentes principales permiten ordenar los elementos de acuerdo a la correlación del elemento con los otros elementos. En este caso, las coordenadas representadas en dos niveles nos dan la oportunidad de identificar claramente la relación que existe entre las variables estudiadas y al mismo tiempo representar en dos dimensiones la relación que existe entre las mismas (Fig. 5) de lo cual se observa que una variable importante es la existencia de estrategias actuales de la empresa y es importante que se abarquen todas las áreas de la empresa. Al mismo tiempo la planificación a mediano y largo plazo orienta a la empresa para que tengan éxito.



**Figura 5.** Relación entre las variables

De las variables estudiadas se desprende que los factores planteados en la investigación están presentes en los elementos relevantes de los resultados obtenidos: liderazgo y autoridad del propietario se manifiesta como un aspecto importante, la formación del propietario, representación de la empresa, administración y sistemas de mejoramiento que posea la empresa; el liderazgo y autoridad que tenga el propietario es otro factor a considerar dentro de la empresa y la familia.

## 5. CONCLUSIONES

De los hallazgos encontrados en la investigación, se puede concluir como aporte del estudio:

Los factores estratégicos que intervienen en la empresa familiar están relacionados entre sí e influyen en la dinámica empresa-familia, identificando cuatro factores básicos: Estrategia administrativa, Planes a mediano plazo, formación del empresario, Liderazgo y autoridad.

Una empresa familiar es aquella organización donde los miembros de una familia son eje central para la gestión, dirección y funcionamiento de la misma, haciendo que los roles de familia y empresa se mezclen, formando dinámicas propias y difíciles de entender por separado.

La empresa familiar posee participación en todos los sectores productivos de la provincia de Tungurahua, Ecuador; demostrando su importancia dentro de la economía provincial y nacional.

Los principales pilares de la empresa familiar son:

- La formación del empresario, que permite a la familia gestionar la empresa, para lo cual los sistemas de información, la formación, representación y administración, generan resultados adecuados para la administración de la empresa.
- La estrategia que se visualiza en la empresa es por medio de la intervención en las diversas áreas de la empresa, de lo cual se desprende que la preocupación de la búsqueda de información está presente principalmente en las ventas, producción y control financiero de la misma.
- Los planes de la empresa a mediano plazo están limitados por el uso de los recursos que hace la familia para cubrir sus necesidades propias y el restante para reinversión en dichos planes de trabajo. Esto indica que el principal objetivo de la empresa familiar es el mantenimiento de la empresa y posteriormente de la misma empresa.
- La autoridad y liderazgo de la empresa está relacionada a las actividades del fundador de la empresa. El apoyo del fundador de la empresa quien genera direccionamiento, y orientación a quienes la van a dirigir (hijos), en este aspecto es importante que no se utilicen administración rígida e inflexible que impidan la comunicación y la confianza.

La sucesión representa uno de los aspectos más relevantes en las empresas familiares, y que todas deben enfrentar, para tales efectos los miembros de la familia que ya han incursionado en la empresa y conocen el modelo diseñado por su fundador, tienen mayor posibilidad de continuar con la empresa.

La preparación académica en este aspecto influirá positivamente en este proceso para involucrar directamente en el entrenamiento en la empresa y con ello garantizar la continuidad de la empresa.

La dinámica productiva en la provincia de Tungurahua constituye un grupo considerable de empresas familiares dedicadas a la producción en diferentes sectores industriales, que además han diversificado sus productos y bienes, siendo fundamental implementar estrategias en sistemas de calidad,

seguridad y ambientales, que han permitido subsistir a cada una de ellas, siendo mayormente competitivas en el mercado.

#### REFERENCIAS

- [1] F. Neubauer y A. Lank, *La empresa familiar*, Bilbao: Deusto, 1999.
- [2] R. Basco, «La investigación en la empresa familiar: “Un debate sobre la existencia de un campo independiente,» *Investigaciones europeas de dirección y economía de la empresa*, vol. 12, n° 01, pp. 33-54, 2006.
- [3] P. Samuelson y W. Nordhaus, *Economía*, Madrid: Mc GrawHill, 2002.
- [4] Revista Vistazo, «500 empresas del Ecuador,» 16 octubre 2010. [En línea]. Available: <http://www.vistazo.com/ea/500empresas/?eImpresa=1034&id=3642>. [Último acceso: 24 Julio 2014].
- [5] Seminarium Ecuador, «Empresas familiares en el Ecuador,» de *Seminario de Emprsas Familiares*, Quito, 2009.
- [6] E. Santamaría, «La Estructura de la Familia Empresaria y las Repercusiones en la Sucesión de las Empresas de la Provincia de Tungurahua, Ecuador,» de *13th Summer Institute on the PRSCO 2014*, Loja, 2014.
- [7] S. Dodero, «Investigación sobre la empresa familiar en Latinoamerica,» Instituto de la empresa familiar, Aden Business School, 2006.
- [8] R. Varela, *Innovación empresarial, arte y ciencia en la creación de empresas*, México: Pearson, 2010.
- [9] I. Belausteguigoitia, *Empresas Familiares, su dinámica, equilibrio y consolidación*, México: Mc GrawHill, 2010.
- [10] R. Tagiuri y J. Davis, «The family business model for good governance,» 1982.
- [11] J. Amat, *La continuidad de la empresa familiar*, Barcelona: Gestión 2000, 2000.
- [12] I. Vázquez, *Las empresas familiares y el proceso de sucesión*, México: Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, 2010.
- [13] J. Ginebra, *Las empresas familiares, su dirección y continuidad*, México: Editorial Panorama, 2005.
- [14] J. Zacarías Mayorga y C. Navarrete Jimenez, «Diagnostico Integral de las empresas de familia de Bogotá, Colombia,» *Gestión y Sociedad*, vol. 1, pp. 11-28, 2008.
- [15] A. Sánchez y C. Cassanova, *La Empresa Familiar, Manual Para Empresarios, Claves Legales Para Su Correcta Organización y Su Continuidad*, Barcelona: Ediciones Deusto, 2005.
- [16] M. Rojas López y L. Medida Marín, *Planeación estratégica*, Bogotá: Ediciones de la U., 2011.
- [17] J. Pacheco, W. Castañeda y C. Caicedo, *Indicadores Integrales de Gestión*, México: Mc GrawHill, 2002.
- [18] I. Chiavenato, *Planeación estratégica. Fundamentos y aplicaciones*, México: Mc GrawHill, 2011.
- [19] E. Press, *Empresas familiares*, Buenos Aires: Ediciones Granica, 2011.
- [20] M. Blazquez, *Control de gestión y sustentabilidad*, Córdoba: Unviersidad Nacional de Córdoba, 2007.
- [21] L. Restrepo, S. Estrada y C. Ramírez, «Modelo de Gestión de Indicadores para una Empresa de Venta de Vehículos,» *Scientia et Technica*, vol. 1, pp. 283-288, 2007.
- [22] R. Vassolo y L. Silvestri, *Dirección estratégica en países emergentes. Elementos fundamentales para plantear el crecimiento de las empresas latinoamericanas*, Buenos Aires: Granica, 2011.
- [23] J. L. Ronquillo, *Administración básica de la empresa familiar*, México: Panorama Editorial, 2006.
- [24] J. M. Sainz de Vicuña Ancín, *El plan estratégico en la práctica*, Madrid: Esic Editorial, 2010.
- [25] M. Martinez, *La investigación cualitativa etnográfica en educación, manual teórico-práctico*, México: Trillas, 2004.
- [26] R. Hernández, C. Fernández y P. Baptista, *Metodología de la Investigación*, México: McGraw Hill, 2010.
- [27] mideplan, «Levantamiento y Análisis de datos,» de *Diseño y Ejecución de evaluaciones estratégicas*, San José, Sistema nacional de evaluación, 2010, pp. 182-259.

- [28] E. Ander-Egg, *Cómo elaborar un proyecto: guía para diseñar proyectos sociales y culturales*, Buenos Aires: Instituto de Ciencias Sociales Aplicadas, 1989.

# Estrategia para invertir en el mercado de divisas (Forex) basada en redes neuronales

Dávila A.\*; Herrera G.\*

\*Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ciencias Administrativas, Quito, Ecuador  
e-mail: alex.davila@epn.edu.ec; gustavo.herrera@epn.edu.ec

**Resumen:** Se propone la elaboración de una estrategia de inversión para el par EUR/USD, mediante un método de predicción con redes neuronales. A fin de hacer una comparación, paralelamente se elaboran estrategias basadas en predicciones de series de tiempo con otros métodos: medias móviles, suavización exponencial y método de Winters. La selección de los parámetros óptimos para cada estrategia se realiza mediante backtesting durante un período, privilegiando los parámetros que generaron mayor rentabilidad en tal período. Al entrenar la red neuronal se tomaron retrasos y medias móviles de los retornos de precio diarios del EUR/USD del período del 24/11/2009 al 22/7/2013, el cual fue seleccionado mediante análisis de Hurst. Las cuatro estrategias optimizadas fueron evaluadas paralelamente durante un período de dos meses (29/7/2013 a 27/9/2013) mediante operaciones en cuentas demo. La estrategia basada en red neuronal superó en utilidad y consecuentemente en rentabilidad (13.81% bimensual; 117.31% anual) a las otras estrategias. Con los resultados obtenidos al aplicar las estrategias propuestas paralelamente durante el período de evaluación, se generó información que permitió estimar el riesgo de pérdida de cada estrategia mediante simulación de Montecarlo. La estrategia basada en red neuronal es la que presentó el menor riesgo de pérdida (19.05%).

**Palabras clave:** Mercado de divisas, Forex, pronósticos, redes neuronales, exponente de Hurst, medias móviles, suavización exponencial, método de Winters.

**Abstract:** The development of an investment strategy for the EUR / USD is proposed, using a prediction method with neural networks. To make a comparison, parallel strategies based on time series predictions with other methods are developed: moving averages, exponential smoothing and Winters method. The selection of the optimal parameters for each strategy is done through backtesting during a time frame, favoring parameters that generated higher returns in this period. To train the neural network, lags and moving averages of daily returns price of EUR / USD for the period of 24/11/2009 to 22/07/2013 were taken, which was selected through Hurst analysis. The four optimized strategies were evaluated in parallel for a period of two months (29/07/2013 to 27/09/2013) through operations on demo accounts. The strategy based on neural network outperformed in profit and consequently in profitability (13.81 % bimonthly; 117.31 % annually) to the other strategies. Based on the results obtained by applying the proposed strategies in parallel during the evaluation period, information that allowed us to estimate the risk of loss for each strategy using Monte Carlo simulation was generated. The strategy based on neural network is the one that had the lowest risk of loss (19.05 %).

**Keywords:** Foreign exchange market, Forex, forecasts, neural networks, Hurst exponent, moving averages, exponential smoothing, Winters method.

## 1. INTRODUCCIÓN

Al ser Forex un mercado especulativo de alto riesgo, es deseable disponer de estrategias claras y definidas que contribuyan a mitigar el riesgo al invertir. Considerando que las redes neuronales han mostrado gran aplicabilidad en análisis de series de tiempo y en pronósticos [1], en el presente estudio se propone investigar sobre la elaboración de una estrategia de inversión para el par EUR/USD, mediante un método de predicción con redes neuronales.

Excede al alcance de este trabajo realizar un estudio exhaustivo de todas las investigaciones previas. En los siguientes párrafos se presentan algunos estudios relacionados con modelos de redes neuronales en aplicaciones financieras.

Bellgard and Goldschmidt[2] examinaron la exactitud de pronóstico y el desempeño de varias técnicas tradicionales, incluyendo paseo aleatorio, suavización exponencial y modelos ARMA (Autoregressive–moving–averagemodel) con modelos de redes neuronales recurrentes. La investigación se basó en la tasa de cambio del par AUD/USD (Dólar australiano / dólar americano) utilizando datos de media hora durante 1996. Concluyeron que la exactitud de las mediciones del



pronóstico estadístico no tienen una relación directa con la rentabilidad, y que las series de tiempo de Forex exhiben patrones no lineales que son mejor aproximados por los modelos de redes neuronales.

Yao & Tan [3] examinaron el desempeño de una estrategia de negociación con base en las simulaciones de redes neuronales (Basada en las tasas de cambio entre el dólar americano y JPY, DEM, GBP, CHF y AUD). Los autores, teniendo en cuenta el efecto de los costos de transacción, consideraron un modelo para realizar operaciones cada viernes, construyeron una muestra de 510 observaciones con los precios de cierre desde el 18 de mayo de 1984 hasta el 7 de julio de 1995. Compararon sus modelos contra un ARIMA (Autoregressive integrated moving average), pero aquí prestaron especial énfasis a indicadores de desempeño financiero sobre la estrategia de negociación simulada. Por ejemplo, compararon el resultado financiero de negociar con los pronósticos de la red con la rentabilidad de comprar al inicio del periodo y vender hasta el final (comprar y mantener). Las redes que entrenaron las usaron como variables de entrada, rezagos de la serie y promedios móviles de las mismas. Concluyeron que la rentabilidad de la estrategia simulada con las redes neuronales para todas las divisas, excepto para el USD/JPY, son superiores al retorno reportado por las estrategias de referencia.

Villamil & Delgado [4] presentaron un trabajo en el cual se muestran los resultados del entrenamiento de una red neuronal para negociación de la tasa de cambio EUR/USD y las bondades del algoritmo de entrenamiento chemotaxis (esto es novedoso ya que usualmente se usa un algoritmo de retro propagación en trabajos anteriores), que permite entrenar redes que maximicen una función objetivo que relacione aciertos en la predicción con las ganancias de un trader. Concluyeron que El mercado de la divisa EUR/USD es especialmente líquido y muestra tener características de eficiencia. No obstante, el modelo neuronal seleccionado en este trabajo enseña que sí es posible (usando el pronóstico de una red neuronal y siendo fiel a una estrategia de negociación) obtener rentabilidades positivas de manera sostenida en el mercado Forex. En este trabajo se han utilizado las redes neuronales multicapa para construir un sistema de negociación automatizado (SNA) que sirva para operar en el mercado del EUR/USD. En el modelo entrenado aquí se simplifican algunas de las características que debe tener un SNA: el modelo sugerido produce señales (de compra o venta) cada seis horas, hay señal de compra si el pronóstico de la red seis horas adelante es mayor que el pronóstico del precio actual y de venta si es menor, no se puede liquidar una posición antes de las seis horas (en otras palabras, no hay cabida para que operen el stop loss y el takeprofit) y siempre se invierte la totalidad del capital (no hay administración del dinero).

En 2008 Dunis presentó un estudio [5] en el que utilizaron varias arquitecturas de redes neuronales para pronosticar y comerciar con el par EUR/USD. Se comparan 4 diseños de redes neuronales (una neuronal de alto orden, una Psi Sigma, una red neuronal recurrente y el clásico

Perceptrón) con otras técnicas tradicionales: ARMA, MACD y una técnica ingenua (naive). Se realizó pronóstico y simulación de comercio diario considerando el costo de las transacciones (a diferencia del estudio de Villamil). Bajo estas condiciones, el modelo basado en una red neuronal de alto orden superó a los otros modelos basados en redes neuronales y a los modelos estadísticos tradicionales. Es importante indicar que el modelo basado en el Perceptrón presentó un desempeño superior a los otros pero cuando la simulación no tomó en cuenta los costos de transacción, lo cual no sucede en el mercado real.

Considerando los resultados de trabajos previos similares, se propone la elaboración de una estrategia de inversión para el par EUR/USD, mediante un método de predicción con redes neuronales, la cual será evaluada en términos de rentabilidad y riesgo mediante operaciones en cuenta demo y no mediante simulaciones de backtesting como en los trabajos mencionados anteriormente. El presente trabajo inicia con una muy breve descripción del mercado de divisas (Forex) en la sección 2, en la sección 3 se describen las redes neuronales, en la sección 4 se resumen los métodos utilizados para las estrategias con las que se va a comparar la estrategia basada en redes neuronales, en la sección 5 se describe la estrategia basada en redes neuronales, en la sección 6 las otras estrategias, en la sección 7 se muestra una comparación de los resultados obtenidos con las diferentes estrategias, en la sección 8 se mencionan los resultados de la estimación del riesgo mediante la metodología Value at Risk (Valor en riesgo, VaR) y finalmente, en la sección 9 se presentan las conclusiones.

## 2. FOREX

El término FOREX significa Foreign Exchange Currency Market (FOREign EXchange), lo cual se interpreta como Mercado de Intercambio de Divisas Extranjeras. [6].

En Forex, las divisas se comercian en pares (por ejemplo EUR/USD). Si se prevé que el Euro cotizará al alza (“se fortalecerá”) frente al Dólar entonces se debería comprar EUR/USD para ganar y recíprocamente, si se cree que el Euro cotizará a la baja (“se debilitará”) frente al Dólar, se debería entonces vender EUR/USD.

Dentro de la terminología propia del Trading, la operación de compra se conoce como posición “larga”. Si un comprador está en posición larga en el par EUR/USD, significa que está comprando en euros (divisa base) y está vendiendo en dólares USA (divisa de cotización).

## 3. REDES NEURONALES

Las redes neuronales pueden ser útiles para realizar un mapeo entrada-salida cuando la relación exacta entre entrada-salida es desconocida o muy compleja para ser determinada matemáticamente. Dada su habilidad para aprender mapeos complejos, han sido usadas para modelar relaciones económicas no lineales. Presentando un conjunto de datos de pares entrada-salida

iterativamente, una red neuronal puede ser entrenada para determinar un conjunto de pesos que pueden aproximar el mapeo.

