

ISSN: 1390-0129

# Revista Politécnica



ESCUELA  
POLITÉCNICA  
NACIONAL

Volumen 35 No 1 Febrero 2015

ISSN: 1390-0129

# Revista Politécnica



Volumen 35 No 1 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

## **PRESENTACIÓN VOLUMEN 35**

Con ocasión de la presentación de la Revista Politécnica No. Vol. 35, considero importante realizar una breve reflexión, sobre la actividad científica en la Escuela Politécnica Nacional y su medio oficial de difusión, LA REVISTA POLITÉCNICA.

Identificamos la actividad científica como un sistema estructurado en el que concurren los esfuerzos personales del investigador y los compromisos y apoyos institucionales. Desde el plano institucional la caracterizamos, como una tradición y costumbre permanentes en la búsqueda del saber, mediante procesos serios y sistematizados de producción de conocimientos; y desde el plano personal como un modo de ser que mezcla razón, intuición y emoción, ilusión y pasión por pensar, hacer y descubrir, lo que implica un estilo de vida del investigador.

La Revista Politécnica fue creada en los años setenta, con el propósito de que sea uno de los registros públicos de la actividad científica, que los profesores, investigadores y estudiantes realizan; y para evidenciar la fortaleza científica de la Institución. Es así que se convierte en una importante fuente de divulgación de los resultados de la investigación científica en la Politécnica Nacional, y por lo tanto en una publicación original y primaria.

Al avanzar la producción científica mundial se organizan los procesos de comunicación, alrededor de publicaciones con periodicidad establecida, que cumplen un calendario previsto, que cuentan con un comité editorial y con equipos de revisores externos, que califican la calidad de las propuestas de artículos originales y además que están indexadas en alguna de las bases de datos que definen a un medio como científico y por lo tanto, respaldan la seriedad del mismo. Ante esta realidad, la REVISTA POLITÉCNICA busca cumplir con los requisitos exigidos, para convertirse en un medio académico idóneo y solvente para la difusión de la productividad en el ámbito del conocimiento científico, que la comunidad nacional e internacional reconocen en la ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL.

Para la Institución es un gran orgullo poner en consideración de la comunidad científica, los artículos del presente volumen, que contiene la información de los experimentos y trabajos realizados, para que otros investigadores evalúen los procesos desarrollados y puedan continuar, mejorar y avanzar en el largo camino que la investigación científica implica. Solo así nuestros investigadores lograrán enriquecer el conocimiento científico-tecnológico del país

**ING. JAIME CALDERÓN SEGOVIA**  
**RECTOR**

## PRESENTACIÓN VOLUMEN 35

La investigación es la actividad fundamental de la *academia*, que consiste en generar nuevo conocimiento. Puede clasificarse en investigación básica o investigación aplicada. La primera, es generalmente desarrollada por investigadores formados en las carreras puras, como: Física, Matemática, Química y Biología. Su objetivo fundamental es conocer los engranajes internos de la gran maquinaria del universo, y mediante un adecuado proceso científico, encontrar los primeros principios y las leyes que lo rigen, que desembocará en el desarrollo de modelos y teorías científicas, que al pasar por la aprobación de la experimentación, terminan siendo aceptadas por la comunidad científica internacional.

En este sentido, la investigación básica, no busca, por sí mismo, hallar aplicaciones para beneficio de la sociedad, sino más bien, dar consistencia al orden que se manifiesta en el universo, y que al plasmarlo en ecuaciones matemáticas que lo describen con bastante precisión, en una visión quizás limitada y no real pero incluyente de los fenómenos observados a la fecha, produce en el investigador un éxtasis indescriptible, comparable a los sentimientos intensos que experimenta el poeta cuando termina de crear una poesía, o el músico al crear una obra musical. No importa si eso va a dar o no réditos económicos. Es el placer de investigar que mencionaba Richard Feynmann, premio nobel de Física.

La segunda forma de investigación, la investigación aplicada, es desarrollada generalmente por los ingenieros, quienes utilizan el conocimiento obtenido de la investigación básica para generar un producto, un desarrollo tecnológico, cuyo impacto en el sector productivo y en el sector social del país puede ser de gran trascendencia. Con un adecuado conocimiento de las necesidades de nuestra sociedad y con el suficiente número de investigadores en las diferentes áreas técnicas de las ingenierías y la infraestructura necesaria de equipamiento y el financiamiento, nuestra EPN puede ir generando una historia de desarrollo tecnológico, que permita cambiar la matriz productiva y generar riqueza, dando valor agregado a nuestra materia prima y al conocimiento adquirido.

La expresión de todo este quehacer científico-tecnológico se puede visibilizar, en una de sus formas, mediante las publicaciones, como el poeta mediante sus poesías, o el cantor mediante sus canciones. Es así, que esta edición 35 de la Revista Politécnica contribuye una vez más, a sacar a la luz, lo que mejor sabe hacer nuestra querida institución, y lo que constituye su esencia, investigar...y con mucho placer

**DR. ALBERTO CELI APOLO**  
**VICERRECTOR DE INVESTIGACIÓN Y PROYECCIÓN SOCIAL**

## **PALABRAS DEL EDITOR**

La Revista Politécnica inició en el año 1961 y, lleva hasta la fecha 35 volúmenes presentados, aportando con más artículos científicos al sistema de investigación del Ecuador y de Latinoamérica. Esta historia la convierte en un hito y un emblema dentro de las publicaciones científicas dentro del país. La revista ha experimentado profundos cambios desde su creación, siempre evolucionando y acoplándose a las nuevas tecnologías.

La nueva etapa que estamos viviendo en el sistema educativo universitario del país, nos impulsa a aprovechar el potencial del personal académico que conforman las universidades y escuelas politécnicas para fomentar la cultura de escribir para evidenciar todas las investigaciones, proyectos, y trabajos que el Ecuador y toda la comunidad científica internacional desarrolla.

La Revista Politécnica es una publicación semestral, se acepta trabajos en español e inglés. Se encuentra en el Catálogo de Latindex, sin embargo se han venido realizando esfuerzos sostenidos para aplicar a nuevos índices. Este proceso tomará un largo tiempo e implicará muchas actividades dinámicas así como un cambio de cultura, pero ya se han empezado a consolidar varios de los puntos necesarios para este objetivo tales como el fortalecimiento del Sistema de Gestión de la Revista Politécnica (SIGREP), así como también la renovación de un Consejo Editorial con investigadores de renombre internacional.

Es muy importante señalar que el crecimiento de la Revista Politécnica no es solo una tarea del Consejo Editorial y del Editor, sino de toda la Comunidad Científica de la EPN así como de sus autoridades que confían en nuestra revista.

Estamos seguros que con el aporte de todos, conseguiremos incrementar el prestigio que actualmente tiene y, constituir a la Revista Politécnica en una publicación de referencia a nivel internacional.

**DR. ING. DANILO CHÁVEZ, Ms  
EDITOR**

# Estudio y Simulación del Efecto No Lineal Automodulación de Fase en Fibras Ópticas Monomodo

Carrera A. \*; Jiménez M.S.\*\*

\*Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones  
Quito, Ecuador (Tel: 593-9-6878281; e-mail: charles.carrera@hotmail.com)

\*\*Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones  
Quito, Ecuador (Tel: 593-2-2507144 ext. 2335; e-mail: maria.jimenez@epn.edu.ec)

**Resumen:** Dado los beneficios que ofrece la transmisión por fibra óptica monomodo (largas distancias y altas velocidades de transmisión), es necesario realizar estudios minuciosos sobre los fenómenos que se producen en esta fibra óptica durante la transmisión de la información y que afectan la calidad de la misma. En este trabajo se estudia el efecto no lineal de "Automodulación de Fase" desde una perspectiva teórica y mediante simulación. Este efecto depende de varios factores como son: la potencia de transmisión, el parámetro no lineal, el área efectiva de la fibra óptica, la longitud del enlace de fibra y la longitud efectiva de la fibra óptica; este estudio se lo realiza para diferentes tipos de fibra óptica monomodo: SSMF (Standard Single Mode Fiber), DSF (Dispersion Shifted Fiber) y NZ-DSF (Non Zero Dispersion Shifted Fiber).

**Palabras clave:** Automodulación de Fase, Fenómenos no Lineales, Longitud no Lineal, Longitud Efectiva, Potencia Óptica, Área Efectiva.

**Abstract:** Due to the benefits that the transmission by a single mode optical fiber (long distances and high speeds of transmission) offers, it is necessary to carry out through research about the phenomena that occurs in such optical fiber during the information transmission that affect its quality. The nonlinear effect of "Self-Phase Modulation" is studied. This effect depends on several parameters such as: The optical transmission power, the nonlinear parameter, the effective area of the fiber, the length of the optical fiber and its effective length. This study is carried out for different types of single mode optical fiber: SSMF (Standard Single Mode Fiber), DSF (Dispersion Shifted Fiber) and NZ.DSF (Non Zero Dispersion Shifted Fiber).

**Keywords:** Self-Phase Modulation, Nonlinear Phenomena, Nonlinear Length, Effective Length, Optical Power, Effective Area.

## 1. INTRODUCCIÓN

El efecto no lineal Automodulación de fase (SPM, *Self-Phase Modulation*) se presenta en la transmisión por fibra óptica monomodo por la presencia de una componente no lineal en el índice de refracción, así como por la dependencia que ésta tiene con la intensidad de los pulsos transmitidos, haciendo que los pulsos que se propagan por una fibra óptica debido a este fenómeno se ensanchen.

## 2. DISPERSIÓN CROMÁTICA

Una de las causas de dispersión cromática en una fibra óptica se debe a que diferentes componentes espectrales asociadas a un pulso viajan con diferentes velocidades.

En los sistemas de comunicaciones el efecto de la dispersión cromática es perjudicial puesto que produce ensanchamiento en los pulsos, lo que a la postre genera interferencia entre los pulsos ópticos transmitidos.

Matemáticamente los efectos de la dispersión cromática se los puede explicar mediante la constante de propagación  $\beta$  utilizando la serie de Taylor sobre la frecuencia central del pulso: [6]

$$\beta(\omega) = n(\omega) \frac{\omega}{c} = \beta_0 + \beta_1(\omega - \omega_0) + \frac{1}{2} \beta_2(\omega - \omega_0)^2 + \dots \quad (1)$$

Los parámetros  $\beta_1$  y  $\beta_2$  están relacionados al índice de refracción y sus derivadas a través de las siguientes ecuaciones: [5] [6]

$$\beta_1 = \frac{1}{v_g} = \frac{n_g}{c} = \frac{1}{c} \left( n + \omega \frac{dn}{d\omega} \right) \quad (2)$$

$$\beta_2 = \frac{1}{c} \left( 2 \frac{dn}{d\omega} + \omega \frac{d^2n}{d\omega^2} \right) \quad (3)$$

$n$ : Índice de refracción de grupo

$v_g$ : Velocidad de grupo

La envolvente del pulso óptico se mueve a la velocidad de grupo, mientras que el parámetro  $\beta_2$  representa la dispersión de la velocidad de grupo y es el responsable del ensanchamiento del pulso, este fenómeno se conoce como



### Dispersión de Velocidad de Grupo GVD (Group Velocity Dispersion).

Cuando la transmisión se realiza cerca de la longitud de onda de corte aparece un nuevo término denominado coeficiente de dispersión de tercer orden,  $TOD$  (Third Order Dispersion), y se lo representa con el parámetro  $\beta_3$ . Para incluir este parámetro dentro del análisis de SPM se debe tener en cuenta que la transmisión se la debe realizar a pocos nanómetros de separación de la longitud de onda de corte (aproximadamente 10nm).

### 3. AUTOMODULACIÓN DE FASE (SPM)

El origen de los efectos no lineales [7] está en la dependencia del índice de refracción del núcleo de la fibra óptica con la intensidad de los pulsos transmitidos. Este efecto se conoce como efecto Kerr Óptico, el que establece que el índice de refracción obedece la ecuación: [1] [3] [4]

$$n(I, \omega) = n_0 + n_2 I \quad (4)$$

Donde:

- $\omega$ : Frecuencia central del pulso transmitido
- $n_0$ : Índice de refracción lineal
- $n_2$ : Índice de refracción no lineal
- $I$ : Intensidad de los pulsos transmitidos

Como consecuencia del efecto Kerr óptico, un pulso con potencia  $P(t)$  que se propaga a través de una fibra óptica de longitud  $L$  ensancha su espectro una cantidad  $\Delta\omega$  dada por la siguiente expresión matemática: [5] [10]

$$\Delta\omega = \gamma L \frac{dP(t)}{dt} \quad (5)$$

Donde  $\gamma$  es el llamado "coeficiente no lineal" expresado de la siguiente manera: [5] [10]

$$\gamma = \frac{n_2 \cdot \omega_0}{A_{eff} \cdot c} \quad (6)$$

En la ecuación (6) se observa que la no linealidad de la fibra óptica depende de la frecuencia con la que se transmiten los pulsos, del área efectiva  $A_{eff}$  (parámetro que varía según cada tipo de fibra óptica monomodo) y del índice de refracción no lineal (en fibras típicas utilizadas en sistemas de comunicaciones el valor del parámetro no lineal suele estar entre 1,2 y 2 (W Km)<sup>-1</sup>). [7]

De acuerdo a (6), el área efectiva es un factor determinante para incrementar o disminuir la no linealidad de la fibra óptica; mientras mayor es el área efectiva de la fibra óptica, menor serán los efectos de SPM. La fibra óptica monomodo SSMF (Standard Single Mode Fiber) es la que mejor respuesta presenta ante SPM puesto que tiene mayor área efectiva, aunque hoy en día existen fibras ópticas monomodo NZ-DSF (Non Zero Dispersion Shifted Fiber) de gran área efectiva que tienen valores elevados en dicho parámetro.

En la Fig. 1 se puede observar los valores típicos de área efectiva en fibras ópticas monomodo DSF (Dispersion Shifted Fiber) y NZ-DSF:

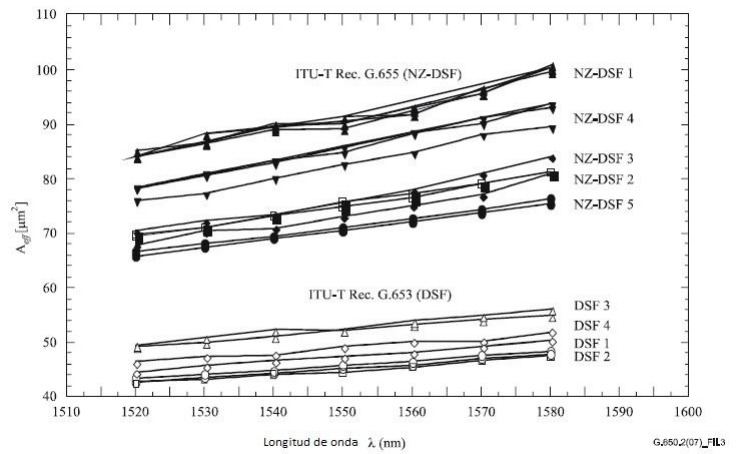


Figura 1. Áreas efectivas en fibras DSF y NZ-DSF

### 3.1 Longitudes Características de la Fibra Óptica

Para determinar el efecto que SPM tiene en la transmisión, se debe analizar las longitudes características de la fibra óptica, las cuales se detallan a continuación:

- Longitud efectiva
- Longitud de dispersión
- Longitud no lineal

**Longitud efectiva.-** Se considera como la distancia dentro de la cual los efectos no lineales son considerables. Se la expresa de la siguiente manera: [7]

$$L_{eff} = \frac{(1 - e^{-\alpha L})}{\alpha} \quad (7)$$

Esta longitud depende del coeficiente de atenuación de la fibra  $\alpha$  (parámetro determinado en las Recomendaciones de la Serie G de la UIT) y de la longitud de la fibra óptica  $L$ . Mientras mayor es la longitud de la fibra óptica, mayor es su longitud efectiva.

**Longitud de dispersión.-** Esta longitud está relacionada con la dispersión cromática mediante el coeficiente de dispersión de segundo orden  $\beta_2$  y el ancho inicial del pulso óptico  $T_0$ , de acuerdo a la siguiente ecuación: [6] [8]

$$L_D = \frac{T_0^2}{|\beta_2|} \quad (8)$$

La longitud de dispersión indica a partir de qué distancia los efectos dispersivos son importantes.