La red neuronal multicapa de propagación hacia adelante (Fig.1) es una de las arquitecturas más comúnmente usadas. Esta consiste de una capa de entrada, una capa de salida y una o más capas intermedias llamadas capas ocultas. Todos los nodos en cada capa están conectados a cada nodo en la capa superior mediante fuerzas de interconexión llamadas pesos.  $x_i$  son las entradas,  $w$  son los pesos,  $y_k$  son las salidas producidas por la red. Todos los pesos interconectados entre capas son inicializados a pequeños valores aleatorios al inicio.

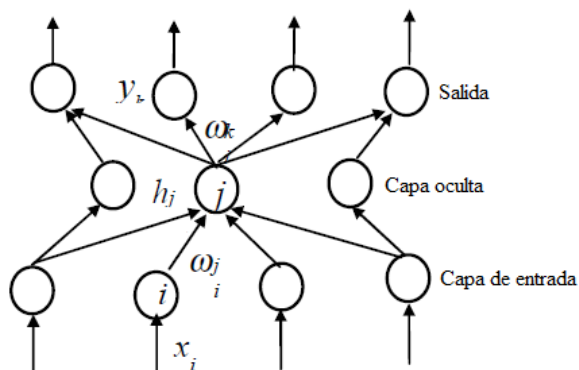


Figura 1. Estructura de una red neuronal multicapa con propagación hacia adelante (Adaptado de [1])

Durante el entrenamiento las entradas son presentadas en la capa de entrada y la salida objetivo asociada es presentada en la capa de salida. Un algoritmo de entrenamiento es utilizado para obtener un conjunto de pesos que minimiza la diferencia entre la salida objetivo y la salida real producida por la red.

#### 4. PREDICCIONES MEDIANTE SERIES DE TIEMPO

Los modelos de pronóstico (predicción) basados en series de tiempo predicen bajo la suposición de que el futuro es una función del pasado, es decir, observan lo que ha ocurrido durante un período determinado y usan una serie

de datos históricos para hacer un pronóstico. Una serie de tiempo se basa en una secuencia de datos puntuales separados a intervalos iguales (semanas, meses, trimestres, etc.) [3].

##### 4.1 Método de medias móviles [4]

El método de medias simples utiliza la media de todos los datos para hacer el pronóstico, pero si se tiene mayor interés por las observaciones más recientes, se puede especificar un número constante de puntos de datos y se puede calcular una media para las observaciones más recientes. El término promedio móvil (media móvil) se usa para describir este enfoque. Conforme se tienen nuevas observaciones, se calcula una nueva media al sumar el valor más reciente y al eliminar el más antiguo. Esta media móvil se usa para pronosticar el siguiente período.

##### 4.2 Método de Suavización Exponencial Simple

Consiste básicamente en tomar un conjunto de datos y hacer un pronóstico de ellos dándole una ponderación exponencial mayor a las observaciones más recientes. La ponderación exponencial supone que el dato a pronosticar tiene una relación mucho más fuerte con las observaciones más recientes que con las pasadas. [5].

##### 4.3 Método de Winters (Holt - Winters)

A partir del trabajo anterior realizado por Holt, Winters obtuvo un método capaz de capturar el nivel, la tendencia y la estacionalidad (Se dice que hay estacionalidad cuando una serie de tiempo está influenciada por factores estacionales como: un día de la semana, el mes o cuatrimestre del año, etc.) de manera directa. Este método separa el nivel, la tendencia y la estacionalidad y luego los integra al pronóstico de manera directa sin necesidad de utilizar métodos de descomposición. [5].

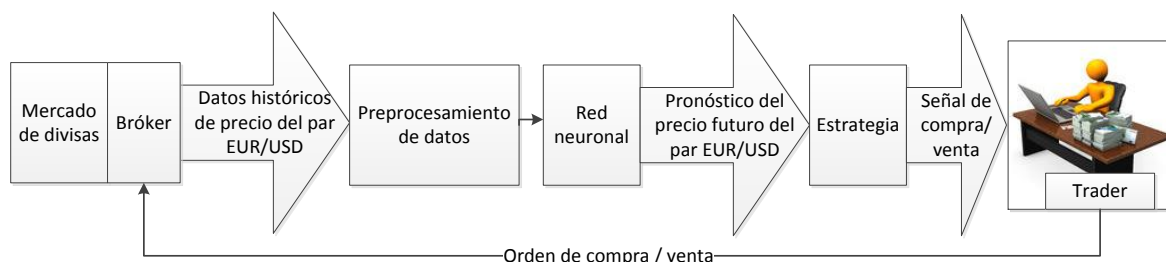


Figura 2. Esquema general de la estrategia basada en una red neuronal. (Imagen de "Trader" obtenida de [6])

## 5. ESTRATEGIA DE INVERSIÓN BASADA EN REDES NEURONALES

Se plantea la elaboración de una estrategia basada en una red neuronal, la cual se alimenta con datos de los precios históricos para pronosticar el precio futuro del par EUR/USD. Con base en este pronóstico se propone definir una estrategia que genere señales de compra (1) ó venta (0), las cuales pueden ser utilizadas por un trader para colocar posiciones de compra / venta (a través de una plataforma) en una cuenta abierta con un bróker.

La Figura 2 muestra el esquema general de la estrategia.

### 5.1. Datos de Entrada

Como entradas de la red neuronal se toman retrasos y medias móviles de los retornos de precio de cierre diarios del EUR/USD del período del 24/11/2009 al 22/7/2013, el cual fue seleccionado mediante análisis de exponente de Hurst, como se sugiere en el estudio de Kondratenko y Kuperin[7].

### 5.2. Características de la Red Óptima

Para seleccionar los parámetros óptimos (tanto para la estrategia basada en red neuronal como para los otros) se realiza backtesting durante el período del 12/3/2013 al 22/7/2013, privilegiando los parámetros que generaron mayor rentabilidad en tal período.

Para el caso de la red neuronal la estrategia óptima se basa en una red multicapa hacia adelante con 400 neuronas ocultas. La red tiene 10 entradas: 8 retrasos de la serie de retornos de precio de cierre y 2 medias móviles calculadas sobre la misma serie. La salida es el pronóstico del retorno de precio.

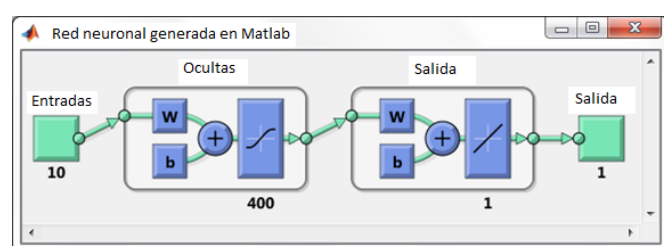


Figura 3. Estructura de la red neuronal seleccionada

### 5.3. Estrategia de Trading

Por simplicidad, y considerando que se ha empleado en estudios anteriores ([8], [9]), se plantea utilizar la siguiente estrategia: si el pronóstico del retorno (incremento) del precio es positivo se genera una señal de compra (1), caso contrario la señal es de venta (0). Una señal de compra significa comprar el EUR/USD al precio actual o continuar manteniendo (Hold) una posición de compra (si se tenía una abierta), mientras una señal de venta implica vender EUR/USD al precio actual o continuar manteniendo (Hold) una posición de venta (si se tenía una abierta).

### 5.4. Procedimiento de Operación de la Estrategia

La Figura 2 ilustra el procedimiento a seguir diariamente de acuerdo a la estrategia planteada. Cada día se obtiene el precio de cierre diario del Mercado (esto es a las 00h00 hora GMT, es decir a las 19h00 hora de Ecuador). Con el dato del precio de cierre diario (y del precio de cierre del día anterior) se puede calcular el retorno de precio de cierre. Con este dato se actualizan los valores de las entradas y se alimentan a la red neuronal, la cual pronostica el retorno del precio para el siguiente día. Si el retorno pronosticado es positivo se genera una señal de compra, caso contrario la señal es de venta. De acuerdo a la señal generada, se abren posiciones en compra o en venta o se mantienen (hold) posiciones; siguiendo la estrategia definida en la sección 5.3.

### 5.5. Evaluación de la estrategia

1) *Rentabilidad:* La estrategia basada en red neuronal (así como las otras tres estrategias optimizadas) fue evaluada paralelamente durante un período de dos meses (29/7/2013 a 27/9/2013) mediante operaciones en una cuenta demo. La utilidad neta obtenida durante el período de inversión de 2 meses es de USD 138.10. Considerando la inversión inicial de USD 1000, se tiene una rentabilidad bimensual de 13.81%, con lo cual se puede estimar una rentabilidad anual de 117.31%. Además de la rentabilidad, es necesario determinar si la estrategia de inversión resulta conveniente considerando el costo de oportunidad, para lo cual se toma como referencia la tasa de rentabilidad de 70.48% publicada por la Superintendencia de Compañías del Ecuador para *Actividades auxiliares de las actividades de servicios financieros, excepto las de seguros y fondos de pensiones (Código CIU4 K661)*; las cuales contemplan actividades

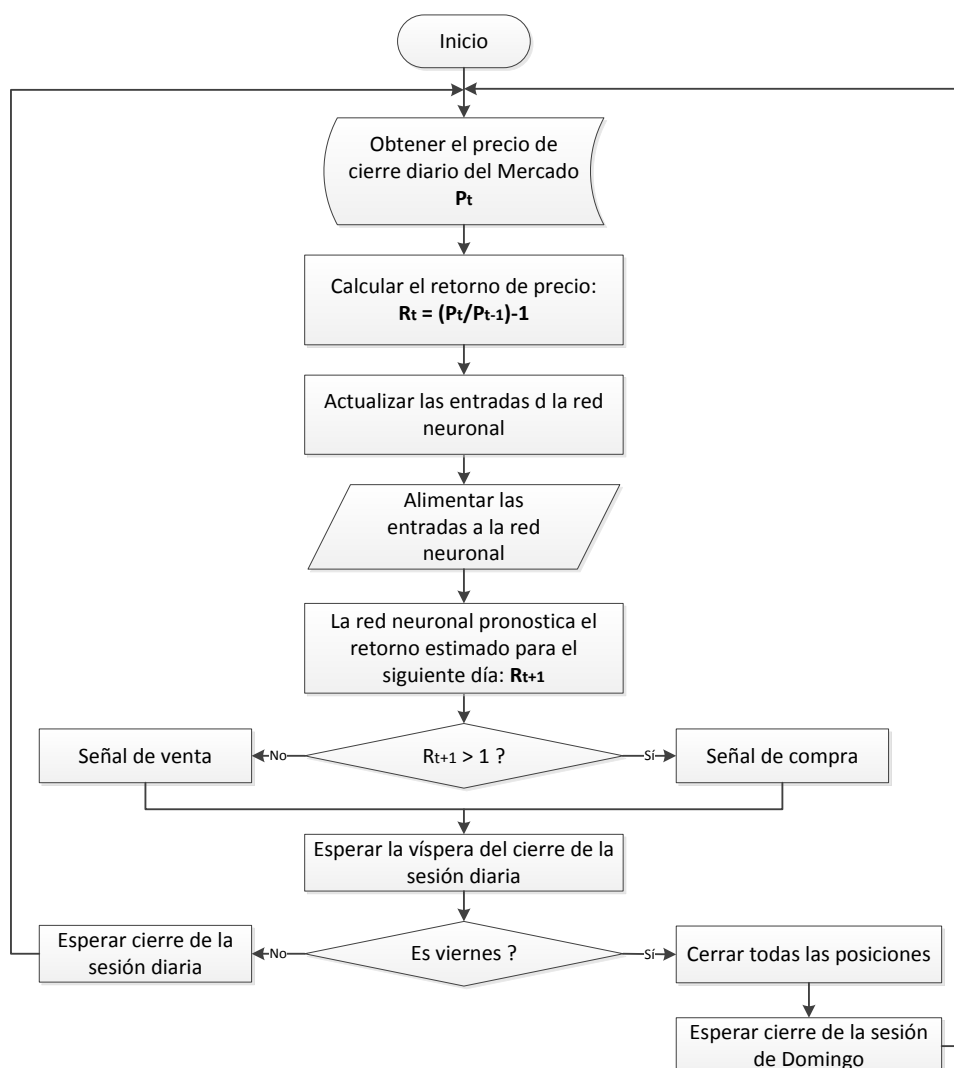


Figura 4. Diagrama de flujo del procedimiento con la estrategia de red neuronal

Como administración de mercados financieros, mercados bursátiles, mercado de valores, mercado de futuros, actividades de oficinas de cambio, etc.[10]. Sobre la base de las utilidades obtenidas y considerando la tasa de costo de oportunidad bimensual (9.30%) se calcula el VAN, el cual es de USD 41.28.

2) *Riesgo*: Para estimar el riesgo se realiza un análisis estadístico de los valores de utilidad obtenidos en las operaciones realizadas durante el período de evaluación. Se utiliza CrystalBall para estimar el riesgo de la estrategia. La utilidad de cada operación se define como un *supuesto* y se establece como *pronóstico* el VAN. Como resultado de la simulación de Montecarlo se obtiene la función de distribución del VAN, y la probabilidad de que la estrategia resulte conveniente ( $VAN \geq 0$ ): 80.95%. Es decir que el riesgo de pérdida es 19.05%.

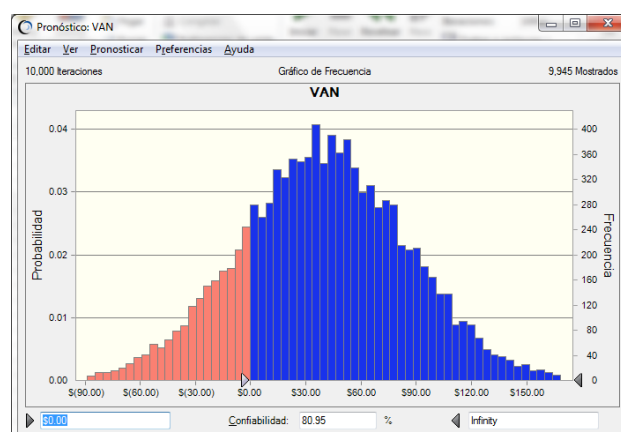


Figura 5. Probabilidad de que la estrategia resulte conveniente ( $VAN \geq 0$ )

## 6. ESTRATEGIAS DE INVERSIÓN BASADAS EN PREDICCIÓN DE SERIES DE TIEMPO

A fin de contrastar los resultados obtenidos con la estrategia basada en una red neuronal, se proponen elaborar estrategias basadas en: a) Alisamiento con medias móviles, b) Alisamiento exponencial, y c) Winters.

### 6.1 Datos de Entrada

A fin de guardar correspondencia con la estrategia basado en una red neuronal, se propone utilizar los 1137 datos de precios de cierre diarios desde el 24/11/2009 hasta el 22/7/2013.

### 6.2 Selección de las Estrategias Óptimas

Para determinar los parámetros de las estrategias óptimas se realizó backtesting durante el mismo período y bajo el mismo criterio de evaluación (rentabilidad acumulada) que para la estrategia basada en una red neuronal.

### 6.3 Estrategia de Trading

Se utiliza la misma de la estrategia basada en una red neuronal, definida en 5.3: si el pronóstico del retorno (incremento) del precio es positivo se genera una señal de compra (1), caso contrario la señal es de venta (0)

### 6.4 Procedimiento de Operación de las Estrategias

El procedimiento es muy similar al de la estrategia de la red neuronal, con la diferencia que el pronóstico se realiza respectivamente mediante media móvil, alisamiento exponencial y método de Winters.

### 6.5 Evaluación de las estrategias

Tabla 1. Rentabilidad y riesgo de las estrategias

Estrategia	Rentabilidad	Riesgo
Media móvil	2.91%	90.73%
Exponencial	3.30%	90.00%
Winters	5.06%	75.84%

## 7. COMPARACIÓN DE LAS ESTRATEGIAS

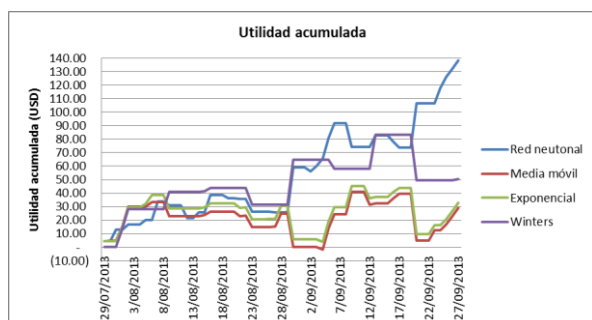


Figura6. Utilidad acumulada de las estrategias

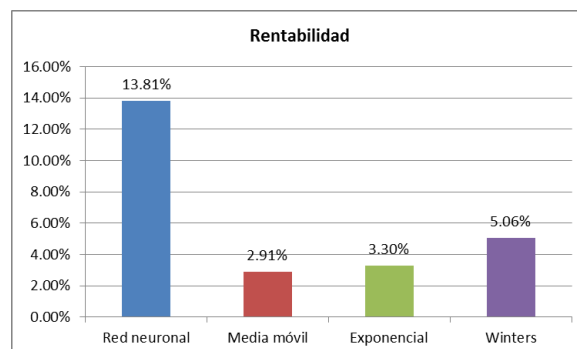


Figura7. Rentabilidad de las estrategias

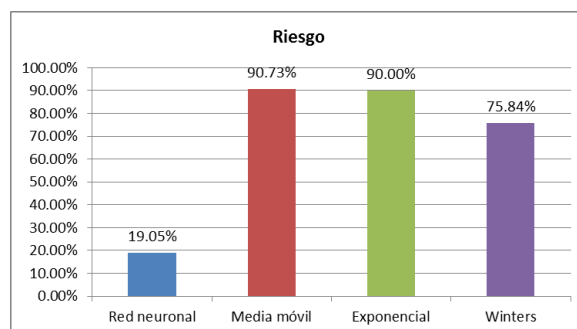


Figura8. Riesgo de las estrategias

## 8. VALOR EN RIESGO (VaR)

A fin de incluir otro indicador aparte de la simulación de Montecarlo sobre la distribución del VAN, se propone calcular el Value at Risk (Valor en Riesgo) de la operación del par EUR/USD sobre los datos de los retornos de precios durante el período de evaluación de las estrategias: 29/7/2013 hasta el 27/9/2013. A partir de los resultados del VaR se encuentra que para un nivel de confianza del 95%, el valor en riesgo (Value at Risk) para el horizonte bimensual es de máximo 3.69% (del volumen de cada operación) y para el horizonte anual es de máximo 8.83% (USD 176.66); es decir que con una probabilidad del 95%, las pérdidas no excederán de USD 176.66 en un horizonte de un año.