**Longitud no lineal.-** Esta longitud indica a partir de qué distancia los efectos no lineales son importantes. Esta longitud relaciona el coeficiente no lineal  $\gamma$  y la potencia óptica emitida por la fuente de luz  $P_0$ , de la forma: [6] [8]

$$L_{NL} = \frac{1}{\gamma P_0} \tag{9}$$

Mientras mayor sea la potencia de transmisión  $P_0$ , esta longitud a la que se presentan los efectos no lineales disminuye.

Para que los efectos de SPM interfieran en la transmisión se debe cumplir la siguiente condición: [6]

$$\frac{L_D}{L_{NL}} = \frac{\gamma P_0 T_0^2}{|\beta_2|} \gg 1 \tag{10}$$

### 3.2 Ensanchamiento Producido por SPM

El desfase que se produce en los pulsos ópticos debido a SPM se lo puede calcular utilizando la expresión: [3]

$$\varphi_{max} = \frac{L_{eff}}{L_{NL}} = \gamma P_0 L_{eff} \tag{11}$$

Dicho desfase depende del parámetro no lineal, de la longitud efectiva puesto que como se mencionó, ésta determina hasta qué distancia los efectos no lineales son importantes; y, de la potencia óptica emitida por la fuente de luz.

La ecuación (11) permite conocer el desfase de los pulsos. Sin embargo, existe otro parámetro que determina el ensanchamiento de los pulsos ópticos, éste es: [3] [6]

$$\delta\omega_{max} = 0.86 T_0^{-1} \varphi_{max} \tag{12}$$

El ensanchamiento de los pulsos ópticos depende del ancho espectral inicial (relacionado de manera inversa con el ancho inicial del pulso) y del desfase producido por SPM.

En la siguiente figura se observa los diversos tipos de ensanchamientos y degradaciones de los pulsos producidos por SPM para diferentes escenarios en función del desfase:

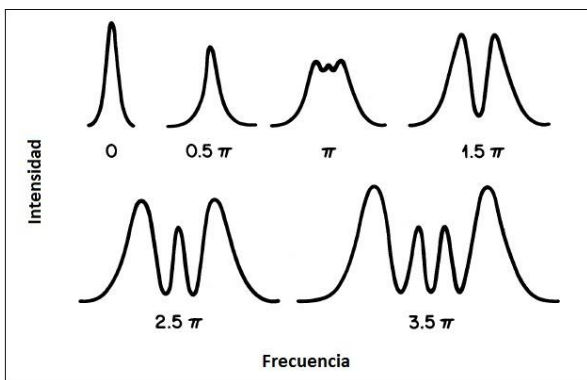


Figura 2. Formas de los pulsos con varios desfases

Cuando la potencia óptica se incrementa, los efectos no lineales aumentan provocando que en este caso Automodulación de Fase y se incrementen armónicos de frecuencia en los bordes del pulso óptico.

## 4. ANÁLISIS TEÓRICO Y SIMULACIÓN DE SPM

Una vez que se han descrito los parámetros que intervienen en el análisis de la automodulación de fase, a continuación se estudia una serie de casos a fin de observar el comportamiento de SPM, para ello se utilizan tres tipos de fibras ópticas monomodo (SSMF-G652, DSF-G653 y NZ-DSF-G655) y se varían los parámetros de longitud de fibra óptica, potencia óptica y velocidad de transmisión.

Para el análisis de cada caso se utiliza el software computacional NLSE Solver. Este programa está basado en la ecuación no lineal de Schrödinger, que involucra los parámetros indicados anteriormente. A continuación se indica dicha ecuación: [2] [11]

$$\frac{\partial A(t,z)}{\partial z} = -\frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A(t,z)}{\partial t^2} + \frac{\beta_3}{2} \frac{\partial^3 A(t,z)}{\partial t^3} - \frac{\alpha}{2} A(t,z) + i\gamma \left[ |A(t,z)|^2 A(t,z) + \frac{i}{\omega_0} \frac{\partial(|A|^2 A)}{\partial t} - T_R \frac{\partial(|A|^2)}{\partial t} A \right] \tag{13}$$

En esta ecuación intervienen los parámetros ópticos: coeficiente de atenuación, coeficientes de dispersión cromática de segundo y tercer orden y potencia de transmisión.

En la Fig. 3 se presenta la interfaz gráfica del software computacional NLSE Solver, con sus correspondientes secciones y los diferentes parámetros que deben ser ingresados.

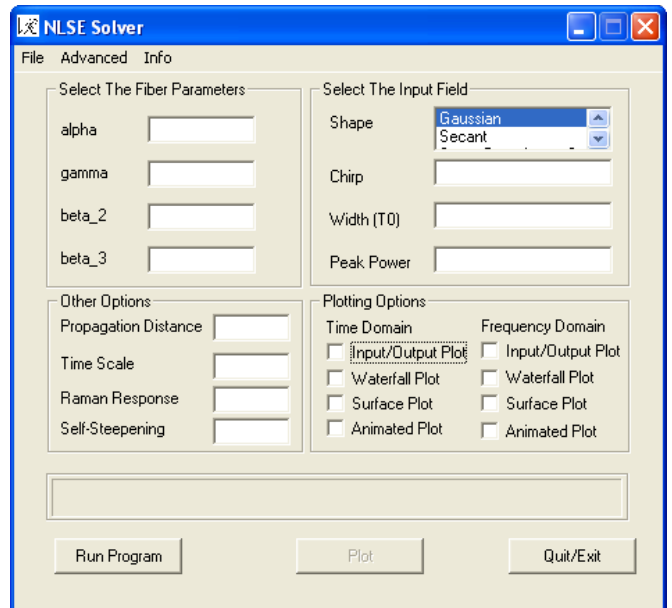


Figura 3. Interfaz gráfica del software NLSE Solver

### 4.1 SPM en una fibra óptica monomodo SSMF

En este grupo de casos se utiliza como medio de transmisión la fibra óptica monomodo SMF-28, cuya área efectiva es  $84 \text{ um}^2$  y cuyo coeficiente de atenuación según la norma G652 es  $0.2 \text{ dB/Km}$  en segunda ventana ( $1310 \text{ nm}$ ), que es donde se utiliza preferentemente. Para determinar la no linealidad de la fibra es necesario calcular el valor del parámetro no lineal, para ello se requiere determinar los siguientes valores:

- El índice de refracción no lineal ( $n_2$ ): Parámetro que depende del tipo de fibra óptica y para la fibra SSMF es  $1,8 \times 10^{-20} \text{ W/m}^2$ .
- La frecuencia central del pulso, parámetro que depende exclusivamente de la longitud de onda de trabajo (1310nm).

Mediante la siguiente expresión se obtiene el valor de la frecuencia central:

$$\omega_0 = \frac{2\pi c}{\lambda} = \frac{2\pi(3 \times 10^8 \text{ m/s})}{1310 \times 10^{-9} \text{ m}} = 458\pi \quad (14)$$

Para cada uno de los casos de estudio se variará la longitud de la fibra, en tanto que el valor del coeficiente no lineal se considerará constante, y se lo determina de la siguiente manera:

$$\gamma = \frac{n_2 \omega_0}{A_{eff} C} = \frac{(1,8 \times 10^{-20} \text{ W/m}^2)(458\pi \text{ THz})}{(84 \times 10^{-11} \text{ m}^2)(3 \times 10^8 \text{ m/s})} = 1,21 \frac{1}{\text{KmW}} \quad (15)$$

A continuación se indica los parámetros variables que se utilizan para las simulaciones:

*Caso I (L=30Km):*

En cada caso se debe expresar el coeficiente de atenuación (dB/Km) en unidades lineales ( $\alpha'$ ) en lugar de logarítmicas.

$$\alpha' = (0,23) \times (0,2 \text{ dB/Km}) = 0,046 \text{ Km}^{-1} \quad (16)$$

$$L_{eff} = \frac{1 - e^{-\alpha' L}}{\alpha'} = \frac{1 - e^{-(0,046)(30)}}{0,046} = 16,27 \text{ Km} \quad (17)$$

*Caso II (L=70Km):*

$$\alpha' = (0,23) \times (0,2 \text{ dB/Km}) = 0,046 \text{ Km}^{-1} \quad (18)$$

$$L_{eff} = \frac{1 - e^{-\alpha' L}}{\alpha'} = \frac{1 - e^{-(0,046)(70)}}{0,046} = 20,87 \text{ Km} \quad (19)$$

*Caso III (L=200Km):*

$$\alpha' = (0,23) \times (0,2 \text{ dB/Km}) = 0,046 \text{ Km}^{-1} \quad (20)$$

$$L_{eff} = \frac{1 - e^{-\alpha' L}}{\alpha'} = \frac{1 - e^{-(0,046)(200)}}{0,046} = 21,73 \text{ Km} \quad (21)$$

Para conocer el efecto de SPM en la transmisión se debe determinar el valor de la longitud no lineal, para ello se debe definir la potencia con la cual se envían los pulsos ópticos. Las potencias que se consideran son 2mW y 20mW, así:

*Caso a) Potencia de entrada 2 mW*

$$L_{NL} = \frac{1}{\gamma P_0} = \frac{1}{(1,21 \text{ Km}^{-1})(2 \times 10^{-3} \text{ W})} = 413,22 \text{ Km} \quad (22)$$

A continuación se realiza el análisis para el CASO I ( $L = 30 \text{ Km}$ ):

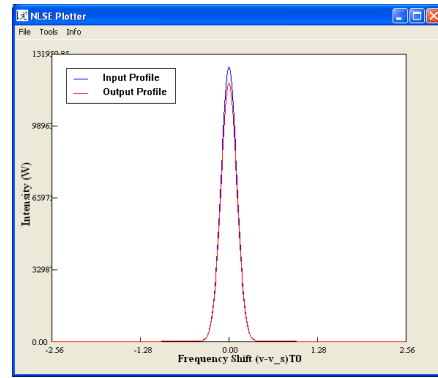
$$\varphi_{max} = \frac{L_{eff}}{L_{NL}} = \frac{16,27 \text{ Km}}{413,32 \text{ Km}} = 0,039 \quad (23)$$

En la ecuación(12) se observa que el ensanchamiento depende del desfase y del ancho inicial del pulso óptico (inverso de la velocidad de transmisión,  $Vt$ ), para este caso y considerando una velocidad de transmisión de 10 Gbps, el valor sería:

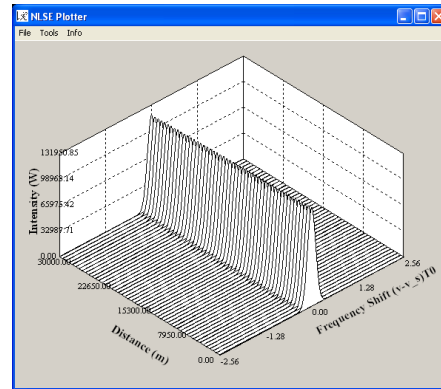
$$T_0 = \frac{1}{(10 \times 10^9 \text{ bps})} = 100 \text{ ps} \quad (24)$$

Por lo tanto el ensanchamiento provocado por SPM es:

$$\delta\omega_{max} = 0,86(\varphi_{max})(T_0)^{-1} = 0,86(0,039)(100 \times 10^{-12})^{-1} = 0,11 \text{ ps} \approx 0 \quad (25)$$



**Figura 4.** Pulso óptico en fibra SSMF sin afectación debido a SPM ( $P_0=2\text{mW}$ ,  $Vt=10\text{Gbps}$  y  $L=30 \text{ Km}$ )



**Figura 5.** Pulso óptico sin degradación de SPM en fibra óptica SSMF ( $P_0=2\text{mW}$ ,  $Vt=10\text{Gbps}$ , y  $L=30 \text{ Km}$ )

Si se compara el resultado teórico de (25) con las gráficas de la Fig. 2, se observa que SPM no degrada en este caso los pulsos ópticos, como se puede corroborar con los resultados de la simulación presentados en las Figs. 4 y 5, donde se observa que no hay afectación en la forma de los pulsos; pues si la potencia óptica es pequeña (2 mW) no se alcanzan a producir los efectos no lineales, por tanto SPM no tiene efecto en la transmisión.

*Caso b) Potencia de entrada 20 mW*

A continuación con una potencia aplicada superior se analiza para la misma fibra SSMF el CASO I ( $L = 30 \text{ Km}$ ), considerando la misma velocidad de transmisión. En este

caso se puede observar cómo SPM si tiene efecto en la transmisión, esto ocurre debido a que la potencia óptica es grande (20 mW) y se alcanzan a producir los efectos no lineales.

$$L_{NL} = \frac{1}{\gamma P_0} = \frac{1}{(1,21Km^{-1})(20 \times 10^{-3}W)} = 41,32Km \quad (26)$$

$$\varphi_{max} = \frac{L_{eff}}{L_{NL}} = \frac{16,27Km}{41,32Km} = 0,39 \quad (27)$$

$$\delta\omega_{max} = 0,86(\varphi_{max})(T_0)^{-1} = 0,86(0,39)(100 \times 10^{-12})^{-1} = 1,1\pi \cong \pi \quad (28)$$

Las Figs. 6 y 7 que se presentan a continuación, muestran la afectación debida a SPM en la forma del pulso.

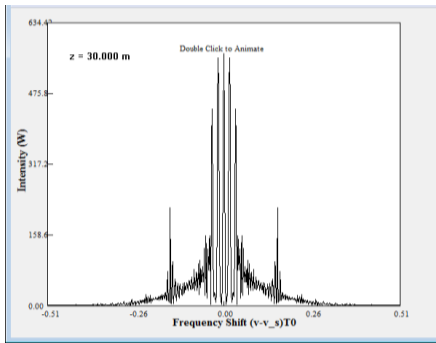


Figura 6. Pulso óptico en fibra SSMF con afectación debido a SPM ( $P_0=20mW$ ,  $V_t=10Gbps$  y  $L=30 Km$ )

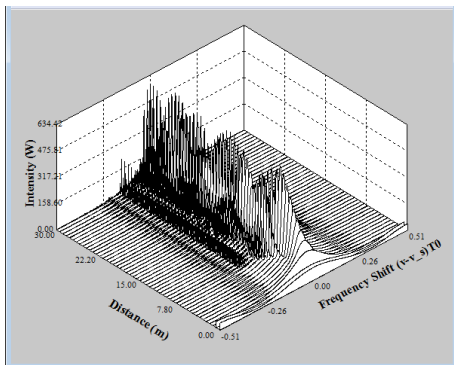


Figura 7. Pulso óptico con degradación de SPM en fibra óptica SSMF ( $P_0=20mW$ ,  $V_t=10Gbps$  y  $L=30 Km$ )

Para observar la variación del efecto de automodulación de fase se incrementará la longitud de la fibra óptica, puesto que al aumentar este valor, los efectos no lineales también aumentan. Las longitudes que se utilizarán son 70Km y 200Km.

Los resultados que se obtienen en el análisis, para el CASO II, cuando la longitud de la fibra óptica es 70Km y la potencia óptica  $P_0=2mW$ , manteniendo la misma fibra SSMF e igual velocidad de transmisión de 10 Gbps, son los siguientes:

$$\varphi_{max} = \frac{L_{eff}}{L_{NL}} = \frac{20,87Km}{413,32Km} = 0,051 \quad (29)$$

$$\delta\omega_{max} = 0,86(\varphi_{max})(T_0)^{-1} = 0,86(0,051)(100 \times 10^{-12})^{-1} = 0,14\pi \cong 0 \quad (30)$$

A continuación se presentan los resultados arrojados por la simulación para este caso.