Cabe indicar que este cálculo del VaR es un valor estimado del riesgo del mercado Forex en general; es decir, no del riesgo operativo al aplicar una determinada estrategia.

## 9. CONCLUSIONES

Esta investigación ha cumplido con su objetivo, es decir, se ha elaborado una estrategia de inversión para el mercado Forex para el par EUR/USD, mediante el método de predicción con redes neuronales y se lo ha comparado con otras estrategias basadas en: media móvil, alisamiento exponencial y Winters.

La estrategia basada en red neuronal generó mayor utilidad y consecuentemente mayor rentabilidad que las otras estrategias, las cuales aunque generaron utilidad, no resultaron convenientes al considerar el VAN con un costo de oportunidad basado en alternativas de inversión similares.

La estrategia basada en red neuronal es la que presenta el menor riesgo de pérdida.

En una estrategia de pronósticos de precios para realizar inversiones en el mercado de divisas resulta más deseable acertar en la dirección del cambio del precio antes que minimizar el error (absoluto medio, o raíz del error medio cuadrático).

A pesar de que los resultados obtenidos son positivos, aún sería riesgoso aplicar directamente la estrategia basada en red neuronal en un software de trading para que un PC ejecute las operaciones sin la necesidad de la intervención de una persona, ya que hay factores externos que cambian significativamente los resultados bursátiles y sería muy riesgoso dejar que un sistema de forma autónoma tome esas decisiones sin analizar el contexto y verificar la idoneidad de las soluciones presentadas por el sistema.

Se podría elaborar una estrategia basada en red neuronal similar al desarrollado en este trabajo para su aplicación con otros pares de divisas o en el mercado de valores.

#### REFERENCIAS

- [1] J. Kamruzzaman y R. A. Sarker, «Comparing ANN Based Models with ARIMA for Prediction of Forex Rates,» 2003. [En línea]. Available: <http://www.asor.org.au/publication/files/jun2003/Joarder.pdf>.
- [2] C. Bellgard y P. Goldschmidt, «Forecasting foreign exchange rates: Random Walk Hypothesis, linearity and data frequency,» *12th Annual Australasian Finance & Banking Conference*, pp. 1-18, 1999.
- [3] J. Yao y C. L. Tan, «A case study on using neural networks to perform technical forecasting of forex,» *Neurocomputing* 34 (2000), pp. 79-98, 2000.
- [4] J. Villamil y J. Delgado, «Entrenamiento de una red neuronal multicapa para la tasa de cambio euro - dólar (EUR/USD),» *REVISTA INGENIERÍA E INVESTIGACIÓN VOL. 27 No.3*, pp. 106-117, 2007.
- [5] C. Dunis, J. Laws y G. Sermpinis, «Modelling and Trading the EUR/USD Exchange Rate at the ECB Fixing,» 2008. [En línea]. Available: [http://www.ljmu.ac.uk/Images\\_Everyone/ArtCDJSGS\\_0608\(1\).pdf](http://www.ljmu.ac.uk/Images_Everyone/ArtCDJSGS_0608(1).pdf).
- [6] R. Jaramillo y A. Jiménez, «Modelo estratégico para invertir en el mercado Forex basado en las Bandas de Bollinger,» UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA, 2008.
- [7] J. Heizer y B. Render, *Principios de Administración de Operaciones*, México: Pearson, 2004.
- [8] J. E. Hanke y D. W. Wichern, *Pronósticos en los negocios*, México: Pearson, 2006.
- [9] S. Madrigal, «Modelos de espacio de estados subyacentes al método multiplicativo de Holt-Winters con múltiple estacionalidad,» 2006. [En línea]. Available: [http://pisis.fime.uanl.mx/ftp/pubs/thesis/msc/2006-sergio\\_madrigal/tesis-sergio-2006.pdf](http://pisis.fime.uanl.mx/ftp/pubs/thesis/msc/2006-sergio_madrigal/tesis-sergio-2006.pdf).
- [10] Can Stock Photo, «Trader illustrations and clipart,» 2013. [En línea]. Available: <http://www.canstockphoto.com/illustration/trader.html>.
- [11] V. Kondratenko y Y. A. Kuperin, «Using Recurrent Neural Networks to Forecasting of Forex,» 2003. [En línea]. Available: <http://arxiv.org/ftp/cond-mat/papers/0304/0304469.pdf>.
- [12] C. Dunis, J. Laws y P. Naim, *Applied quantitative methods for trading and investment*, Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2003.
- [13] Superintendencia de Compañías del Ecuador, «Codificación del CIU4, (actividad económica principal),» 2013. [En línea]. Available: [http://www.supercias.gob.ec/bd\\_supercias/formularios/CIU4\\_SUPERINTENDENCIA.pdf](http://www.supercias.gob.ec/bd_supercias/formularios/CIU4_SUPERINTENDENCIA.pdf).
- [14] R. Jaramillo y A. Jiménez, «Modelo estratégico para invertir en el mercado Forex basado en las Bandas de Bollinger,» Universidad Tecnológica de Pereira, 2008.

## El Espacio-Dinámica Organizacional del Museo del Quai Branly (París): Posmodernismo y Cultura Organizacional

Abad A.\*; Martins P.\*\*

\*Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ciencias Administrativas, Quito, Ecuador  
e-mail: andres.abad@epn.edu.ec

\*\* Universidad Federal Fluminense, Departamento de Administración, Niterói - RJ, Brasil  
e-mail: pemiliom@uol.com.br

**Resumen:** Este estudio presenta la visión simbólica y posmodernista de la cultura organizacional, en contraste con la perspectiva de los estudios modernistas de la administración que es marcadamente funcionalista y reduccionista. Desde la visión de los estudios posmodernos y utilizando el método etnográfico la investigación ilustra la dinámica de la cultura organizacional en el Museo del Quai Branly de París, que exhibe una colección de arteoriginario extra europeo. Sobre la base del modelo de Hatch el estudio identifica las categorías esenciales de la dimensión simbólica del espacio-dinámica organizacional tales como los artefactos, los valores, las presunciones básicas y los símbolos; y además, se describen las manifestaciones de las subjetividades de sus miembros, en relación con las sensibilidades, las reflexividades y las apreciaciones estéticas.

**Palabras clave:** Estudios organizacionales, posmodernismo, cultura organizacional, subjetividades, etnografía.

**Abstract:** This study presents the symbolic and postmodern vision of organizational culture, in contrast to the perspective of the modernist studies, which is mainly functionalist and reductionist. From the point of view of postmodern studies and using the ethnographic method, the research illustrates the dynamics of organizational culture at the Quai Branly Museum in Paris, which exhibits a collection of aboriginal non-European art. Based on the Hatch model, the study identifies the essential categories of the symbolic dimension of the organizational dynamic-space such as artifacts, values, basic assumptions and symbols; and in addition, it describes the manifestations of the subjectivities of its members, in relation to sensitivities, reflexivities and aesthetic appreciations.

**Keywords:** Organizational studies, postmodernism, organizational culture, subjectivities, ethnography.

### 1. INTRODUCCIÓN

Las organizaciones, consideradas como sistemas sociales, crean un escenario para un diálogo interdisciplinario entre las teorías sociales y los estudios organizacionales. Así, la perspectiva modernista en la administración analiza la organización como un fenómeno medible, objetivo y comprobable en el mundo empírico, y se orienta a la explicación de las relaciones de causalidad de los fenómenos; las teorías críticas, interpretativas y posmodernistas abordan, en contraste, el objeto como sujeto a la vez y se orientan hacia una mayor *comprensión* de las diversas facetas de la organización; además, desde la visión posmodernista el

objeto ya no es solamente la “organización sino la propia teoría organizacional” como señala Hatch [1, p. 49], y que además “involucra tanto al investigador que intenta conocer la organización como a la organización misma”.

Parecería ser que se ha confiado demasiado en la visión funcionalista y positivista en las organizaciones, que ha sido la mirada principal que ha orientado las ciencias económicas y gerenciales. Sin embargo, ha habido cierta cautela para mirar otros paradigmas emergentes, entre ellos, las miradas interpretativa y posmoderna, que visibilizan más al sujeto y que se amparan en una epistemología subjetivista, en la cual el individuo se considera como una construcción social y de fuerzas culturales que toman un lugar de expresión en el ámbito del lenguaje y sus actos retóricos [1].

En la organización se crean subjetividades como las sensibilidades, las reflexividades y las apreciaciones estéticas, que no debería estar subordinadas a una visión estrictamente instrumental como el de las prácticas discursivas dictadas por líderes “impulsadores de valores” o “ingenieros de la conducta” que buscan exclusivamente alcanzar un mejor desempeño de la organización, pero

Artículo recibido el 15 de diciembre de 2014; revisado XX febrero de 2015.

\*Andrés Abad es candidato a Doctor en Administración por la Universidad Andina “Simón Bolívar”, Sede Ecuador. Master en Antropología del Desarrollo y Magíster en Administración, UDA, Ecuador. Profesor Titular Agregado de la Escuela Politécnica Nacional. Profesor Invitado de la Universidad Andina Simón Bolívar y de la Universidad Estatal de Milagro, en Ecuador.

\*\*Pablo Emílio Matos Martins es Doctor en Administración de Empresas (EAESP/FGV, Brasil). Maestro en Administración Pública (EBAP/FGV, Brasil); Ingeniero Mecánico (UFPA, Brasil). Decano del Departamento de Administración y Coordinador del Núcleo de Estudos de Administração Brasileira (ABRAS/PPGAd/UFF, Brasil). Profesor Visitante del Programa de Doctorado en Administración (UASB, Ecuador) y Colaborador en universidades brasileñas, europeas y americanas.

mantienen una visión ausente de las potencialidades de los individuos.

Se observa como necesario salir de la mirada hegemónica funcionalista y reduccionista de “cultura corporativa”, que entiende la cultura organizacional como una medición de los “valores organizacionales” que están subordinados a la idea de un mejoramiento de la eficiencia, eficacia y productividad. Con los aportes del pensamiento interpretativo y posmoderno se puede entender la cultura organizacional de manera más integral, que demarcan una alternativa a la hegemonía del pensamiento funcionalista en los estudios organizacionales [2].

El *funcionalismo* en los estudios organizacionales significa que hay un proceso de dominación ideológica por parte de una visión positivista de la ciencia, que es aceptada de manera pasiva por los grupos subalternos y que admiten como una especie de “sentido común”, justificando el ejercicio del poder subyacente. Este tipo de dominación asumirá una manifestación también en el discurso que por medio de sus prácticas discursivas tendrá incidencia en el contexto social.

## 2. POSMODERNISMO Y ORGANIZACIÓN

### 2.1 *Posmodernismo y estudios organizacionales*

El proceso de la evolución del período histórico que se ha denominado *modernidad* se dio a partir del siglo XVII, con un crecimiento intensivo del conocimiento, especialmente en las ciencias de la naturaleza, y se constituyó en discurso de una nueva ciencia emergente con autoridad epistémica, basada en las ciencias naturales y la razón. Sin embargo, el proyecto de modernidad siguió otro rumbo, sacrificando el principio básico de la Ilustración centrado en el ideal de la emancipación del individuo.

En este contexto, la modernidad ha sostenido un lenguaje metanarrativo que se sustenta en la linealidad del crecimiento económico, la evolución de la ciencia, el progreso y el desarrollo, que se resisten a cualquier objeción discursiva de lo “científico”. La humanidad se encuentra frente a una nueva era que trasciende la misma modernidad; este nuevo sistema social toma el nombre, de acuerdo con diversas posiciones teóricas, como posmodernidad, poscapitalismo o modernidad tardía, modernidad inconclusa, entre otras.

La posmodernidad, señala Parker [3, p. 2], se popularizó inicialmente en la arquitectura como una reacción al modernismo favoreciendo las ideas de “reflexividad, ironía, artificio, azar, anarquía, fragmentación, pastiche y alegoría” que, a su vez, se relaciona con el concepto de cultura como una dimensión simbólica del *espacio-dinámica organizacional*[4], que ha permitido una serie de reflexiones alternativas, incluyendo los asuntos de la flexibilidad laboral y los temas relativos al posfordismo.

Este espacio-dinámica organizacional, en un enfoque pentadimensional, incluye lo físico, lo humano, lo tecnológico-procesual, lo político, y lo simbólico-cultural [4]. Este signo lingüístico se refiere, exclusivamente, a los análisis que contemplan la multidimensionalidad sinérgica, y la historicidad de la dinámica de este *locus* como (re)productora de significados y de la propia cosmogonía de este universo social, y no deber asociarse como sinónimo de organización, institución o empresa.

Un aspecto es la *posmodernidad* entendida como periodo de ruptura histórico y otro el *posmodernismo* como mirada filosófica, y que pueden o no ser concurrentes; por tanto, los teóricos sociales deben “tener claro cuando tratan de encontrar la posmodernidad y cuando tratan de ser posmodernistas” [3, p. 10]. En esencia, una cosa es producir ciencia social sobre la posmodernidad y otra distinta hacer ciencia social posmodernista. Este trabajo se sustenta en la segunda posición, la del posmodernismo; no obstante toma en cuenta algunos factores de la primera, puesto que se considera que la época posmoderna se expresa en una visión posmodernista.

Parker [3], además, aclara que un aspecto es el pensamiento posmodernista con el análisis de la organización y otro el de las organizaciones posmodernas; el primero es el que marca el contraste con el llamado “proyecto moderno”, cuya incidencia se describe como una elevada fe en la razón, y que ha llegado a considerárselo como sinónimo de “progreso lineal de la historia”, que lleva a una preocupación sobre la eficiencia, la minimización del conflicto y la rentabilidad.

El posmodernismo, entendido como posestructuralismo, se concibe como el análisis que aplica una filosofía antipositivista que, en la esfera de lo administrativo, se traduce en una confrontación con las nociones de objetividad y neutralidad que asumen los estudios organizacionales. Se entiende por posestructuralismo a la escuela de pensamiento que emergió como crítica al estructuralismo en los años 60 del siglo pasado. El estructuralismo fue una escuela relacionada con los estudios del lenguaje basado en la obra de Ferdinand de Saussure, y que tuvo notable influencia sobre otras disciplinas

Cabe decir, entonces, que el posmodernismo en el análisis organizacional no se esmera en mirar los grandes relatos que cuentan la linealidad de la historia, y cuyo final se refiere a una supuesta libertad absolutoria de la humanidad. Dada la característica de la fragmentación posmodernista se precisa ver, en contraposición, más bien los microrrelatos y las singularidades que se manifiestan en los individuos, que no siempre siguen un orden lineal con un concepto de principio a fin, sino se constituyen por fragmentos, narrativas inconclusas, historias no contadas; esta mirada dentro del funcionalismo y positivismo organizacionales está prácticamente ausente.



Las teorías organizacionales que se enmarcan en la modernidad, constituyen esencialmente las que se generaron sobre la base de la época clásica, con los aportes de Frederick Taylor, y que tienen un sentido de objetividad en el estudio de los fenómenos administrativos; por tanto, son teorías positivistas.

Para Hassard [5, p. 172] la perspectiva posmodernista se trata de una “nueva” teoría organizacional, que se dedica a “desmontar la gran narrativa del funcionalismo y reemplazarlo con significados y métodos que se refieren a lo local”; con este sentido de relativismo se pueden ampliar las formas de dar sentido a los temas administrativos. Además con el concepto de “descentramiento” la investigación de la realidad se ubica en el lenguaje del “otro” [6].

Con la mirada posmodernista en la organización es posible observar cómo la realidad se construye discursivamente, y esta reflexión se centra en dos puntos sustanciales: la producción flexible y los temas culturales, como respuestas distintas dentro del análisis organizacional; y el investigador que acoge el posmodernismo: “debe intentar revelar estas relaciones de poder para mostrar la fragilidad de la vida organizacional y el mito de su estabilidad” [3, p. 5].

Hassard [5] advierte que la epistemología posmodernista sugiere que el mundo está constituido por un lenguaje compartido, y que es posible conocerlo a través de un discurso particular; por tanto, se reconoce la naturaleza elusiva del lenguaje, no para crear un metadiscurso sino para explicar otras formas de lenguaje, como respuesta al absolutismo lingüístico del modernismo; es decir, se ubica como contracorriente con las posiciones reduccionistas. La aproximación postmoderna enfatiza la habilidad de criticar y sospechar de las presunciones intelectuales.

## 2.2 Cultura organizacional y subjetividades en la organización

En el plano de la perspectiva posmodernista de la teoría sobre la cultura organizacional es importante relacionarla con la perspectiva simbólica-interpretativa, sobre todo en relación con los postulados de la naturaleza del lenguaje como trasmisor de signos. Por tanto, se precisa darle a la cultura organizacional una consideración simbólica y semiótica en el seno de un *espacio-dinámica* de ocurrencia de sentidos [4].