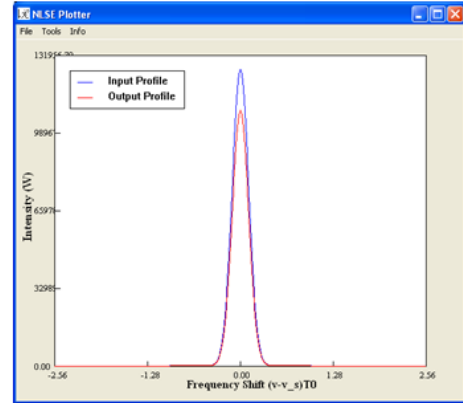


Figura 8. Pulso óptico en fibra SSMF sin afectación debido a SPM ( $P_0=2mW$ ,  $V_t=10Gbps$  y  $L=70 Km$ )

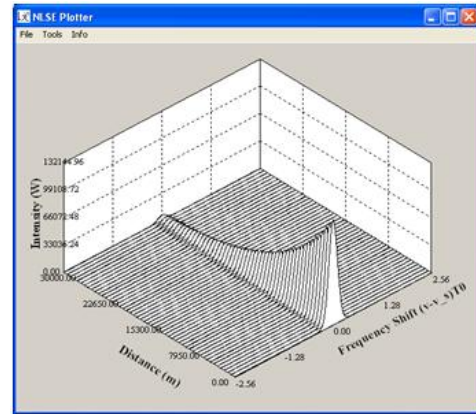


Figura 9. Pulso óptico sin degradación de SPM en fibra óptica SSMF ( $P_0=2mW$ ,  $V_t=10Gbps$  y  $L=70 Km$ )

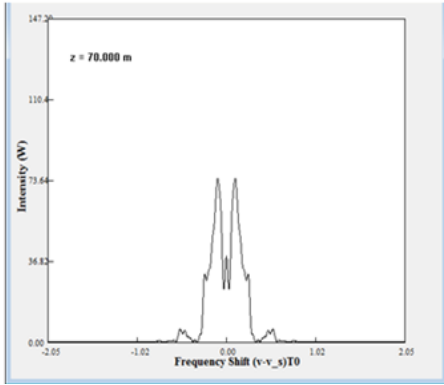
Estos resultados (Figs. 8 y 9), muestran que no hay degradación en los pulsos, esto se debe a la baja potencia aplicada (2mW) y a la menor velocidad de transmisión (10Gbps).

Si se incrementa la velocidad de transmisión a 40 Gbps a fin de analizar su efecto en el ensanchamiento de los pulsos, de acuerdo a (23),  $T_0$  sería 25 ps, en este caso se tendría:

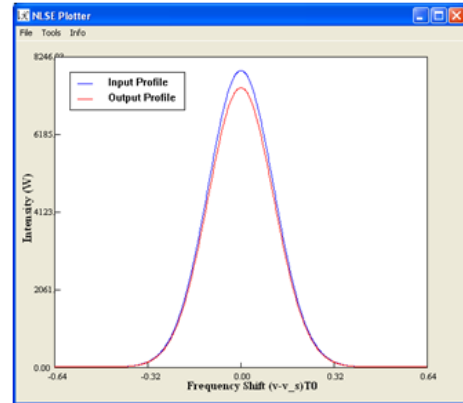
$$\varphi_{max} = \frac{L_{eff}}{L_{NL}} = \frac{20,87Km}{413,32Km} = 0,051 \quad (31)$$

$$\delta\omega_{max} = 0,86(\varphi_{max})(T_0)^{-1} = 0,86(0,051)(25 \times 10^{-12})^{-1} = 0,52\pi \cong 0,5\pi \quad (32)$$

Para las mismas condiciones de longitud y potencia aplicada, con un incremento en la velocidad de transmisión a 40 Gbps ya se observa afectación en los pulsos, esto demuestran tanto los resultados teóricos como los que arroja la simulación (Figs. 10 y 11).



**Figura 10.** Pulso óptico en fibra SSMF con afectación debido a SPM ( $P_o=2\text{mW}$ ,  $V_t=40\text{Gbps}$  y  $L=70\text{ Km}$ )

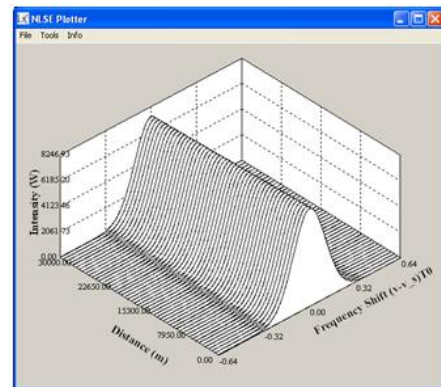


**Figura 11.** Pulso óptico en fibra SSMF sin afectación debido a SPM ( $P_o=2\text{mW}$ ,  $V_t=10\text{Gbps}$  y  $L=200\text{ Km}$ )

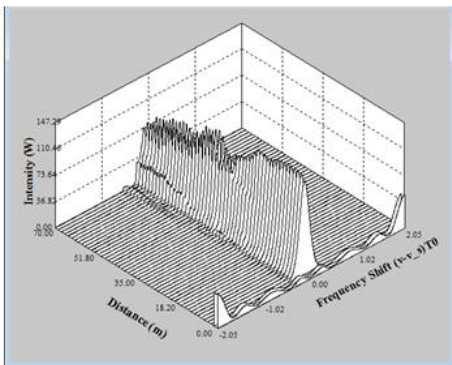
Se realiza el mismo análisis para el CASO III, cuando la longitud de la fibra se incrementa a  $L=200\text{ Km}$ , la potencia óptica  $P_o=2\text{ mW}$ , manteniendo la misma fibra SSMF y una velocidad de transmisión de  $10\text{ Gbps}$ . Los resultados son:

$$\varphi_{max} = \frac{L_{eff}}{L_{NL}} = \frac{21,73\text{Km}}{413,32\text{Km}} = 0,052(33)$$

$$\delta\omega_{max} = 0,86(\varphi_{max})(T_0)^{-1} = 0,86(0,052)(100 \times 10^{-12})^{-1} = 0,15\pi \cong 0 \quad (34)$$



**Figura 12.** Pulso óptico sin degradación de SPM en fibra óptica SSMF ( $P_o=2\text{mW}$ ,  $V_t=10\text{Gbps}$  y  $L=200\text{ Km}$ )



**Figura 13.** Pulso óptico con degradación de SPM en fibra SSMF ( $P_o=2\text{mW}$ ,  $V_t=40\text{Gbps}$  y  $L=70\text{ Km}$ )

Dada la baja potencia aplicada ( $2\text{ mW}$ ), en condiciones de una velocidad de transmisión de  $10\text{ Gbps}$ , no se observa degradación de los pulsos, esto se deduce tanto de los resultados teóricos como los de la simulación (Figs. 12 y 13).

A continuación, manteniendo una velocidad de  $10\text{ Gbps}$  y la misma longitud de fibra ( $200\text{ Km}$ ), se procede a incrementar la potencia óptica a  $20\text{ mW}$ , para analizar si hay o no afectación en la forma de los pulsos.

$$\varphi_{max} = \frac{L_{eff}}{L_{NL}} = \frac{21,73\text{Km}}{41,32\text{Km}} = 0,52 \quad (35)$$

$$\delta\omega_{max} = 0,86(\varphi_{max})(T_0)^{-1} = 0,86(0,52)(100 \times 10^{-12})^{-1} = 1,5\pi \quad (36)$$

De lo que se observa, a una velocidad de  $10\text{ Gbps}$ , con una potencia incrementada de  $20\text{ mW}$  y una longitud de fibra de  $200\text{ Km}$ , ya se presenta degradación en los pulsos, como lo muestran los resultados teóricos y los que se obtienen de la simulación (Figs. 14 y 15).

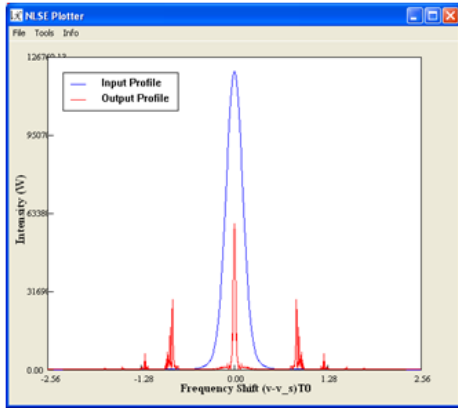


Figura 14. Pulso óptico en fibra SSMF con afectación debido a SPM ( $P_o=20mW$ ,  $V_t=10Gbps$  y  $L=200Km$ )

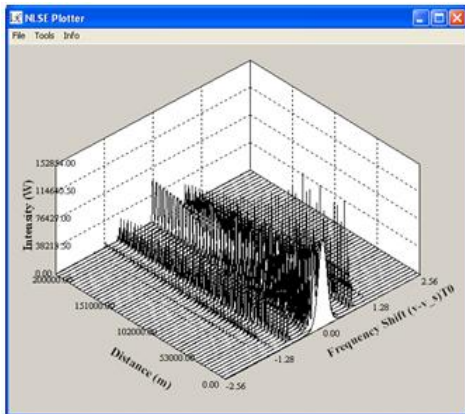


Figura 15. Pulso óptico con degradación de SPM en fibra óptica SSMF ( $P_o=20mW$ ,  $V_t=10Gbps$  y  $L=200Km$ )

#### 4.2 SPM en una fibra óptica monomodo DSF

Se realiza un análisis similar al mostrado en la sección anterior con la única diferencia de que ahora la fibra óptica monomodoes del tipo DSF. Se utilizará la fibra óptica DSF según la Recomendación G.653A.