Para alcanzar una aprehensión conceptual de la *dimensión simbólica* del “espacio-dinámica organizacional”, se precisa abordar la cultura de la organización en un amplio espectro de interpretaciones semióticas y de resignificaciones espaciales, temporales, relacionales, así como de construcciones de sentido; para lo cual es pertinente incorporar una perspectiva de la cultura organizacional que trascienda el sentido funcionalista de la misma y aporte a la perspectiva semiótica donde la organización es una totalidad cultural, y en el que está presente la subjetividad.

En este trabajo se alude a la *subjetividad* no exclusivamente como un proceso psicológico, sino como un proceso social, de construcciones de sentido que trasciende lo individual pero que no niega la individualidad, y se sustenta con elementos acumulativos para dar sentido social que permite poner en evidencia premisas no manifiestas o que se omiten en los estudios funcionalistas de la organización; estas premisas se refieren, precisamente, a las *sensibilidades* (sentimientos, emociones), *reflexividades* y *apreciaciones estéticas*, que trascienden el puro valor del razonamiento individual y más bien se insertan en posibilidades analógicas y metafóricas dentro de la expresión del lenguaje.

Para Alvesson [7, pp. 31-50] el posmodernismo se enfoca en los patrones lingüísticos y discursivos que son centrales en la producción de las subjetividades, y coloca sobre la discusión el hecho de que el “interior de los individuos no es fácil de estudiar” tanto desde su profundidad interpretativa como en lograr precisiones desde las investigaciones de carácter empírico; así, el autor, señala que el discurso provocaría posiciones subjetivas y éstas “conducen las percepciones, intenciones y actos de los individuos”.

La irrupción de la subjetividad en el análisis organizacional posmoderno abre alternativas para mirar los entornos de trabajo, pues la modernidad ha demarcado demasiado los procedimientos con el uso de la razón, y considera que los seres humanos no han dejado de ser apéndices de la máquina. Por eso, la reivindicación de la subjetividad da otra perspectiva a lo organizacional, que va más allá de las colectividades laborales para centrarse en los actores individuales y sus singularidades.

De ahí la importancia del enfoque etnográfico en la recuperación de los relatos de vida y de las subjetividades. La posibilidad de que la subjetividad pueda ser conocida en términos individuales se realiza por la vía narrativa, pues cuando alguien narra expresa un discurso en el cual explicita su propia subjetividad. Pero, evidentemente, es el investigador quien asume el sentido intersubjetivo al asignar un significado a la narrativa, y al mismo tiempo construir una interpretación a partir de lo que se ha narrado por parte de los actores. Por otra parte, el estudio de las narrativas autobiográficas está a tono con el lenguaje de la posmodernidad, pues se pasa del metarelato al microrrelato vivido, del discurso institucional al discurso de los actores singulares.

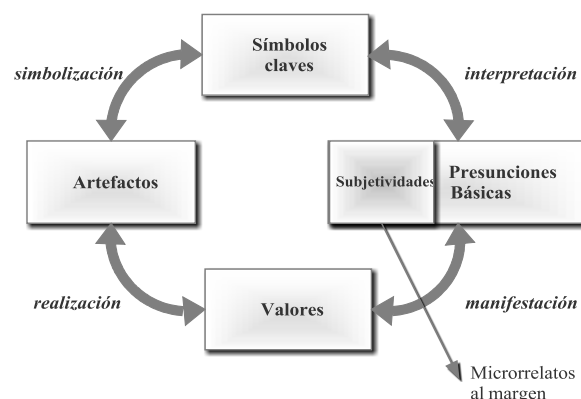
Geertz [8] puso énfasis en la interpretación simbólica de la sociedad y este enfoque es la base paradigmática para el estudio de la organización contemporánea, dentro de la línea posmodernista y simbólico-interpretativa [1]. Las formas simbólicas son el medio por el cual la gente dota de sentido a su mundo, y por tanto lo hace alcanzable en su comprensión. El papel del investigador, entonces, es interpretar los *símbolos claves* de cada cultura, por medio de la perspectiva etnográfica, que Geertz [8] denomina *descripción densa* debido a que la comprensión total de los hechos no es

plenamente alcanzable sino a través de situaciones singulares al interior de cada realidad cultural.

Ante el cúmulo de definiciones posibles sobre *cultura organizacional* es pertinente señalar la definición de Aguirre Baztán[9, p. 159] como el “conjunto de elementos interactivos fundamentales generados y compartidos por los miembros de una organización al tratar de conseguir la misión que da sentido a su existencia”. Lo que se destaca en la definición es la relación existente entre los miembros, que son parte de una totalidad, que a su vez permite el apareamiento de una serie de significados compartidos que son transmitidos.

Hatch [10] sugiere un modelo llamado *dinámica de la cultura organizacional*, que integra cuatro aspectos: artefactos, valores, presunciones básicas y símbolos; además, se incluyen los procesos de manifestación, realización, simbolización e interpretación, para remarcar el dinamismo en las organizaciones, que reconoce la estabilidad y el cambio en la reproducción de la cultura.

Esa investigación amplía el modelo de Hatch [10] quien a su vez se basa en Schein[11], sumando los aportes de Geertz [12] sobre la especificidad de los *símbolos claves* de la cultura. A ello se adiciona la perspectiva posmodernista que destaca la descripción de las subjetividades de los individuos como las partes menos visibles de las “presunciones básicas”. Así, el modelo queda como sigue:



**Figura 1.** La dinámica de la cultura organizacional y las subjetividades  
Fuente: adaptado de Hatch, 1993.

**Tabla 1.** Identificación de las categorías de la cultura organizacional  
Fuente: adaptado de Hatch, 1993.

Categorías	Dimensiones	Elementos	Técnicas
<i>Artefactos</i>	Aspectos que son visibles físicamente (producciones).	Arquitectura, interiores, decoración, aspectos tecnológicos, mobiliario, espacio físico, logotipos, lenguaje, vestimenta, símbolos superficiales, ritos, mitos, relacionamiento con los usuarios.	Observación directa y análisis documental.
<i>Símbolos clave</i>	Aspectos no visibles, pero interpretados en las construcciones de sentido y los artefactos.	Construcciones simbólicas profundas. Interpretaciones de las construcciones de sentido.	Observación directa y participante, entrevistas e interpretación semiótica.
<i>Valores</i>	Aspectos que son parcialmente visibles en los artefactos, textos y construcciones de sentido.	Misión, visión, normas, valores explícitos, códigos de conducta, principios éticos. Estructura, departamentos, formación profesional de los funcionarios.	Observación directa y participante, análisis documental y entrevistas.
<i>Presunciones básicas</i>	Aspectos que no son visibles.	a. Creencias, saberes, conocimientos, etnohistoria; y b. Subjetividades: i. <i>sensibilidades</i> (sentimientos y emociones.), ii. <i>reflexividades</i> y iii. <i>apreciaciones estéticas</i> .	Observación participante, análisis documental, entrevistas e interpretación de las narrativas al margen.

Para la identificación de los símbolos, se ha procedido a incorporar el aporte de Geertz[12] para identificar exclusivamente los *símbolos claves*, para lo cual es importante recalcar la contribución del concepto de semiosis social señalada por Pierce [13], que se realiza a través de la *semiótica del espacio*, que interpreta las imágenes que han sido registradas en imágenes fotográficas o vídeos, entre otros. En consecuencia, las categorías de la cultura organizacional se identifican como las siguientes.

Este estudio considera que la subjetividad de los miembros de la organización se incluye dentro de las presunciones básicas que señala Hatch [10] y que Aguirre Baztán [9] menciona como las creencias y la etnohistoria, y que es factible poner en evidencia a través de la interpretación de los microrrelatos o las “narrativas al margen”; las narraciones desde la semiótica “se hace con el intento de investigar y examinar los efectos de sentido que van creando los relatos” [13, p. 215].

### 3. METODOLOGÍA

Esta investigación se sustenta en la etnografía y, adicionalmente, en el paradigma cualitativo que según Creswell[14] tiene relación con las perspectivas interpretativas, construccionistas y posmodernas que son una respuesta al paradigma cuantitativo tradicional o positivista. En el cualitativo, el investigador interactúa con su objeto de estudio, en el cuantitativo el investigador intenta mantenerse “independiente” de la realidad investigada [15, p. 3].

Hatch [1] se refiere a la necesidad de la recuperación de la etnografía como eje metodológico en el ámbito de la teoría organizacional y destaca su idoneidad para el análisis cualitativo de lo cultural organizacional, a pesar de que la aplicación de los métodos etnográficos se ha puesto en entredicho fuera de la disciplina que la desarrolló: la antropología cultural. Su ventaja radica, en el estudio de las personas en sus entornos naturales de ocurrencia, y que captura el sentido social de las actividades ordinarias.

Por otra parte, la *etnografía enfocada* es un método complementario a la etnografía convencional [16], en la medida que su estrategia difiere de la última porque analiza las sociedades contemporáneas o la propia sociedad del investigador en la cual existe una gran fragmentación cultural y social; su peculiaridad radica en que se realizan visitas de campo cortas en lugar de extensas, con uso intensivo de la tecnología audiovisual para la recolección de datos, y que se concentra en las actividades comunicacionales, enfocando con precisión el objeto de análisis.

Para la realización de la etnografía enfocada se ha escogido una organización pública internacional que contiene características “posmodernas”, ubicada en la ciudad de París, Francia. Es decir, ha habido una intencionalidad en la selección de la unidad de este trabajo, prestando atención al

criterio de que ésta constituye un ejemplo representativo en donde es posible explorar los discursos que se generan en su interior, y así proceder a una descripción densa.

Por otra parte, este estudio asume que la categoría *subjetividad* en la organización se expresa, a su vez, en tres subcategorías propuestas por los autores del presente estudio: *sensibilidades*, *reflexividades* y *apreciaciones estéticas* que, si bien no agota el mundo subjetivo de las personas en el campo organizacional, dan una perspectiva clasificatoria dentro de un espacio organizacional que se caracteriza por la expresión de la riqueza de la diversidad cultural y de la estética.

Los actores entrevistados en el Museo del *Quai Branly* son funcionarios o contratados de la organización, y tienen cargos tanto en funciones directivas como técnicas. Las entrevistas que se realizaron a los funcionarios del museo fueron principalmente en inglés, pero incluyeron fragmentos en francés.

Como parte del proceso etnográfico en la unidad de observación se identificaron 10 informantes claves, entre directivos y funcionarios, con el objeto de realizar las entrevistas en profundidad, a quienes se formularon preguntas relacionadas con la cultura de la organización y sobre temas de la subjetividad en los individuos. El trabajo de campo se realizó en el propio *Musée du Quai Branly* ubicado en la ciudad de París durante 18 días intensivos en el mes de abril de 2014, utilizando guías de investigación para la posterior codificación en matrices de transcripción y análisis de contenido.

De las entrevistas registradas en formato digital se extrajeron, mediante un análisis exhaustivo de las mismas, las narrativas que se expresan en fragmentos discursivos o partes de texto consideradas como unidades de sentido que evidencian tanto descripciones de carácter general cuanto posturas de carácter individual, relacionadas con el propio mundo subjetivo de los miembros pero compartido en el contexto de la organización.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Descripción del Museo del Quai Branly

El *Musée du Quai Branly*, ubicado en París a pocos metros de la Torre Eiffel, lleva su nombre debido a que se ubica junto al muelle *Branly* del río Sena, y fue inaugurado el 20 de junio de 2006 por parte del entonces presidente francés Jaques Chirac, quien en el discurso inaugural decía: “Ahora que el mundo observa la mezcla de las naciones como nunca antes en la historia, era necesario imaginar un lugar original que haga justicia a la infinita diversidad de culturas, un lugar que expresa una mirada diferente sobre el genio de los pueblos y

las civilizaciones de África, Asia, Oceanía y las Américas<sup>2</sup>” [17, p. 1].

La postura no tardó en ser blanco de críticas pues se debatía que las obras exhibidas no eran sino expresiones que ocultaban la misma visión de aculturación, puesto que el solo hecho de mostrar dichos objetos con la visión del arte occidental significaba sacarlas del contexto en el que fueron originalmente concebidas, tanto en su función utilitaria como simbólica.

Ducoin [18, p. 33] señala que se dieron dos posiciones en torno a la exhibición del “arte primitivo” en el Museo del *Quai Branly*, la primera que defendía el punto de vista estetizante considerando que el arte obedece a nociones de pureza y de universalidad que el objeto contiene por sí mismo aún si el creador no lo reconoce, y la otra la de los defensores de la visión etnológica que sustenta que “el arte, como lo consideramos, no existe para los pueblos que crearon los objetos, el concepto de lo bello no se entiende, y para ellos son objetos que no se pueden contextualizar, extraer de los rituales a los que están asociados”.

A pesar de las controversias, para Martin “es un debate completamente superado” por ello el museo siguió adelante con su propuesta museológica y museográfica<sup>3</sup> que mira las creaciones no occidentales desde el punto de vista de la estética occidental respetando el contexto del cual fueron extraídas. Esta visión del “arte primitivo” es distinta del denominado “primitivismo”<sup>4</sup> como corriente artística contemporánea occidental, que ha sido de larga reflexión por parte de los historiadores y teóricos del arte por su inspiración en las fuentes extra europeas y particularmente africanas, que dieron lugar a un mercado del “arte primitivo” alrededor del mundo y particularmente en Europa.

La colección del museo del *Quai Branly*, que cuenta con más de 300 mil piezas, se constituyó a partir de dos museos que fueron cerrados con anterioridad para dar paso a la creación del nuevo museo en el muelle Branly; se trata del *Musée de l'Homme* fundado por Paul Rivet en 1938, y del *Musée National des Arts d'Afrique et d'Océanie* fundado por Andrés Malraux en 1962. Stéphane Martin, Presidente del Museo [19], expresa que “la colección es el punto de partida desde el cual el museo ha moldeado su identidad, la de un museo para el siglo XXI, con una innovadora arquitectura y museografía, todo en el corazón de una capital internacional”.

Aparte de las 300 mil objetos, el museo cuenta con un fondo de 700 mil fotografías y 320 mil documentos, y se exhiben de manera permanente 3.500 piezas, que es la parte visible de la

colección, que representa tan solo 1,16 % del total de objetos de la colección, lo que permite inferir la riqueza del espacio para el desarrollo de investigaciones y exhibiciones a futuro.

Se podría destacar, de manera general, algunos aspectos posmodernos en el museo del *Quai Branly*; en primer lugar, se trata de un museo que describe las manifestaciones de la diversidad humana en un centro urbano fundamental de la cultura de Occidente; además, la arquitectura se refleja en un *collage* de estilos entre lo contemporáneo, lo clásico, sumado a que el contenido del museo privilegia el sentido de la diversidad humana en un mundo contemporáneo, así como los aspectos estéticos de las culturas extra europeas que se constituyen en la principal fuente de diálogo museístico.

La narrativa museológica enfoca “fragmentos” de las culturas ancestrales que dialogan entre sí bajo el criterio y la mirada de la estética occidental, cuya lectura textual evoca, naturalmente, la pluralidad de las expresiones creativas y en permanente diálogo con las concepciones de arte de Occidente que intenta superar las nociones del llamado “primitivismo” en la historia clásica del arte universal. En adición, pretende conciliar en un espacio relacional la doble mirada: la científica occidental y la cultural originaria, sustentada en un discurso sobre la estética de los objetos extra europeos.

#### 4.2 Narrativas de la subjetividad

Como parte de los aspectos presuntivos se han ubicado a las narrativas de la subjetividad. La selección de las narrativas y los relatos de las subjetividades se han realizado de manera selectiva, con la perspectiva de la “fragmentación posmoderna”, en donde no hay ideas terminadas ni historias lineales, tal como se explicita en las referencias al cine posmoderno. Por tanto, los textos de la etnografía organizacional son encuentros con las sensibilidades, las reflexividades y las apreciaciones estéticas en un espacio de inestabilidades, incertidumbres y anhelos.

Estas voces marginales constituyen *fragmentos de discursos* que se contrastan con los discursos modernistas y funcionalistas de la organización. La identificación de estos fragmentos narrativos “al margen” se realiza sobre la base de la intersubjetividad que se produce en el encuentro entre el sujeto investigador y el sujeto investigado. Adicionalmente, las narrativas autobiográficas se entienden como fragmentos de historias de vida, que son necesarias para la recuperación de la subjetividad en la etnografía posmoderna, en la que se trasciben los diálogos que pueden parecer inconexos y extraños, que al conseguir unirlos se llega a una mayor comprensión de ellos.

Esta investigación propone que la categoría *subjetividad* se expresa, desde la perspectiva posmoderna, en tres subcategorías: i. *sensibilidades*, ii. *reflexividades* y iii. *apreciaciones estéticas*. Las *sensibilidades* implican discursos sobre los aspectos emocionales, sentimentales,

<sup>2</sup> Traducción de los autores.

<sup>3</sup> La *museología* se entiende como la ciencia de carácter general que trata del museo y su influjo en la sociedad, la *museografía*, en contraste, se refiere más bien al conjunto de técnicas y prácticas para su funcionamiento (cfr. DRAE 2001).

<sup>4</sup> El primitivismo, iniciado a finales del siglo XIX, fue acogido por artistas como Paul Gauguin, Pablo Picasso y Wilfredo Lam, entre otros.

afectivos, entre otros; las *reflexividades* se manifiestan en los discursos con opiniones sobre sí mismo y el entorno organizacional; y las *apreciaciones estéticas* son discursos que se relacionan con las manifestaciones creativas y el arte.

**Tabla 2.** Subcategorías de la subjetividad  
Fuente: elaboración de los autores

Subcategoría	Descripción
<i>Sensibilidades</i>	Se refieren a los microrrelatos en los que los actores expresan emociones, sentimientos, afectos, simpatías, empatías, esperanzas, orgullos, anhelos, alegrías, etc., que están relacionados con el <i>espacio-dinámica organizacional</i> .
<i>Reflexividades</i>	Se manifiestan en las narrativas en las cuales los actores opinan o describen aspectos sobre sí mismos, de otros o sobre los diversos aspectos del <i>espacio-dinámica organizacional</i> , tanto en lo relacionado a como “es” o como “debería ser”.
<i>Apreciaciones estéticas</i>	Son descripciones o percepciones relacionadas al arte, la creatividad, la poética y la estética en general, que se manifiestan o están presentes en este <i>espacio-dinámica organizacional</i> y sus aspectos inherentes.

Las subjetividades se visibilizan en los microrrelatos, en las pequeñas historias narradas por los miembros en la organización y que son parte del conglomerado de las presunciones básicas que conforman la cultura organizacional entendida sobre la base de la textualidad, la fragmentación y la resistencia que caracterizan al pensamiento posmodernista [20, p. 256]; en este punto, se pretende ilustrar una perspectiva alejada del positivismo y funcionalismo organizacionales.

Se entiende que estas subjetividades, a pesar de ser manifestaciones de la singularidad de los miembros de la organización, constituyen un aspecto de naturaleza *compartida*; por tanto, están sujetas a la incorporación y análisis dentro de la cultura organizacional. La forma en la que las subjetividades se comparten se refiere a un condicionante que es semejante en los relatos, por lo que se advierte un sentido cultural y por tanto son transmitidas entre sus miembros.

De las entrevistas realizadas en el *Musée du Quai Branly* se han interpretado solamente algunos relatos relacionados con las sensibilidades, las reflexividades y las apreciaciones estéticas. Se han utilizado fragmentos de las entrevistas que se han considerado como los más relevantes, con el objeto de ilustrar las subjetividades dentro de la organización; a continuación se presentan algunos ejemplos.

#### 4.2.1 Sensibilidades

Informante A [21], director de proyectos del museo, menciona que los funcionarios tienen mucha pasión por su museo y que se identifican con éste, y que además tienen un sentimiento de orgullo, aunque su trabajo es muy arduo por las múltiples tareas que tienen que hacer durante el día, pero que ellos tienen independencia en su labor y pueden ser protagonistas en su propia actividad. Lo que permite colegir el sentido de responsabilidad que delega la autoridad, sobre todo porque los retos de la organización son muy grandes.

Señala el mismo informante que actualmente tienen excelentes proyectos y que el museo está pasando por un momento de excelencia y que ella trata de inculcar dicha idea en su equipo, y que los retos nunca terminan, incluso en la divulgación de los contenidos y los temas que promulga las exposiciones, por ejemplo: “El racismo sigue existiendo, que es la no tolerancia hacia otras personas, religiones; todavía existe, que es la ignorancia, la ignorancia profunda sobre la cultura de las otras personas, y existe. Entonces, creo que hoy todo el mundo, de todas las edades, entiende que es una gran solución el continuar con el diálogo entre las culturas. Eso es algo muy francés, es el espíritu de la Ilustración” [21]

Informante B [22], responsable de las colecciones de las Américas en el museo, dice que tuvo mucha suerte de participar en la instalación de las piezas del museo como un tiempo muy emocionante para él, y que se sintió sorprendido cuando le propusieron ser parte del equipo y que ha sido una oportunidad para conocer a personas interesantes provenientes de distintas partes del mundo y con distintos conocimientos, que le han permitido una interacción internacional.

Para Informante B [22] esta ha sido una gran oportunidad para realizar sus sueños, que los había tenido desde niño, puesto que relata que proviene de una familia modesta en una pequeña ciudad ubicada en el centro de Francia, junto a las montañas, y que cuando el informante les mencionó una vez a sus padres que quería ser arqueólogo le reprocharon diciéndole que estaba “loco” puesto que tenían la preocupación acerca de cómo viviría con esa profesión. Sin embargo, tenía la determinación de continuar con su sueño. Ahora el informante tiene a cargo la colección de objetos de las Américas que estuvieron en los gabinetes de los reyes de Francia en los siglos XVI y XVII; por todo esto, se siente muy afortunado.

Informante C [23], director del departamento patrimonial, tiene la percepción de que un museo es como un templo, debido a que su arquitectura tiene esa semejanza, como es el caso del *British Museum*, por ejemplo, en el que uno tiene un sentimiento cuando los visita porque es un lugar laico pero sagrado, en donde con emoción “uno va a mirar un tesoro o algo como un tesoro”.

Como se ve, es común por parte de los funcionarios del museo el sentido de orgullo de ser parte de una institución de vanguardia en la gestión cultural en Francia, y además, la presencia de recursos museográficos hacen de este espacio organizacional un lugar en donde se pueden tener experiencias sensibles y diferentes que en los otros museos.

Informante D [24] relata con emoción los inicios del proyecto del museo indicando que comenzó prácticamente solo él, pero se asignó un presupuesto considerable para establecerlo y que tenía mucha libertad dentro de las reglas existentes en Francia, que es un país al que le gusta mucho las reglas, pero básicamente logró conformar un buen equipo para diseñar el museo, más de lo que se podía haber esperado que lo realizaron entre los años 1998 y 2006. Mientras el museo se construía el informante viajó a muchas partes para observar otras experiencias en el campo, pues tenía un fuerte interés sobre el rol que el museo podría jugar en el futuro; y estaba muy contento con esta posición.

#### 4.2.2 Reflexividades

Informante A [21], reflexiona sobre su vinculación con el museo, y menciona que hace once años le fue propuesto que trabajara en el proyecto del museo, y que esto significó una gran oportunidad profesional para ella puesto que se trataba de un concepto y de una idea que no existía en ese momento en Francia, y que puso todo su esfuerzo para construir tanto la parte física como las ideas de contenido del proyecto: “Esto es muy original en el campo de los museos en París, y también en el mundo [...] Así que tuve que crear mi propia organización, decidir cuántas personas, lo que debíamos hacer, las cosas importantes para hacer, cómo trabajarían juntos, y luego diseñar los perfiles profesionales para contratar a las personas”.

La visión organizacional de Informante A tiene relación al hecho de que a pesar de ser el museo una organización vertical, donde hay directores como jefes de divisiones, se toma en cuenta a todos, y que las cosas no son solamente verticales, puesto que las personas de distintas áreas forman equipos y pueden trabajar juntos sin dificultades para alcanzar la precisión que demandan los proyectos.

Informante A [21] señala que el museo es una institución joven de apenas diez años de vida, pero que es necesario estar en la cima de todo y que siempre deben inventar e innovar tal como sucedió cuando el museo abrió sus puertas, que es una estrategia para no perder la idea de la excelencia que tiene los museos de París, como el Centro Pompidou o el Museo del Louvre. Anota que el museo tiene una muy buena imagen dentro de la población francesa y que vienen de otras partes del país a visitarlo.

Informante B [22] explicita la originalidad del museo y de su nueva organización, asunto que es compartido por la mayoría de quienes trabajan en él; la idea de lo nuevo está presente de

manera permanente en los discursos y narrativas dentro de la organización.

Por otra parte, Informante B considera que el museo sí ha sido exitoso, porque muchas personas vienen a visitar las exhibiciones y a conocer más sobre la diversidad del mundo y de la forma particular en la que los objetos están exhibidos. No considera que son una burocracia como los antiguos museos puesto que éste para él tiene una nueva visión y que cuando fue inaugurado en el año 2006 ya poseía un reto para el siglo XXI.

Dice que a pesar de ser una institución pública no operan como si fuera tal, ya que ante todo tiene un objetivo educativo sustancial que, entre otros aspectos, muestra la época colonialista de Francia, pero además poseen artefactos de muchas partes del mundo para fomentar el valor de la diversidad humana. El informante menciona que, como curador, tiene mucha libertad para proponer exhibiciones o investigaciones. Con todo, Informante B se refiere a que actualmente hay un gran debate sobre el rol de los curadores en los museos en el mundo.

Informante C [23] menciona que los espacios del museo tienen un diseño particular puesto que se ha logrado en un espacio abierto adaptar una museografía que contemple una adaptación a la arquitectura del edificio y que se factible pasar en las exhibiciones de una región a otra de manera natural, y que no hay una secuencia necesariamente en el discurso expositivo sino que se puede libremente visitar cualquier espacio: “es como el internet, se va de un lugar a otro, y si hay interés en algo se puede volver, no hay un *mode d’emploi* en este museo, se puede escoger [lo que se quiere ver] y hay libertad en lo que se quiere visitar en el museo”. Al principio, explica el informante, la gente estaba horrorizada, e incluso los especialistas en museos decían: “esto no es nada, esto es un caos, no significa nada”; pero esto “es posmoderno y anticolonialista también”.

Para el contenido del museo, como se ha mencionado, se ha recurrido a recursos no tradicionales en la forma de exhibir los objetos; por otra parte la temática por sí mismo – *artspremiers*– implica estrategias de comunicación distintas a las tradicionales que se han enfocado en arte occidental; no es lo mismo exhibir un cuadro de Van Gogh que una máscara ritual de Oceanía. Sin embargo, la idea de fusionar los discursos, la tecnologías, las regiones continentales, en un solo relato contemporáneo y con fines educativos le hacen a este lugar un espacio artístico posmoderno.

Informante D [24] se refiere a su experiencia profesional que de alguna manera ha influenciado su forma de administrar el museo, especialmente en una estadía de un año en Tahití como parte de la marina francesa, luego de lo cual regresó a París para estudiar administración pública; esto luego forjarían su carácter para asumir retos más desafiantes como el de administrador del Centro Pompidou a la edad de 30 años, que fue el inicio de su trayectoria en el mundo de la

cultura. Posteriormente, entre otros trabajos, tuvo la oportunidad de dirigir la producción radial de las orquestas públicas, que le daría camino para llegar a ser designado por el presidente francés Jaques Chirac como director del proyecto del nuevo museo que se construiría en Francia.

#### 4.2.3 Apreciaciones estéticas

Informante A [21] menciona que en el museo se han realizado más de sesenta exposiciones y han tratado de que cada una de ellas tengan un ambientación única, muy creativa desde el inicio, desde el punto de vista cultural y sobre todo artístico, sin perder la idea original creada por el curador de las mismas: “tengo que revisar el proyecto en varios momentos artísticos, y superviso no solamente el punto de vista artístico sino que exista una conexión entre la idea del museógrafo y el sentido del proyecto; aun cuando el curador podría hacerlo, pero yo ayudo en estas cosas para evitar que sean asuntos anecdóticos o irrelevantes”.

Informante B [22] dice que para él, como arqueólogo, los objetos que se exhiben en el museo están ante todo conectados con la sociedad que los produjo originalmente, por tanto el objeto es en primer lugar una fuente de información científica y no de carácter estético, y que lo más importante es mirar sus conexiones con las sociedades originarias de donde provienen: “Usted sabe que con la creación del *Quai Branly* hubo un gran debate sobre el asunto de la estética, en el sentido que tal vez no está conectada esta perspectiva con las personas autóctonas”.

Es interesante el microrrelato de Informante C [23] sobre una de las exposiciones más originales que ha realizado, llamada *La mort n'ensaurarien: Reliques d'Europe et d'Océanie* (Nunca habrá la muerte: reliquias de Europa y Oceanía), en el año 2000, cuando todavía trabajaba en el *Musée National des Arts d'Afrique et d'Océanie* y que para él ha sido una de sus principales inspiraciones para los posteriores trabajos e investigaciones en el *Quai Branly*; ésta contenía una serie de elementos humanos, particularmente cráneos y esqueletos. Él menciona esta iniciativa como una expresión posmoderna en el arte que se exhibió en el museo, pues se trataba de una curaduría sobre restos humanos, esqueletos y cráneos, utilizados como objetos de arte por diversas culturas del mundo y particularmente en Oceanía, que imprimían una relación estrecha con el concepto de la muerte, para así explorar un mundo desconocido e inquietante.

La exposición denotaba un frágil puente de certezas o de conocimientos para atravesar el espacio en el que se destacaban unas piezas inquietantes, que habían sido poco conocidas y algunas totalmente desconocidas; las obras remitían a aspectos existenciales del ser humano en culturas diversas. Dice que esta exhibición tenía una relación con la muerte, que está en la mente de todos, y de la relación que todo el mundo tiene íntimamente con ella. Es por eso que hicieron encuestas al público durante esta exposición, y no

sólo para la gente mayor sino también para los jóvenes, para saber la opinión de cómo enfrentar la idea de la muerte; y fue algo muy diferente. Fue, sin duda, una experiencia de unificación entre la historia, el arte, la antropología y la etnografía [23].

Es interesante este último relato de Informante C [23], puesto que devela su pasión por el arte y reflexiona sobre la posibilidad de un diálogo entre las culturas occidental y oceánica, conforme los lineamientos y las presunciones básicas que están implícitos en el Museo del *Quai Branly*, que remarca la necesidad del reconocimiento de la diversidad de los otros. El aporte del informante ha sido notable en la dirección de los procesos de investigación y curaduría de las colecciones del museo, donde además la idea de una visión posmoderna está presente.

## 4. CONCLUSIONES

La mirada posmodernista en la organización permite una recuperación de los aspectos que no consideraría las visiones funcionalistas y hegemónicas de las teorías administrativas modernas. En este sentido se precisa de una estrategia cualitativa de investigación que explore la comprensión de las diversas facetas de la organización.

Con este antecedente se precisan de otros enfoques como el posmodernismo organizacional que extiende los sentidos a conceptos como: reflexividad, ironía, artificio, azar, anarquía, fragmentación, pastiche y alegoría, que cuestionan la linealidad señalada que anuncia el fin de los “grandes relatos” o “metanarrativas”.

De este modo, es posible mirar a la organización como construida discursivamente. El posmodernismo pone en duda las ideas modernistas acerca de la posibilidad de un conocimiento objetivo del fenómeno social, y en contraste, toma en cuenta otros aspectos como los relacionados a la subjetividad; así, el sujeto posmoderno conforma una alteridad que radicaliza la subjetividad. Por ello es primordial el enfoque etnográfico en la recuperación de subjetividades.

La perspectiva posmodernista sobre la cultura organizacional se relaciona con la perspectiva simbólica-interpretativa, sobre todo en relación con los postulados que se refieren a la naturaleza del lenguaje como trasmisor de signos. La cultura organizacional tiene un conjunto de elementos interactivos y compartidos por los miembros de una organización al tratar de conseguir la misión que da sentido a su existencia. Hatch establece un modelo complementario que la denomina dinámica de la cultura organizacional, que integra los niveles descritos por Schein (artefactos, valores y presunciones básicas) con los símbolos, en dinamismo de cambio en la reproducción de la cultura.

El museo francés del *Quai Branly* se caracteriza por ser una organización de innovación tanto en lo referente a las temáticas tratadas cuanto en sus formas de trabajo, es decir

en su continente y su contenido. Por esto y otros aspectos el museo contiene elementos que se podría denominar como posmodernos, y se constituye como un lugar propicio para mirar las subjetividades de la cultura organizacional.

Finalmente, la subjetividades se visibilizan en las pequeñas historias narradas por los miembros de la organización que conforman la cultura organizacional entendida sobre la base de la textualidad, la fragmentación y la resistencia que caracterizan al pensamiento posmodernista. Estas subjetividades se expresan, a su vez, en las siguientes subcategorías: sensibilidades, reflexividades y apreciaciones estéticas, que se resumen en las entrevistas a los informantes de la investigación.

#### REFERENCIAS

- [1] M. J. Hatch, *Organization Theory. Modern, Symbolic, and Postmodern Perspectives*, New York: Oxford University Press, 1997.
- [2] M. M. Falcão Vieira y M. P. Caldas, «Teoria Crítica e Pós-modernismo: principais alternativas á hegemonia funcionalista,» *RAE*, vol. 46, nº 1, pp. 59-69, Jan/Mar 2006.
- [3] M. Parker, «Post-Modern Organizations or Postmodern Organization Theory?,» *Organization Studies*, vol. 13, nº 1, pp. 1-17, 1992.
- [4] P. E. M. Martins, «O Espaço-Dinâmica Organizacional em Perspectiva Histórica,» de *Brasil Holandês: História, Memória e Patrimônio Compartilhado*, São Paulo, Alameda, 2012, pp. 327-341.
- [5] J. Hassard, «Postmodernism, philosophy and management: concepts and controversies,» *International Journal of Management Review*, vol. 1, nº 2, pp. 171-195, June 1999.
- [6] R. Cooper, «Modernism, Post Modernism and Organizational Analysis 3: The Contribution of Jacques Derrida,» *Organization Studies*, vol. 10, nº 4, pp. 489-502, 1989.
- [7] M. Alvesson, *Postmodernism and Social Research*, Buckingham: Open University Press, 2002.
- [8] C. Geertz, *La interpretación de las culturas*, Barcelona: Gedisa, 1988.
- [9] Á. Aguirre Baztán, *La cultura de las organizaciones*, Barcelona: Editorial Ariel, S.A., 2004.
- [10] M. J. Hatch, «The Dynamics of Organizational Culture,» *The Academy of Management Review*, vol. 18, nº 4, pp. 657-693, October 1993.
- [11] E. H. Schein, *Organizational Culture and Leadership*, 3rd ed. ed., San Francisco: John Wiley & Sons, Inc., 2004.
- [12] C. Geertz, *La interpretación de las culturas*, Barcelona: Gedisa, 2003.
- [13] V. Zecchetto, *La Danza de los Signos: nociones de semiótica general*, Quito: Abya-Yala, 2002.
- [14] J. W. Creswell, *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches*, 3rd. ed., Sage, 2009.
- [15] H. Tsoukas y C. Knudsen, «Introduction,» de *The Oxford Handbook of Organization Theory*, Oxford, Oxford University Press, 2003, pp. 1-36.
- [16] H. Knoblauch, «Focused Ethnography,» Septiembre 2005. [En línea]. Available: <http://www.qualitative-research.net/>. [Último acceso: 26 noviembre 2013].
- [17] S. Martin, *Musée du Quai Branly*, Paris: Gallimard, 2011.
- [18] C. Ducoin, «Una reflexión sobre el arte primitivo,» *Elementos*, nº 83, pp. 33-34, 2011.
- [19] Musée du Quai Branly, *Arts and civilisations of Africa, Asia, Oceania and the Americas*, Paris: Quai Branly, 2012.
- [20] M. Alvesson y S. A. Deetz, «Critical Theory and Postmodernism Approches to Organizational Studies,» de *The SAGE Handbook of Organization Studies*, London, SAGE Publications Ltd., 2006, pp. 255-283.
- [21] Informante A, *Investigación doctoral*. [Entrevista]. Abril 2014.
- [22] Informante B, *Investigación doctoral*. [Entrevista]. Abril 2014.
- [23] Informante C, *Investigación doctoral*. [Entrevista]. Abril 2014.
- [24] Informante D, *Investigación doctoral*. [Entrevista]. Abril 2014.