Para las fibras DSF el valor del índice de refracción no lineal es  $3 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ . La frecuencia central del pulso óptico está relacionada a la longitud de onda de trabajo, las fibras DSF normalmente operan en tercera ventana, es decir  $1550\text{nm}$ , por lo que la frecuencia central del pulso óptico es:

$$\omega_0 = \frac{2\pi c}{\lambda} = \frac{2\pi(3 \times 10^8 \text{ m/s})}{1550 \times 10^{-9} \text{ m}} = 378\pi \quad (37)$$

Según la norma G653A el área efectiva de una fibra DSF es aproximadamente  $55\mu\text{m}^2$ , su coeficiente de atenuación de  $0.35 \text{ dB/Km}$ ; y, el índice de refracción no lineal es  $3 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ . Por tanto, el valor del coeficiente no lineal correspondiente es:

$$\gamma = \frac{n_2 \omega_0}{A_{eff} C} = \frac{(3 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W})(378\pi \text{ THz})}{(55 \times 10^{-11} \text{ m}^2)(3 \times 10^8 \text{ m/s})} = 1.4 \frac{1}{\text{KmW}} \quad (38)$$

Se observa que el valor del coeficiente no lineal es mayor, esto se debe a que el área efectiva de las fibras DSF es menor que la de las fibras SSMF.

A continuación se indican los valores de longitud efectiva obtenidos aplicando (7) y (16), para cada uno de los casos de fibra DSF:

Tabla 1: Longitud efectiva,  $L_{eff}$ , para fibra DSF

Longitud/Parámetro	L=30 Km	L=70Km	L=200Km
$\alpha'$	$0.0805\text{Km}^{-1}$	$0.0805\text{Km}^{-1}$	$0.0805\text{Km}^{-1}$
$L_{eff}$	11.31 Km	12.37Km	12.42 Km

Conociendo las longitudes efectivas, se debe calcular las longitudes no lineales mediante (9). Para fines de comparación, las potencias consideradas son iguales a las utilizadas en el caso de la fibra óptica SSMF y los resultados se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2: Longitud no lineal,  $L_{NL}$ , para fibra DSF con diferentes Potencias de entrada

$L_{NL}/\text{Potencia } (P_o)$	$L_{NL}$
$P_o = 2\text{mW}$	333.33 Km
$P_o = 20 \text{ mW}$	33.33 Km

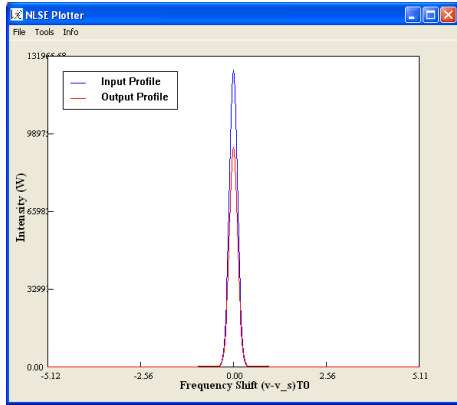
Similar a lo señalado con la fibra óptica monomodoSSMF, se analizará un caso cuando SPM afecta a los pulsos ópticos y otro cuando se descarta la presencia de este efecto. Para poder realizar una comparación tanto gráfica como matemática, este análisis se lo realiza bajo las mismas condiciones de la fibra estándar.

En la Tabla 3, se presentan los diferentes escenarios de fibra DSF para los que se analizó el efecto de SPM, determinando los parámetros de desfase y ensanchamiento de los pulsos mediante (11) y (12) respectivamente, en condiciones de una velocidad de transmisión constante de 10 Gbps.

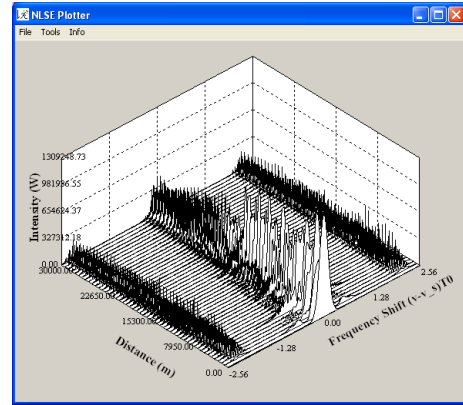
Tabla 3: Análisis teórico de SPM para una fibra DSF a  $V_t = 10 \text{ Gbps}$ , variando  $P_o$  y  $L$

$P_o/L$	$P_o = 2\text{mW}$	$P_o = 20 \text{ mW}$
L = 30 Km	$\phi_{\max} = 0.033$	$\phi_{\max} = 0.33$
	$\delta\omega_{\max} = 0.16\pi \approx 0$	$\delta\omega_{\max} = 1.6\pi \approx 1.5\pi$
L = 70 Km	$\phi_{\max} = 0.033$	$\phi_{\max} = 0.33$
	$\delta\omega_{\max} = 0.16\pi \approx 0$	$\delta\omega_{\max} = 1.6\pi \approx 1.5\pi$
L = 200 Km	$\phi_{\max} = 0.039$	$\phi_{\max} = 0.39$
	$\delta\omega_{\max} = 0.21\pi \approx 0$	$\delta\omega_{\max} = 2.1\pi \approx 2.\pi$

El análisis teórico (Tabla 3) fue corroborado mediante la correspondiente simulación. Para una fibra DSF de 30 Km,  $P_o$  de 2 mW; y, una velocidad de transmisión de 10 Gbps, los resultados de la simulación (Figs. 16 y 17) muestran que no hay degradación del pulso óptico.

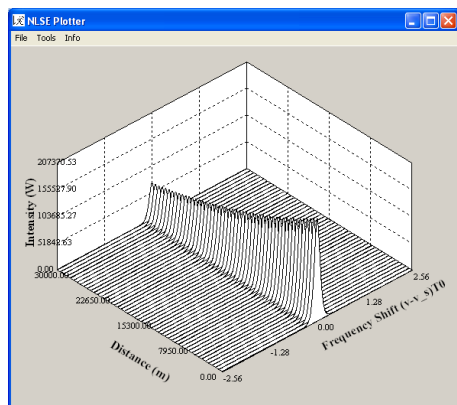


**Figura 16.** Pulso óptico en fibra DSF sin afectación debido a SPM ( $P_o=2\text{mW}$ ,  $V_t=10\text{Gbps}$  y  $L=30\text{Km}$ )



**Figura 19.** Pulso óptico con degradación de SPM en fibra DSF ( $P_o=20\text{mW}$ ,  $V_t=10\text{Gbps}$  y  $L=30\text{Km}$ )

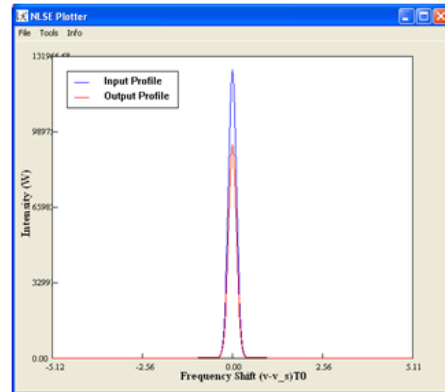
En este caso debido al nivel elevado de potencia (20 mW), los resultados teóricos (Tabla 3), y los de la simulación (Figs. 18 y 19), muestran degradación en los pulsos ópticos.



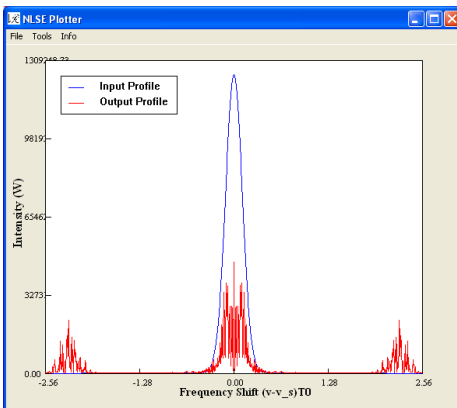
**Figura 17.** Pulso óptico sin degradación de SPM en fibra óptica DSF ( $P_o=2\text{mW}$ ,  $V_t=10\text{Gbps}$  y  $L=30\text{Km}$ )

Se realizará el mismo análisis aumentando la longitud de la fibra óptica. Cuando la longitud de la fibra se incrementa a 70Km, la potencia de entrada es 2 mW y la velocidad de transmisión 10 Gbps, los resultados de la simulación, Figs. 20 y 21, conjuntamente con los resultados teóricos no muestran degradación en los pulsos ópticos:

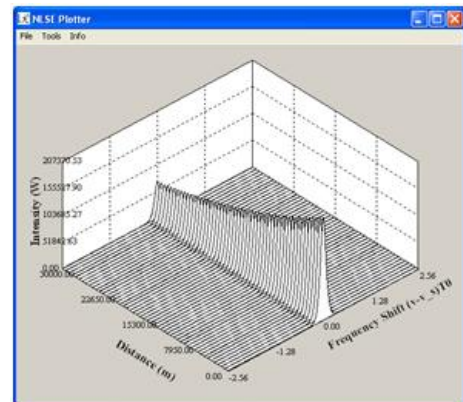
Para la fibra DSF, cuando la potencia de entrada sube a 20 mW, manteniendo las mismas condiciones anteriores ( $V_t=10\text{Gbps}$  y  $L=30\text{Km}$ ), los resultados de la simulación son:



**Figura 20.** Pulso óptico en fibra DSF sin afectación debido a SPM ( $P_o=2\text{mW}$ ,  $V_t=10\text{Gbps}$  y  $L=70\text{Km}$ )



**Figura 18.** Pulso óptico en fibra óptica DSF con afectación debido a SPM ( $P_o=20\text{mW}$ ,  $V_t=10\text{Gbps}$  y  $L=30\text{Km}$ )



**Figura 21.** Pulso óptico sin degradación de SPM en fibra DSF ( $P_o=2\text{mW}$ ,  $V_t=10\text{Gbps}$  y  $L=70\text{Km}$ )

Para  $L=70$  Km, si la potencia de entrada se aumenta a 20 mW ya se observa degradación en los pulsos (ver Tabla 3 y Figs. 22 y 23):

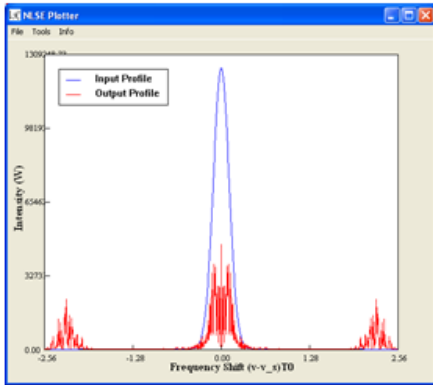


Figura 22. Pulso óptico sin degradación de SPM en fibra DSF ( $P_o=2$ mW,  $V_t=10$ Gbps y  $L=70$ Km)

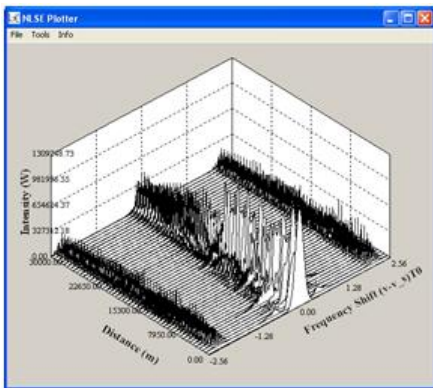


Figura 23. Pulso óptico con degradación de SPM en fibra DSF ( $P_o=20$ mW,  $V_t=10$ Gbps y  $L=70$ Km)

Cuando la longitud de la fibra es 200Km los resultados a los que se llega, para una potencia de 2 mW y una velocidad de transmisión de 10 Gbps, son los presentados en la tabla 3 y la correspondiente simulación en las Figs. 24 y 25, muestran que no hay degradación en el pulso:

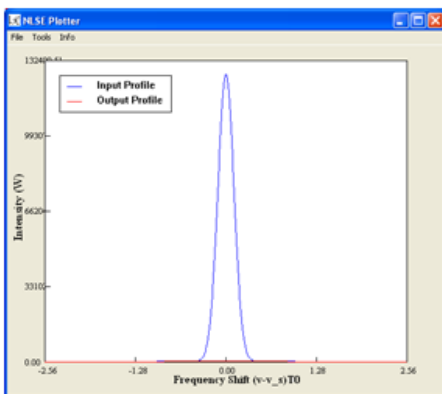


Figura 24. Pulso óptico en fibra DSF sin afectación debido a SPM ( $P_o=2$ mW,  $V_t=10$ Gbps y  $L=200$ Km)

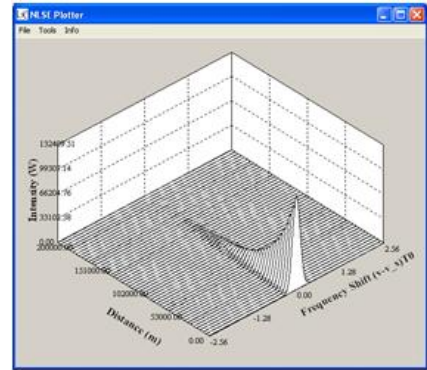


Figura 25. Pulso óptico sin degradación de SPM en fibra DSF ( $P_o=2$ mW,  $V_t=10$ Gbps y  $L=200$ Km)

Con una potencia de 20 mW, e iguales condiciones de longitud ( $L=200$ Km) y velocidad ( $V_t=10$ Gbps), los resultados teóricos de la Tabla 3 y de la simulación (Figs. 26 y 27), reflejan afectación en la calidad del pulso óptico:

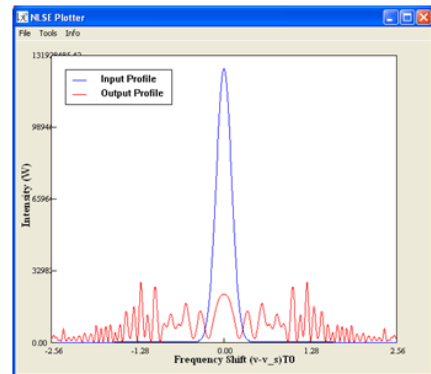


Figura 26. Pulso óptico en fibra óptica DSF con afectación debido a SPM ( $P_o=20$ mW,  $V_t=10$ Gbps y  $L=200$ Km)

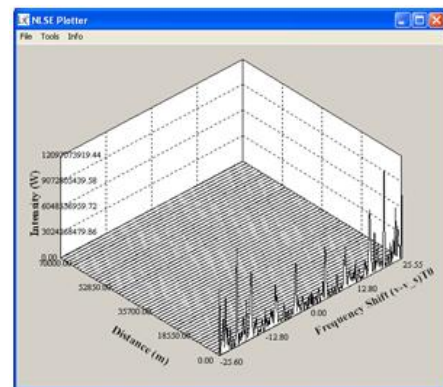


Figura 27. Pulso óptico con degradación de SPM en fibra DSF ( $P_o=20$ mW,  $V_t=10$ Gbps y  $L=200$ Km)

#### 4.3 SPM en una fibra óptica monomodo NZ-DSF

En este apartado se analiza el efecto que SPM tiene en una fibra óptica monomodo NZ-DSF (Recomendación G.655C), con área efectiva de  $72 \mu\text{m}^2$  e índice de refracción no lineal de  $2,2 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ . La frecuencia central del pulso es la misma calculada en (37), puesto que la longitud de onda de trabajo es también 1550 nm. De modo que el valor del coeficiente no lineal es:



$$\gamma = \frac{n_2 \omega_0}{A_{eff} c} = \frac{(2,2 \times 10^{-20} m^2/W)(378 \pi THz)}{(7,2 \times 10^{-11} m^2)(3 \times 10^8 m/s)} = 1,3 \frac{1}{KmW} \quad (58)$$

Puesto que la fibra óptica monomodo NZ-DSF tiene el mismo coeficiente de atenuación que la fibra DSF, 0,35 dB/Km, los valores de longitud efectiva son los mismos obtenidos en la Tabla 1. Mientras que las longitudes no lineales difieren dado que el valor del coeficiente no lineal es menor y los resultados se presentan en la Tabla 4.