# Modelo de Flujo de Costo Mínimo para la Asignación de Estudiantes a Instituciones Educativas en el Sistema de Educación Público Ecuatoriano

Gutiérrez S.\*; Salazar F.\*; Nolivos K.\*

\*Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ciencias, Quito, Ecuador  
e-mail: [sandra.gutierrez@epn.edu.ec](mailto:sandra.gutierrez@epn.edu.ec), [fernanda.salazar@epn.edu.ec](mailto:fernanda.salazar@epn.edu.ec), [karen.nolivos@est.epn.edu.ec](mailto:karen.nolivos@est.epn.edu.ec)

**Resumen:** En este trabajo se considera el problema de encontrar una asignación óptima de cupos para los estudiantes de Educación General Básica en el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ). Este es un problema que año tras año llama la atención de los medios, y de la sociedad en general, por los diferentes métodos que se aplican y la inconformidad de los estudiantes y padres de familia. Con base en los requerimientos de las autoridades de educación, se han generado diferentes escenarios y varios modelos de flujo de costo mínimo que permiten resolver exitosamente el problema. En estos modelos prima el criterio de minimizar la movilidad global de los estudiantes que corresponde al nuevo modelo de gestión pública que se desea aplicar en el país. Adicionalmente, se proponen dos modelos en los que se incluyen los criterios de rendimiento académico y preferencia de los estudiantes, por considerar que se ajustan a la realidad actual. El análisis incluye el cálculo de la oferta y la demanda de cupos, el planteamiento de los modelos de optimización y su solución a través de software especializado.

**Palabras clave:** asignación, flujo de costo mínimo, algoritmos, optimización.

**Abstract:** Nowadays, the Ecuadorian government has established that people should receive all basic services, including education, in its territory of residence, called District. Therefore, in this work, the goal is to find an optimal assignment of students to public educational institutions in the Metropolitan District of Quito. For the described problem, we have generated minimum cost flow models under three scenarios. In the first one the resulting assignment minimizes the total mobilization of students, as required by the authorities. The second model includes a penalization when a student moves between Districts. Finally, in the third scenario we include a measure of the "social resistance" to the first scenario, which includes criteria such as academic performance of students and their preference to specific institutions. The analysis embraces the supply/demand estimation, the generation of optimization models and their solution through specialized software.

**Keywords:** assignment, minimum cost flow, algorithms, optimization.

## 1. INTRODUCCION

De manera general, el sector público ha sido un terreno fértil para la aplicación de técnicas de optimización. Específicamente, en el sector educativo, surgen muchos problemas cuya toma de decisiones pueden ser asistidas por modelos de programación matemática, como por ejemplo, modelos de flujo de costo mínimo, asignación, localización de facilidades, entre otros. Los problemas típicos que han sido resueltos con herramientas de optimización han sido la elaboración de horarios, tanto de alumnos como de profesores, la localización de establecimientos educativos para satisfacer la demanda de la población, entre otros. En América Latina, se han realizado varios estudios referentes a

la localización y número adecuado de escuelas utilizando modelos de p-medianas y de máxima cobertura, entre los cuales podemos citar a los trabajos realizados en Brazil por Pizzolato y Fraga [7] y Pizzolato, Broseghini y Nogueira [8]. Por otro lado, en Chile, podemos resaltar el estudio realizado por Gac, Martínez y Weintraub [3], en el cual se toma en cuenta en la función objetivo el beneficio social del sistema educativo, al asignar diferentes tipos de escuelas a zonas y simultáneamente asignar estudiantes clasificados por categoría socio económica.

En la literatura, una de las primeras aplicaciones para asignar estudiantes a escuelas respetando criterios de balance racial, ha sido realizada por Belford y Ratliff [1], utilizando técnicas de modelos de flujos de costo mínimo. Posteriormente han surgido otros estudios para asignar estudiantes a escuelas, como por ejemplo los realizados por McKeown y Workman [5] y Elizondo [2], en el primer trabajo se minimiza la distancia total de transporte de los estudiantes a sus escuelas, el cual fue analizado agrupando estudiantes de acuerdo a su ubicación geográfica y utilizando únicamente las escuelas ya

Artículo recibido el 28 de noviembre de 2014; revisado ...  
Esta obra fue financiada por la Escuela Politécnica Nacional en el marco del Proyecto Semilla PIS-12-13.  
Autor para correspondencia: [fernanda.salazar@epn.edu.ec](mailto:fernanda.salazar@epn.edu.ec), 0994249625, EPN Edif. Administrativo 8vo piso.

existentes bajo el enfoque de k-centros. En el segundo, se analiza el caso del Distrito Escolar Independiente de Houston, se realiza la asignación individual de estudiantes, minimizando la distancia total recorrida y se enfoca en la evaluación de heurísticas computacionales para resolver el problema de asignación a gran escala.

En la nueva constitución ecuatoriana del año 2008, se incluyó el concepto de *sumakkawsay* traducido como Buen Vivir, el cual implica “mejorar la calidad de vida de la población, desarrollar sus capacidades y potencialidades; contar con un sistema económico que promueva la igualdad a través de la re-distribución social y territorial de los beneficios del desarrollo; impulsar la participación efectiva de la ciudadanía en soberanía nacional, promover la integración latinoamericana; y proteger y promover la diversidad cultural” (Art. 276). Una consecuencia directa de este artículo ha sido una nueva planificación territorial, en la cual se considera que el DMQ está conformado por distritos, los cuales a la vez están formados por circuitos. De acuerdo con esta nueva planificación territorial, las personas deben recibir todos los servicios básicos (salud y educación especialmente) en su territorio de residencia. Esto ha ocasionado incluso más molestias en los usuarios del sistema público educativo, puesto que la calidad de los centros educativos no es homogénea ni en infraestructura ni en nivel académico.

En este trabajo, se presenta la solución para el problema de asignación de cupos para estudiantes del sistema público de Educación General Básica, tomando en cuenta el nuevo modelo de gestión propuesto por el Ministerio de Educación, en el cual los estudiantes no eligen directamente el centro educativo al cual quieren asistir, sino que esta asignación se realiza de manera directa desde la Subsecretaría de educación del Distrito Metropolitano de Quito (SEDMQ), para promover el cumplimiento de la planificación territorial, es decir se desea que cada estudiante permanezca en su circuito territorial educativo y de no existir instituciones educativas al momento en su circuito, entonces el estudiante permanezca al menos en su distrito, sin embargo, debido a que la demanda es mayor que la oferta, esta última condición puede violarse en caso de no existir más plazas en el distrito de residencia del estudiante. Cabe resaltar, que un aspecto que no hemos encontrado en otros artículos, es la evaluación de la “resistencia social” al asignar a los estudiantes, sin darles oportunidad a elegir su centro educativo. Por este motivo, se ha incluido un escenario en el que se analiza la inclusión en la función objetivo de la preferencia de cada estudiante por un determinado centro educativo, ponderado por la nota promedio obtenida en el año inmediatamente anterior, para poder satisfacer de mejor manera los requerimientos de estudiantes con mayor rendimiento académico.

A continuación, en la sección 2 describimos el modelo de flujo de costo mínimo propuesto y las variantes consideradas para proporcionar varios criterios de asignación a los tomadores de decisiones. En la sección 3 ponemos a consideración del lector los resultados de asignación obtenidos para los diferentes escenarios mediante el algoritmo primal-dual del simplex para redes implementado en MCF[4]. Finalmente, en la cuarta sección resaltamos las principales conclusiones y aportes de este artículo.

## 2. MÉTODOS Y MATERIALES

### 2.1. Métodos

En esta investigación tomamos como caso de estudio el problema de encontrar una asignación óptima de cupos para estudiantes que desean ingresar a octavo año de Educación General Básica (EGB) en el DMQ por ser el de mayor interés; sin embargo, los resultados pueden replicarse para cualquier nivel de EGB. El problema se resuelve mediante un modelo de flujo de costo mínimo en el que se respetan las capacidades de las instituciones educativas y en el que cada estudiante se asigna a una única institución, o a su vez se indica que no existe un cupo para ese estudiante. La asignación se calcula para cuatro diferentes escenarios. En el primero la asignación requerida es aquella que minimice la movilización total de los estudiantes hacia las instituciones educativas, en el segundo, penalizamos el hecho de moverse entre distritos aumentando el valor de la distancia real en un treinta por ciento; el tercer escenario intenta dar una alternativa adicional a los tomadores de decisiones en donde se incluyen criterios como el rendimiento académico de los estudiantes y su preferencia en cuanto a instituciones educativas, si bien estos criterios no están dentro del nuevo modelo de gestión, son cercanos a la realidad social del Distrito Metropolitano de Quito. Dentro de este último escenario, consideramos el caso de maximizar las preferencias de los estudiantes y también el caso de incluir un factor tanto de movilidad como de preferencias en la función objetivo.

El DMQ se divide en 9 distritos los cuales se subdividen en 45 circuitos y estos últimos se dividen en 65 parroquias, como se muestra en la figura de abajo.

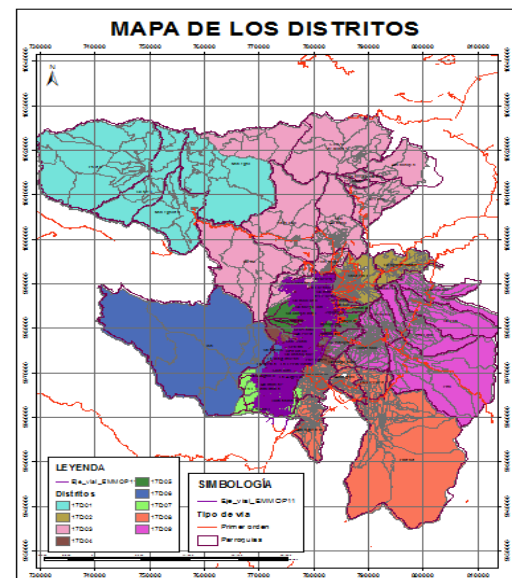


Figura 1: Mapa de los distritos del DMQ.

Para la formulación del modelo de flujo de costo mínimo es indispensable contar con datos sobre la oferta y la demanda de cupos para octavo año de EGB. En esta aplicación, la información sobre la demanda, el número de instituciones educativas, su oferta y su ubicación se generó de acuerdo al Archivo Maestro de Instituciones Educativas del Ecuador “AMIE 2011-2012 FIN”[9]; como se detalla a continuación.

**Estudio de la demanda:** Para estimar la demanda se utilizó el archivo “AMIE 2011-2012 FIN” en la información que concierne a estudiantes que están cursando actualmente séptimo año de EGB en instituciones de sostenimiento fiscal, ya que son quienes automáticamente necesitan un cupo para octavo año, a esta cantidad se le sumó un diez por ciento que pretende incluir factores como cambios de domicilio, migración, cambios del sistema de educación privado al sector público, entre otros; este factor fue sugerido por las autoridades de la SEDMQ. Los datos incluyen el número de estudiantes por institución en séptimo año de EGB, por lo que fácilmente se pueden tener datos agregados a nivel de parroquia, circuito y distrito. Para esta aplicación se encontró que la demanda es de 31572 estudiantes. En los diferentes escenarios que planteamos más adelante se necesita conocer la ubicación geográfica de cada uno de ellos; lamentablemente, no se tienen registros sobre este particular, por lo que se asume que los estudiantes de séptimo año de EGB que estudian actualmente en una determinada parroquia pertenecen o residen en esa parroquia.

**Estudio de la oferta:** Del archivo “AMIE 2011-2012 FIN” se determinó que el número de instituciones de sostenimiento fiscal en el Distrito Metropolitano de Quito es 212. Se tiene además su ubicación hasta el nivel de parroquias. La capacidad de cada institución, para octavo año de EGB, no se encuentra explícita por lo que fue estimada como el número de estudiantes que se encuentran cursando actualmente ese nivel.

Los dos elementos que acabamos de describir son comunes para todos los modelos desarrollados en este trabajo. A continuación presentamos los diferentes escenarios que resultan del planteamiento de diferentes funciones objetivo.

**Escenario 1:** El criterio de asignación solicitado por las autoridades de la SEDMQ, fue que se calcule la asignación de estudiantes de acuerdo a su ubicación geográfica, de manera que, en lo posible, los estudiantes permanezcan dentro del circuito en el que residen. Este criterio apareció recientemente en el llamado nuevo modelo de gestión pública [6], para satisfacerlo es indispensable contar con datos sobre la distancia entre el lugar de residencia de los estudiantes y el lugar en el que está ubicada cada institución. En nuestro modelo tales distancias se calcularon, a nivel de parroquias, usando mapas proporcionados por la SEDMQ y el programa ARCGIS 10[10]. En primer lugar se definió el centroide de cada parroquia de acuerdo a su oferta, determinado por la agrupación de las instituciones educativas públicas disponibles en los mapas proporcionados. Luego, el cálculo de las distancias interparroquiales, aproximadas en kilómetros (de centroide a centroide), se lo hizo mediante el uso de la herramienta Measure disponible en el programa ARCGIS 10, siguiendo primordialmente las vías de primer orden especificadas en los mapas. Debemos mencionar que se desconoce si por dichas rutas existe transporte público y si serán las verdaderas rutas de movilización de los estudiantes, por lo que la distancia real podría variar considerablemente. El modelo de optimización resultante es el siguiente:

$$(P1) \left\{ \begin{array}{l} \min \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J d_{ij} x_{ij} \\ \text{sujeto a} \\ \sum_{j=1}^J x_{ij} = 1 \quad \forall i = 1, \dots, I \quad (1) \\ \sum_{i=1}^I x_{ij} = c_j \quad \forall j = 1, \dots, J \quad (2) \\ x_{ij} \in \{0,1\} \end{array} \right.$$

En donde:  $I$  es el número de estudiantes (demanda),  $J$  es el número de instituciones,  $d_{ij}$  es la distancia entre la parroquia del estudiante  $i$  y la parroquia de la institución  $j$  y  $c_j$  es la capacidad de la institución  $j$ . Las variables de decisión  $x_{ij}$  son variables binarias que toman el valor de 1 si el estudiante  $i$  es asignado a la institución  $j$  y 0 en caso contrario.

**Validez del modelo:** En este modelo, la restricción (1) garantiza que cada estudiante es asignado a una única institución, mientras que la restricción (2) garantiza que se respetará la capacidad de cada institución. Las dos restricciones son de tipo igualdad debido a que se considera un modelo balanceado, esto es, se asume que la oferta es igual a la demanda. Como es bien conocido, en caso de no existir tal balance, se procede a crear un nodo artificial con el valor apropiado de oferta o demanda, según el caso. La función objetivo permite encontrar la asignación de estudiantes que hace que la movilidad global sea mínima, por tanto resolverá el problema de estudio, indicando además el faltante o el sobrante de cupos en cada distrito.

**Escenario 2:** Aquí se considera explícitamente la condición que, en lo posible, los estudiantes permanezcan en su circuito o, al menos, en su propio distrito. Con el fin de incluir esta condición en la función objetivo, se aumentó una penalización del treinta por ciento en el valor de la distancia  $d_{ij}$ , siempre que  $i$  y  $j$  se encuentren en diferentes distritos, en caso contrario se mantiene el valor de la distancia interparroquial original.

**Escenario 3:** En este escenario se incluyen dos criterios adicionales al de minimizar la movilidad de los estudiantes, estos criterios son el rendimiento académico y la preferencia del estudiantes por ciertos centros educativos, que obedecen a lo que sucede en la realidad y que pueden servir para analizar el grado de aceptación o de resistencia social que una determinada asignación causa en los estudiantes y en los padres de familia.

En una primera modificación al modelo base, que llamaremos Caso A, proponemos que los estudiantes de más alto rendimiento tengan mayor opción de ser asignados a las instituciones de su preferencia, esto es, encontramos la asignación que maximiza la preferencia global de los estudiantes, lo cual sería equivalente a minimizar la resistencia social. Suponemos que cada estudiante puede señalar tres instituciones de su preferencia, a ellas les asignamos un factor  $f_{ij}$  de 0.4, 0.15 y 0.82 respectivamente, mientras que a las 209 instituciones restantes se les asigna un

factor de 0.002. El valor de preferencia  $p_{ij}$  que se usa como coeficiente en la función objetivo corresponde al producto del factor de preferencia por la nota promedio del estudiante en séptimo año de EGB,  $n_i$ , es decir,  $p_{ij} = f_{ij}n_i$ . El modelo, al igual que en el problema P1 incluye las restricciones (1) y (2) con la siguiente función objetivo:

$$\max \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J p_{ij} x_{ij} \quad (3)$$

Conscientes de que la asignación anterior no toma en cuenta la movilización de los estudiantes, presentamos una segunda modificación, que llamaremos Caso B, cuya función objetivo combina tanto la movilidad como las preferencias, dando mayor peso a la movilidad. Con esto se pretende aplicar el criterio de movilidad de una forma menos estricta, tomando en consideración la opinión de los estudiantes y de los padres de familia. La nueva modificación considera las restricciones (1) y (2) del modelo P1 con la siguiente función objetivo:

$$\min 0.7 \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J d_{ij} x_{ij} - 0.3 \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J p_{ij} x_{ij} \quad (4)$$

**Solución:** Los modelos de flujo de costo mínimo de los dos primeros escenarios tienen una red asociada con 31754 nodos, que corresponde a la suma de 31542 estudiantes más 212 instituciones, y 6'686.904 arcos, que corresponden a las variables  $x_{ij}$ . Ambos modelos de flujo de costo mínimo se resolvieron usando el solver especializado mcf-1.3, [4] desarrollado en el ZuseInstituteBerlin, ZIB [11], en este solver se encuentra implementado un algoritmo primal-dual del simplex en redes. Para los escenarios 1 y 2, la solución óptima se encuentra en 31 segundos. En los modelos del escenario 3 se hicieron las debidas transformaciones para obtener un modelo de flujo de costo mínimo estándar, y se aplicó el solver mencionado anteriormente.

En el presente trabajo, todos los archivos de entrada fueron generados a través de programas escritos en lenguaje C++ mientras que los resultados finales se obtuvieron tomando los archivos de salida del mcf-1.3 y aplicando programas desarrollados con Microsoft Visual Basic.

## 2.2 Material

Las pruebas experimentales se llevaron a cabo en un computador con sistema operativo Windows 7 Professional, con procesador Intel Core i5-2300 de 2.8 GHz y memoria RAM de 4GB.

## 3. RESULTADOS NUMÉRICOS

En primer lugar, en la tabla 1, se presenta la información de oferta y demanda de cada uno de los distritos del DMQ con la que se construyen los modelos de optimización. No se incluye el Distrito 1 porque pertenece a otro régimen escolar.

**Tabla 1.** Oferta y Demanda educativa por distrito.

Distritos	Demanda	Oferta
D2	2516	2082
D3	3952	3607
D4	4551	3934
D5	4456	5744
D6	7716	7963
D7	3451	1915
D8	2091	1136
D9	2839	2418
<b>TOTAL</b>	<b>31572</b>	<b>28799</b>

A continuación presentamos los resultados de las asignaciones de estudiantes al octavo año de EGB en el DMQ de acuerdo a los diferentes escenarios. Para el escenario uno y para cada distrito, la tabla 2 muestra la cantidad de estudiantes que son asignados a instituciones de su propio distrito, tanto en número como en porcentaje, los que son asignados a un distrito diferente, el total de estudiantes asignados en el distrito y cuántos cupos faltan en ese distrito para poder satisfacer su demanda, esta última cantidad también puede ser vista como el número de estudiantes de un distrito que se queda sin cupo. La tabla 3 presenta la misma información resumida a nivel de circuito.

**Tabla 2.** Asignación con distancias originales por distrito.

Distritos	Estudiantes que permanecen en su distrito		Estudiantes que se movilizan a otros distritos		Estudiantes asignados	Faltante
	Número	%	Número	%		
D2	2082	83%	415	16%	2497	19
D3	3452	87%	385	10%	3837	115
D4	3608	79%	943	21%	4551	0
D5	4456	100%	0	0%	4456	0
D6	7370	96%	326	4%	7696	20
D7	1915	55%	352	10%	2267	1184
D8	1136	54%	0	0%	1136	955
D9	2298	81%	61	2%	2359	480
<b>TOTAL</b>	<b>26317</b>	<b>83%</b>	<b>2482</b>	<b>8%</b>	<b>28799</b>	<b>2773</b>

**Tabla 3.** Asignación con distancias originales por circuito.

Distritos	Estudiantes que permanecen en su circuito		Estudiantes que se movilizan a otros circuitos		Estudiantes asignados	Faltante
D2	1980	95%	517	25%	2497	19
D3	3128	87%	709	20%	3837	115
D4	3318	84%	1233	31%	4551	0
D5	3688	64%	768	13%	4456	0
D6	6567	82%	1129	14%	7696	20
D7	1909	100%	358	19%	2267	1184
D8	1098	97%	38	3%	1136	955
D9	2121	88%	238	10%	2359	480
<b>TOTAL</b>	<b>23809</b>	<b>75%</b>	<b>4990</b>	<b>16%</b>	<b>28799</b>	<b>2773</b>

Para el segundo escenario, en donde se penaliza el hecho de que un estudiante sea asignado a una institución de un distrito diferente al suyo, las tablas 4 y 5 presentan los resultados de la asignación a nivel de distrito y de circuito, respectivamente.

**Tabla 4.** Asignación con distancias penalizadas por distrito.

Distritos	Estudiantes que permanecen en su distrito		Estudiantes que se movilizan a otros distritos		Estudiantes asignados	Faltante
D2	2068	82%	350	14%	2418	98
D3	3454	87%	385	10%	3839	113
D4	3934	86%	617	14%	4551	0
D5	4456	100%	0	0%	4456	0
D6	7550	98%	146	2%	7696	20
D7	1915	55%	413	12%	2328	1123
D8	1136	54%	0	0%	1136	955
D9	2375	84%	0	0%	2375	464
<b>TOTAL</b>	<b>26888</b>	<b>85%</b>	<b>1911</b>	<b>6%</b>	<b>28799</b>	<b>2773</b>

**Tabla 5.** Asignación con distancias penalizadas por circuito.

Distritos	Estudiantes que permanecen en su circuito		Estudiantes que se movilizan a otros circuitos		Estudiantes asignados	Faltante
D2	1966	94%	452	22%	2418	98
D3	3128	87%	711	20%	3839	113
D4	3028	77%	1523	39%	4551	0
D5	3585	62%	871	15%	4456	0
D6	6387	80%	1309	16%	7696	20
D7	1909	100%	419	22%	2328	1123
D8	1098	97%	38	3%	1136	955
D9	2120	88%	255	11%	2375	464
<b>TOTAL</b>	<b>23221</b>	<b>74%</b>	<b>5578</b>	<b>17%</b>	<b>28799</b>	<b>2773</b>

En el tercer escenario, Caso A, donde se maximizan las preferencias de los estudiantes sin consideración alguna sobre su movilización, la asignación resultante a nivel de distrito y de circuito se presenta en las tablas 6 y 7.

**Tabla 6.** Asignación por preferencias y rendimiento académico, por distrito.

Distrito	Demanda	Oferta	Estudiantes que permanecen en su distrito		Estudiantes que se movilizan a otros distritos		Estudiantes asignados
D2	2516	2082	174	7%	2133	85%	2307
D3	3952	3607	469	12%	3133	79%	3602
D4	4551	3934	582	13%	3587	79%	4169
D5	4456	5744	792	18%	3287	74%	4079
D6	7716	7963	1927	25%	5132	67%	7059
D7	3451	1915	184	5%	2944	85%	3128
D8	2091	1136	68	3%	1818	87%	1886
D9	2839	2418	209	7%	2360	83%	2569
<b>TOTAL</b>	<b>31572</b>	<b>28799</b>	<b>4405</b>	<b>13,95%</b>	<b>24394</b>	<b>77,26%</b>	<b>28799</b>

**Tabla 7.** Asignación por preferencias y rendimiento académico, por circuito.

Distrito	Demanda	Oferta	Estudiantes que permanecen en su circuito		Estudiantes que se movilizan a circuitos vecinos		Estudiantes asignados
D2	2516	2082	51	2%	2256	90%	2307
D3	3952	3607	63	2%	3539	90%	3602
D4	4551	3934	129	3%	4040	89%	4169
D5	4456	5744	135	3%	3944	89%	4079
D6	7716	7963	277	4%	6782	88%	7059
D7	3451	1915	36	1%	3092	90%	3128
D8	2091	1136	16	1%	1870	89%	1886
D9	2839	2418	43	2%	2526	89%	2569
<b>TOTAL</b>	<b>31572</b>	<b>28799</b>	<b>750</b>	<b>2%</b>	<b>28049</b>	<b>89%</b>	<b>28799</b>

Además, en la siguiente tabla se muestra la cantidad de estudiantes que fueron asignados a su primera, segunda, tercera o ninguna preferencia, con el modelo del Caso A y con el modelo del escenario 1.

**Tabla 8.** Asignación por preferencias

Escenario 1									
Preferencia 1		Preferencia 2		Preferencia 3		Otras		Total	
437	0.014%	173	0.005%	50	0.01%	30912	98%	31572	100%
Escenario 3. Caso A.									
4200	13%	11322	36%	10773	34%	5277	17%	31572	100%

Las tablas 9 y 10 muestran los resultados obtenidos dentro del mismo escenario 3 pero en el Caso B, considerando simultáneamente criterios de preferencias y movilidad de los estudiantes, a nivel distrital y circuital respectivamente.

**Tabla 9.** Asignación de estudiantes por movilidad y preferencia, por distrito.

Distrito	Demanda	Oferta	Estudiantes que permanecen en su distrito		Estudiantes que se movilizan a otros distritos		Estudiantes asignados
D2	2516	2082	2082	83%	415	16%	2497
D3	3952	3607	3452	87%	385	10%	3837
D4	4551	3934	3701	81%	850	19%	4551
D5	4456	5744	4456	100%	0	0%	4456
D6	7716	7963	7431	96%	265	3%	7696
D7	3451	1915	1915	55%	349	10%	2264
D8	2091	1136	1136	54%	0	0%	1136
D9	2839	2418	2298	81%	64	2%	2362
<b>TOTAL</b>	<b>31572</b>	<b>28799</b>	<b>26471</b>	<b>84%</b>	<b>2328</b>	<b>7%</b>	<b>28799</b>

**Tabla 10.** Asignación de estudiantes por movilidad y preferencia, por circuito.

Distrito	Demanda	Oferta	Estudiantes que permanecen en su circuito		Estudiantes que se movilizan a circuitos vecinos		Estudiantes asignados
D2	2516	2082	1980	79%	517	21%	2497
D3	3952	3607	3154	80%	683	17%	3837
D4	4551	3934	3231	71%	1320	29%	4551
D5	4456	5744	3757	84%	699	16%	4456
D6	7716	7963	6500	84%	1196	16%	7696
D7	3451	1915	1909	55%	355	10%	2264
D8	2091	1136	1098	53%	38	2%	1136
D9	2839	2418	2121	75%	241	8%	2362
<b>TOTAL</b>	<b>31572</b>	<b>28799</b>	<b>23750</b>	<b>75%</b>	<b>5049</b>	<b>16%</b>	<b>28799</b>

Finalmente, en la tabla 11, presentamos el resumen de la satisfacción de las preferencias de los estudiantes con la asignación que se obtiene aplicando el modelo del Caso B.

**Tabla 11.** Asignación por preferencias

Escenario 1									
Preferencia 1		Preferencia 2		Preferencia 3		Otras		Total	
437	0.014%	173	0.005%	50	0.01%	30912	98%	31572	100%
Escenario 3. Caso B.									
2400	8%	1547	5%	964	3%	26661	84%	31572	100%

#### 4. CONCLUSIONES

El principal aporte de este trabajo es proporcionar una herramienta computacional técnica y eficiente a los tomadores de decisiones, para que aplicándose en un futuro próximo evite conflictos resultantes de manejar criterios empíricos para la asignación de estudiantes a instituciones educativas.

Se puede concluir que la movilidad es necesaria para poder satisfacer la demanda de cupos, aún si ésta es penalizada. Esto se refleja en el hecho de que el porcentaje de estudiantes que permanece en su distrito aumenta solamente del 83% en el escenario 1 al 85% en el escenario 2, con el efecto de que

la movilidad entre circuitos aumenta ligeramente del 16 al 17%. Se puede observar que no se logrará una mejora radical en cuanto no se aumente la oferta en determinados circuitos. Desde el punto de vista práctico, destacamos que la asignación óptima se calcula en 31 segundos, esto aumenta considerablemente su valor pues, con los procedimientos actuales, la asignación de cupos tarda varias semanas en calcularse.

Al maximizar la preferencia de los estudiantes de acuerdo a su rendimiento académico, se encuentra que la movilidad es muy alta tanto a nivel de distrito como de circuito, 79 y 89 % respectivamente, esto es coherente con la realidad pues, en general, los estudiantes no ven como algo negativo el movilizarse largas distancias a cambio de estudiar en la

institución de su preferencia. Con este modelo la resistencia social sería baja, dado que un 83% de estudiantes son asignados a alguna de sus preferencias.

Si se trata de equilibrar los criterios de asignación, combinando los criterios de minimizar la movilidad total y de satisfacer las preferencias de los estudiantes, se puede observar que únicamente se movilizan entre distritos un 7% de estudiantes y entre circuitos un 16%, pero la resistencia social podría seguir presente debido a que el 84% de estudiantes serían asignados a un plantel por el cual no manifestó ninguna afinidad. Sin embargo, esta resistencia es menor en comparación al modelo sin preferencias, en el que se obtiene una resistencia del 98%. Podemos concluir, que encontrar un equilibrio puede ser muy difícil siendo necesario calibrar adecuadamente las ponderaciones de acuerdo a datos reales.

Para los modelos propuestos y los diferentes escenarios analizados, los datos de entrada son la oferta, la demanda y las distancias entre los estudiantes y los respectivos centros educativos, al igual que la preferencia de los estudiantes hacia ciertos centros educativos y su nota promedio del año inmediatamente anterior. Sin embargo, dicha información no existe de manera fidedigna para todos los distritos. Cada uno de los procedimientos utilizados para la estimación de tal información podría causar que los resultados no sean precisos. Por tanto, el trabajo que pueda dedicarse a su obtención se reflejaría directa y positivamente en una asignación más cercana a la realidad.

#### REFERENCIAS

- [1] Belford, P.C y Ratliff, H.D. (1972). A network flow model for racially balancing schools. *Operations Research* 20(3), 619-628.
- [2] Elizondo R. (1993). Solving very large scale school/student assignment problems. Technical Report TR93-48. Rice University, revisado en <http://www.caam.rice.edu/caam/trs/93/TR93-48.pdf>.
- [3] Gac, I., Martínez, F. y Weintraub, A. (2009). A deterministic linear optimization model for allocating schools to zones. *Journal of the Operational Research Society*, 60, 895-905.
- [4] Loebel, A. (2000). Mcf 1.3.A network simplex implementation. Zuse Institute Berlin. Revisado en [http://typo.zib.de/opt-long\\_projects/Software/Mcf/](http://typo.zib.de/opt-long_projects/Software/Mcf/).
- [5] McKeown, P. y Workman, B. (1976). A study in using linear programming to assign students to schools. *Interfaces*, 6(14), 96-101.
- [6] Ministerio de Educación del Ecuador, <http://educacion.gob.ec/reorganizacion-territorial/>. Recuperado el 30 de mayo de 2013.
- [7] Pizzolato, N.D. y Fraga da Silva, H. B (1997). The location of public schools: Evaluation of practical experiences. *International Transactions in Operations Research*, 4(1), 13-22.
- [8] Pizzolato, N.D., Broseghini, F. y Nogueira, L. (2004). School location methodology in urban areas of developing countries. *International Transactions in Operations Research*, 11(6), 667-681.
- [9] Subsecretaría de Educación del Distrito Metropolitano de Quito, comunicación personal.
- [10] <http://www.esri.com/software/arcgis/arcgis10>. Recuperado el 30 de mayo de 2013.
- [11] <http://www.zib.de>. Recuperado el 30 de mayo de 2013.



# Existence and Uniqueness of Global Mild Solutions for Nonlocal Cauchy Systems in Banach Spaces.

Yangari M.\*

\*Escuela Politécnica Nacional, Departamento de Matemática, Ladrón de Guevara E11-253, Quito, Ecuador

e-mail: miguel.yangari@epn.edu.ec

**Resumen:** El objetivo de este artículo es estudiar la existencia y unicidad de soluciones de sistemas no-locales cuando los términos de difusión están dados por un generador infinitesimal de operadores fuertemente continuos de operadores lineales acotados.

**Palabras claves:** Sistemas no-lineales, generador infinitesimal, operadores fuertemente continuos, soluciones débiles.

**Abstract:** The aim of this paper is to study the existence and uniqueness of solutions to nonlocal systems when the diffusion terms are given by infinitesimal generators of strongly continuous semigroups of bounded linear operators.

**Keywords:** Nonlinear system, infinitesimal operator, strongly continuous semigroup, mild solution.

## 1. INTRODUCTION

In this paper we discuss the existence and uniqueness of solutions  $u = (u_i)_{i=1}^m$  with  $m \in \mathbb{N}^*$ , to the nonlocal system:

$$\begin{cases} \partial_t u + Au = F(t, u), & \forall t \in (0, \infty) \\ u(0) = u_0, \end{cases} \quad (1)$$

where  $A = \text{diag}(A_1, \dots, A_m)$  with  $A_i$  the infinitesimal generator of a strongly continuous semigroup of bounded linear operators  $T_{t,i}$  in the Banach space  $X$  for all  $i \in \llbracket 1, m \rrbracket := \{1, \dots, m\}$ ,  $u_0 \in X^m$  and  $F : [0, \infty) \times X^m \rightarrow X^m$  a given valued function, where  $X^m$  is the Banach product space dotted with the norm  $\|u\|_{X^m} = \sum_{i=1}^m \|u_i\|_X$ .

The above nonlocal problem (1) with  $m = 1$  has been studied extensively. Byszewski and Lasmikantem [3], [4], [6] give the existence and uniqueness of mild solutions when  $F$  satisfies locally Lipschitz-type conditions. Cabré and Roquejoffre in [7] state the existence of global classical solutions when the reaction term satisfies globally Lipschitz conditions. In [9] Lin and Liu discuss the semi-linear integro-differential equations under Lipschitz-type conditions. Ntougas and Tsamatos [10], [11] study the case of compactness conditions on  $T_t$ . Byszewski and Ak-

ca [5] give the existence of functional-differential equation when  $T_t$  is compact. Benchohra and Ntouyas [2] discuss the second order differential equations with nonlocal conditions under compact conditions. In [8] Fu and Ezzinbi study the neutral functional differential equations with nonlocal initial conditions. Aizicovici and McKibben [1] give the existence of integral solutions of nonlinear differential inclusions with nonlocal conditions.

The work on the single equation can be extended to the system (1), thus, as general assumptions, the reaction term  $F = (f_i)_{i=1}^m$  satisfies for all  $i \in \llbracket 1, m \rrbracket$ :

$$\begin{aligned} f_i &\in C^1([0, +\infty) \times X^m; X), \\ f_i(t, \cdot) &\text{ is globally Lipschitz in } X^m \text{ uniformly in } t \geq 0, \end{aligned} \quad (2)$$

Our main result states the existence and uniqueness of mild solutions, where, by a mild solution of the nonlocal system (1) we mean the function  $u \in C([0, \infty), X)^m$  which satisfies

$$u(t) = T_t u_0 + \int_0^t T_{t-s} F(s, u(s)) ds \quad (3)$$

where  $T_t = \text{diag}(T_{t,1}, \dots, T_{t,m})$ .

**Theorem 1.1** *Let  $X$  be a Banach space,  $F$  satisfies (2) and the initial condition  $u_0$  belongs to  $X^m$ . Then, the system (1) has a unique mild solution  $u \in C([0, \infty), X)^m$ .*

Submitted 2 December 2014; Accepted February 2015. The research leading to these results has received funding from Proyecto Semilla PIS 14-10 of Escuela Politécnica Nacional.

As a corollary of this theorem, we see that the unique mild solution can be obtained by an iterative process.

**Corollary 1.1** *The mild solution  $u$  of (1) can be obtained as the limit in the  $C([0, \infty), X)^m$ -norm of the sequence  $(u^n)_{n \in \mathbb{N}}$ , where:*

$$u^{n+1}(t) = T_t u_0 + \int_0^t T_{t-s} F(s, u^n(s)) ds$$

with  $u^0(t) = T_t u_0$ .

Finally, to state the following result of existence, we assume a perturbation of the nonlinear term. Hence:

**Lemma 1.1** *If  $u$  is the mild solution of the system (1) with  $u_0 \in X^m$ ,  $F$  satisfies (2) for all  $i \in \llbracket 1, m \rrbracket$ . Then, for any  $l \in \mathbb{R}$ ,  $\tilde{u}(t) = e^{lt} u(t)$  is the mild solution of the system (1) with  $u_0 \in X^m$  and  $F(t, u)$  replaced by  $\tilde{F}(t, \tilde{u}) = l\tilde{u} + e^{lt} F(t, e^{-lt} \tilde{u})$ .*

## 2. THE SEMIGROUP AND ITS GENERATOR

Taking  $i \in \llbracket 1, m \rrbracket$  fixed throughout this short section, we remember that a family  $T_{t,i}$  with  $0 \leq t < \infty$  of bounded linear operators from  $X$  into  $X$  is a semigroup on the Banach space  $X$  if

- i)  $T_{0,i} = I$ , where  $I$  is the identity operator on  $X$ .
- ii)  $T_{t+s,i} = T_{t,i} T_{s,i}$  for every  $t, s \geq 0$

A semigroup of bounded linear operators,  $T_{t,i}$ , is uniformly continuous if

$$\lim_{t \downarrow 0} \|T_{t,i} - I\| = 0$$

The linear operator  $A_i$  defined by

$$D(A_i) = \left\{ x \in X : \lim_{t \downarrow 0} \frac{T_{t,i} x - x}{t} \text{ exists} \right\}$$

and

$$-A_i x = \lim_{t \downarrow 0} \frac{T_{t,i} x - x}{t} = \frac{dT_{t,i} x}{dt} \Big|_{t=0} \quad \text{for } x \in D(A_i)$$

is the infinitesimal generator of the semigroup  $T_{t,i}$ ,  $D(A_i)$  is the domain of  $-A_i$ . From the above discussion it is clear, if  $T_{t,i}$  is a uniformly continuous semigroup of bounded linear operators, then

$$\lim_{s \downarrow t} \|T_{s,i} - T_{t,i}\| = 0$$

Moreover, a semigroup  $T_{t,i}$  with  $0 \leq t < \infty$ , of bounded linear operators on  $X$  is a strongly continuous semigroup if

$$\lim_{t \downarrow 0} T_{t,i} x = x, \quad \text{for every } x \in X$$

Next, a useful fact for future purposes. If  $T_{t,i}$  is a strongly continuous semigroup, then there exist constants  $M_i \geq 1$  and  $\omega_i \geq 0$  such that

$$\|T_{t,i}\| \leq M_i e^{\omega_i t} \quad \text{for } 0 \leq t < \infty$$

## 3. MAIN RESULTS

**Proof of Theorem 1.1.** Given any  $T > 0$ , we are interested in the nonlinear problem

$$\begin{cases} \partial_t u + Au &= F(t, u), \quad \text{in } (0, T) \\ u(0) &= u_0, \end{cases} \quad (1)$$

where  $A = \text{diag}(A_1, \dots, A_m)$ ,  $u = (u_i)_{i=1}^m$  and  $u_0 \in X^m$ . We define the map

$$N_{u_0}(u)(t) := T_t u_0 + \int_0^t T_{t-s} F(s, u(s)) ds \quad (2)$$

here  $T_t = \text{diag}(T_{t,1}, \dots, T_{t,m})$ .

Let us prove, if  $u \in C([0, T]; X)^m$  then  $N_{u_0}(u) \in C([0, T]; X)^m$ , i.e.,  $N_{u_0} : C([0, T]; X)^m \rightarrow C([0, T]; X)^m$ , indeed, since  $u \in C([0, T]; X)^m$ , then  $u \in C([0, T]; X^m)$  and since  $F_i \in C([0, +\infty) \times X^m; X)$ , we have that  $F_i(\cdot, u) \in C([0, +\infty); X)$ . Now, since  $u_0 \in X$  and  $T > 0$ , it is easy to see that  $N_{u_0,i}(u) \in C([0, T]; X)$ .

Furthermore, we claim that  $N_{u_0}$  is Lipschitz in  $C([0, T]; X)^m$ . Indeed, let  $u, v \in C([0, T]; X)^m$ , so

$$\begin{aligned} & \|N_{u_0,i}(u)(t) - N_{u_0,i}(v)(t)\|_X \\ & \leq \int_0^t \|T_{t-s,i}(F_i(u(s)) - F_i(v(s)))\|_X ds \\ & \leq \int_0^t \|T_{t-s,i}\| \|F_i(u(s)) - F_i(v(s))\|_X ds \\ & \leq \overline{MLip}_u(F_i) \int_0^t \|u(s) - v(s)\|_{X^m} ds \\ & = \overline{MLip}_u(F_i) \int_0^t \sum_{j=1}^m \|u_j(s) - v_j(s)\|_X ds \\ & \leq t \overline{MLip}_u(F_i) \|u - v\|_{C([0,T]; X)^m} \end{aligned}$$

where  $\overline{M} = \sup_{t \in [0, T], i \in \llbracket 1, m \rrbracket} \|T_{t,i}\|$ , we recall that for any strongly continuous semigroup, we have that  $\|T_{t,i}\| \leq C e^{\omega_i t}$  for some constants  $C$  and  $\omega_i$ . So, from the above computations, taking the supremum in  $[0, T]$  and adding in  $i \in \llbracket 1, m \rrbracket$ , we have that

$$\begin{aligned} & \|N_{u_0}(u) - N_{u_0}(v)\|_{C([0,T]; X)^m} \\ & \leq T \overline{M} \left[ \sum_{i=1}^m Lip_u(F_i) \right] \|u - v\|_{C([0,T]; X)^m} \end{aligned}$$

thus  $N_{u_0}$  is Lipschitz with constant  $\overline{MT} [\sum_{i=1}^m Lip_u(F_i)]$ . Now, it follows by induction that  $(N_{u_0})^k$  is Lipschitz in  $C([0, T]; X)^m$  with Lipschitz constant  $\{\overline{MT} [\sum_{i=1}^m Lip_u(F_i)]\}^k/k!$ , where  $k$  is any positive integer. This constant is less than 1 if we take  $k$  large enough. Then, we conclude that  $N_{u_0}$  has a unique fixed point and therefore, there exists a unique solution  $u$  that satisfies  $u = N_{u_0}(u)$  for every  $T > 0$ . Given  $0 < T < T'$ , the mild solution in  $(0, T')$  must coincide in  $(0, T)$  with the mild solution in this interval, by uniqueness. Thus, under assumption (2), the mild solution of (1) extends uniquely to all  $t \in [0, +\infty)$ , i.e., it is global in time.

**Proof of Corolario 1.1.** Let define the sequence  $(u^i)_{i \in \mathbb{N}}$  given by

$$u^i = M^i(u_0) = M(M^{i-1}(u_0))$$

where  $M = N_{u_0}^m$  with  $m \in \mathbb{N}$  such that the Lipschitz constant founded in Theorem 1.1 satisfies

$$\alpha := \left\{ \overline{MT} \left[ \sum_{i=1}^m Lip_u(G_i) \right] \right\}^m / m! < 1$$

In what follows all the norms will be in  $C([0, T]; X)^m$ . Now, we claim that  $(M^i)$  is a Cauchy sequence, indeed, given  $\varepsilon > 0$ , we need to find  $\Lambda > 0$  such that

$$\|M^n(u_0) - M^k(u_0)\| < \varepsilon, \quad \forall n, k \geq \Lambda$$

Hence,

$$\begin{aligned} & \|M^n(u_0) - M^k(u_0)\| \\ & \leq \alpha^k \|M^{n-k}(u_0) - u_0\| \\ & \leq \alpha^k (\|M^{n-k}(u_0) - M^{n-k-1}(u_0)\| + \dots \\ & \qquad \qquad \qquad \dots + \|M(u_0) - u_0\|) \\ & \leq \alpha^k (\alpha^{n-k-1} \|M(u_0) - u_0\| + \dots + \|M(u_0) - u_0\|) \\ & = \alpha^k \frac{1 - \alpha^{n-k}}{1 - \alpha} \|M(u_0) - u_0\| \\ & \leq \frac{\alpha^k}{1 - \alpha} \|M(u_0) - u_0\| < \varepsilon \end{aligned}$$

if  $n \geq k \geq \Lambda$  with  $\Lambda > 0$  large enough. Thus, we have that  $(M^i)_{i \in \mathbb{N}}$  is a Cauchy sequence in the Banach space  $C([0, T]; X)^m$ , therefore, there exists  $u \in C([0, T]; X)^m$  such that

$$u = \lim_{i \rightarrow \infty} M^i(u_0), \quad \text{as } i \rightarrow +\infty \tag{3}$$

Now, we prove that  $u$  founded above also satisfies

$$u = \lim_{j \rightarrow \infty} N_{u_0}^j(u_0), \quad \text{as } j \rightarrow +\infty \tag{4}$$

To do this, we note that the limit  $u$  in (3) does not depend of the initial condition, i.e., for any  $w \in C([0, T]; X)^m$  we have  $M^i(w) \rightarrow u$ , indeed,

$$\begin{aligned} \|M^i(w) - u\| & \leq \|M^i(w) - M^i(u_0)\| + \|M^i(u_0) - u\| \\ & \leq \alpha^i \|w - u_0\| + \|M^i(u_0) - u\| \rightarrow 0 \end{aligned}$$

since  $\alpha < 1$  and by (3). Now, in order to prove (4), we note that for all  $j \in \mathbb{N}$ , it is possible to find  $k \in [0, m[$  such that  $j = k + mi$  for some  $i \in \mathbb{N}$ , hence

$$\begin{aligned} \|N_{u_0}^j(u_0) - u\| & = \|N_{u_0}^{k+mi}(u_0) - u\| \\ & = \|N_{u_0}^{mi}(N_{u_0}^k(u_0)) - u\| \\ & = \|M^i(N_{u_0}^k(u_0)) - u\| \\ & = \|M^i(w) - u\| \rightarrow 0 \end{aligned}$$

with  $w = N_{u_0}^k(u_0) \in C([0, T]; X)^m$ , as  $j \rightarrow +\infty$ . To conclude the proof, we claim that  $u$  is the unique mild solution stated in Theorem 1.1, for which, by uniqueness, we only need to verify that  $u = N_{u_0}(u)$ , indeed,

$$\begin{aligned} \|N_{u_0}(u) - u\| & = \|N_{u_0}(u) - N_{u_0}(N_{u_0}^{i-1}(u_0))\| + \|N_{u_0}^i(u_0) - u\| \\ & \leq \overline{MT} \left[ \sum_{i=1}^m Lip_u(G_i) \right] \|u - N_{u_0}^{i-1}(u_0)\| \\ & \qquad \qquad \qquad + \|N_{u_0}^i(u_0) - u\| \rightarrow 0 \end{aligned}$$

by (4), as  $i \rightarrow +\infty$ .

**Proof of Lemma 1.1.** Since  $u$  satisfies (3), we have for all  $i \in [1, m]$

$$u_i(s) = T_{s,i}u_{0,i} + \int_0^s T_{s-\tau,i}f_i(\tau, u(\tau))d\tau$$

Hence, for all  $s \in [0, t]$

$$T_{t-s,i}u_i(s) = T_{t,i}u_{0,i} + \int_0^s T_{t-\tau,i}f_i(\tau, u(\tau))d\tau$$

We now multiply by  $le^{ls}$  and using integration by parts on  $s$ ,

$$\begin{aligned} \int_0^t le^{ls}T_{t-s,i}u_i(s)ds & = \int_0^t le^{ls}T_{t,i}u_{0,i}ds \\ & \qquad \qquad \qquad + \int_0^t le^{ls} \int_0^s T_{t-\tau,i}f_i(\tau, u(\tau))d\tau ds \\ & = (e^{lt} - 1)T_{t,i}u_{0,i} + e^{lt} \int_0^t T_{t-\tau,i}f_i(\tau, u(\tau))d\tau \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - \int_0^t e^{ls} T_{t-s,i} f_i(s, u(s)) ds \\
= & e^{lt} u_i(t) - T_{t,i} u_{0,i} \\
& - \int_0^t e^{ls} T_{t-s,i} f_i(s, u(s)) ds
\end{aligned}$$

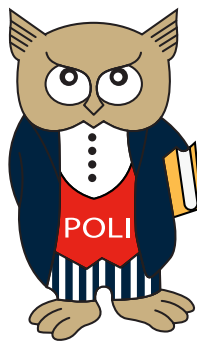
- [11] S. Ntouyas and P. Tsamotas. Global existence for semilinear integrodifferential equations with delay and nonlocal conditions, *Anal. Appl.* 64, 1997, pp. 99-105.

hence taking  $\tilde{u}(t) = e^{lt} u(t)$ , we have

$$\tilde{u}(t) = T_{t,i} u_{0,i} + \int_0^t T_{t-s,i} [l\tilde{u}(s) + e^{ls} f_i(s, e^{-ls} \tilde{u}(s))] ds$$

#### REFERENCES

- [1] S. Aizicovici and M. McKibben. Existence results for a class of abstract nonlocal Cauchy problems, *Nonlinear Analysis* 39, 2000, pp. 649-668.
- [2] M. Benchohra and S. Ntouyas. Nonlocal Cauchy problems for neutral functional differential and integrodifferential inclusions in Banach spaces, *J. Math. Anal. Appl.* 258, 2001, pp. 573-590.
- [3] L. Byszewski. Theorems about the existence and uniqueness of solutions of a semilinear evolution nonlocal Cauchy problem, *J. Math. Anal. Appl.* 162, 1991, pp. 494-505.
- [4] L. Byszewski. Existence and uniqueness of solutions of semilinear evolution nonlocal Cauchy problem, *Zesz. Nauk. Pol. Rzes. Mat. Fiz.* 18, 1993, pp. 109-112.
- [5] L. Byszewski and H. Akca. Existence of solutions of a semilinear functional-differential evolution nonlocal problem, *Nonlinear Analysis* 34, 1998, pp. 65-72.
- [6] L. Byszewski and V. Lakshmikantham. Theorem about the existence and uniqueness of a solutions of a nonlocal Cauchy problem in a Banach space, *Appl. Anal.* 40, 1990, pp. 11-19.
- [7] X. Cabré and J. Roquejoffre. The influence of fractional diffusion in Fisher-KPP equation. *Commun. Math. Phys.* 320, 2013, pp. 679-722.
- [8] X. Fu and K. Ezzinbi. Existence of solutions for neutral functional differential evolution equations with nonlocal conditions, *Nonlinear Analysis* 54, 2003, pp. 215-227.
- [9] Y. Lin and J. Liu. Semilinear integrodifferential equations with nonlocal Cauchy Problems, *Nonlinear Analysis* 26, 1996, pp. 1023-1033.
- [10] S. Ntouyas and P. Tsamotas. Global existence for semilinear evolution equations with nonlocal conditions, *J. Math. Anal. Appl.* 210, 1997, pp. 679-687.



[www.revistapolitecnica.epn.edu.ec](http://www.revistapolitecnica.epn.edu.ec)

[www.epn.edu.ec](http://www.epn.edu.ec)

---



[www.revistapolitecnica.epn.edu.ec](http://www.revistapolitecnica.epn.edu.ec)

[www.epn.edu.ec](http://www.epn.edu.ec)