**Tabla 4:** Longitud no lineal para fibra NZ-DSF con diferentes Potencias aplicadas

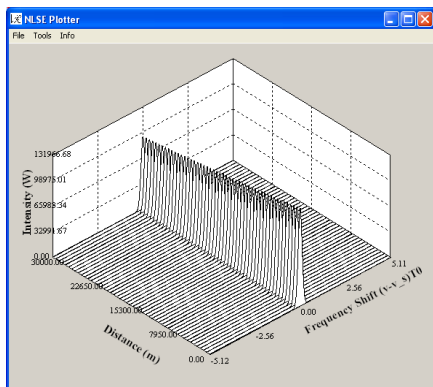
$L_{NL}/Potencia (P_o)$	$L_{NL}$
$P_o = 2mW$	400 Km
$P_o = 20 mW$	40 Km

En la Tabla 5, se presentan los diferentes escenarios de fibra NZ-DSF para los que se analizó teóricamente el efecto de SPM, determinando los parámetros de desfase y ensanchamiento de los pulsos mediante (11) y (12) respectivamente, en condiciones de una velocidad de transmisión constante de 10 Gbps.

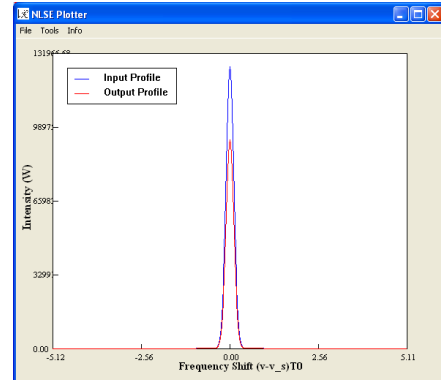
**Tabla 5:** Análisis teórico de SPM para una fibra NZ-DSF a  $V_t = 10$  Gbps, variando  $P_o$  y  $L$

$P_o/L$	$P_o = 2mW$	$P_o = 20 mW$
$L = 30$ Km	$\varphi_{max} = 0,028$	$\varphi_{max} = 0,28$
	$\delta\omega_{max} = 0,145\pi \approx 0$	$\delta\omega_{max} = 1,45\pi \approx 1,5\pi$
$L = 70$ Km	$\varphi_{max} = 0,031$	$\varphi_{max} = 0,31$
	$\delta\omega_{max} = 0,16\pi \approx 0$	$\delta\omega_{max} = 1,6\pi \approx 1,5\pi$
$L = 200$ Km	$\varphi_{max} = 0,032$	$\varphi_{max} = 0,32$
	$\delta\omega_{max} = 0,19\pi \approx 0$	$\delta\omega_{max} = 1,9\pi \approx 2,\pi$

En primer lugar se indica un ejemplo cuando el efecto de SPM es despreciable en la transmisión, esto ocurre para una longitud de fibra NZ-DSF de 30 Km, una potencia de 2 mW y una velocidad de 10 Gbps. Las respuestas gráficas que se obtienen de la simulación son las siguientes:

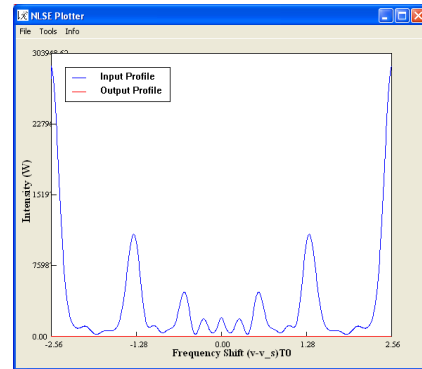


**Figura 31.** Pulso óptico en fibra NZ-DSF sin afectación debido a SPM ( $P_o=2mW$ ,  $V_t=10Gbps$  y  $L=30Km$ )

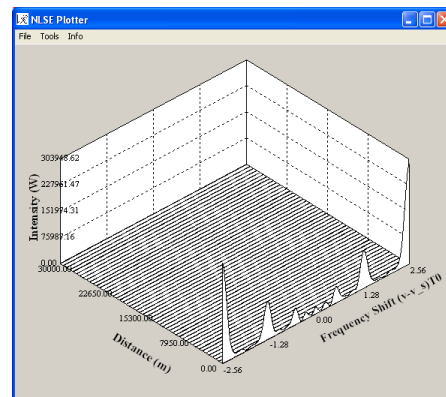


**Figura 28.** Pulso óptico sin degradación de SPM en fibra NZ-DSF ( $P_o=2mW$ ,  $V_t=10Gbps$  y  $L=30Km$ )

Si la potencia de entrada se incrementa a 20 mW, manteniendo las mismas condiciones anteriores, los resultados obtenidos muestran afectación en la forma del pulso y son los siguientes:



**Figura 29.** Pulso óptico en fibra NZ-DSF con afectación debido a SPM ( $P_o=20mW$ ,  $V_t=10Gbps$  y  $L=30Km$ )



**Figura 30.** Pulso óptico con degradación de SPM en fibra NZ-DSF ( $P_o=20mW$ ,  $V_t=10Gbps$  y  $L=30Km$ )

Un análisis similar se realiza para  $L=70Km$  y  $P_o=2mW$ , donde no se presenta degradación en el pulso:

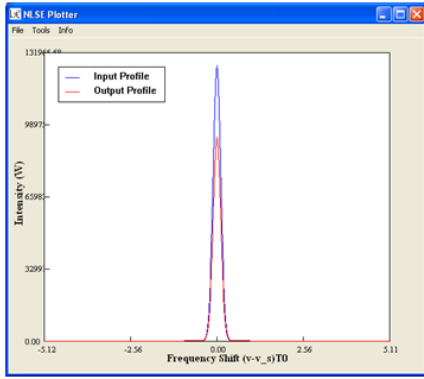


Figura 32. Pulso óptico en fibra NZ-DSF sin afectación debido a SPM ( $P_o=2\text{mW}$ ,  $V_t=10\text{Gbps}$  y  $L=70\text{Km}$ )

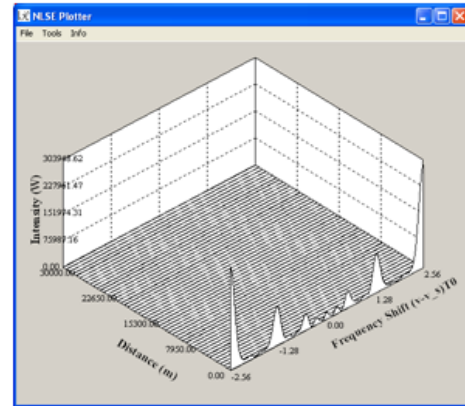


Figura 35. Pulso óptico con degradación de SPM en fibra NZ-DSF ( $P_o=20\text{mW}$ ,  $V_t=10\text{Gbps}$  y  $L=70\text{Km}$ )

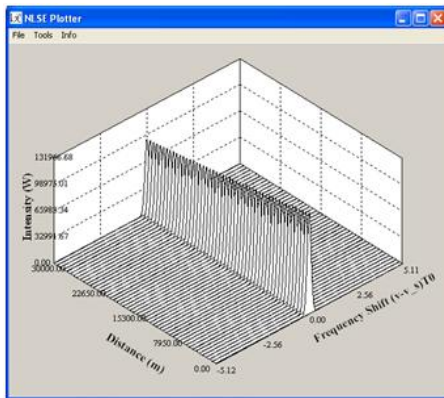


Figura 33. Pulso óptico sin degradación de SPM en fibra NZ-DSF ( $P_o=2\text{mW}$ ,  $V_t=10\text{Gbps}$  y  $L=70\text{Km}$ )

Se procede de manera similar para  $L=200\text{Km}$  y  $P_o = 2 \text{ mW}$ , donde no hay degradación en el pulso:

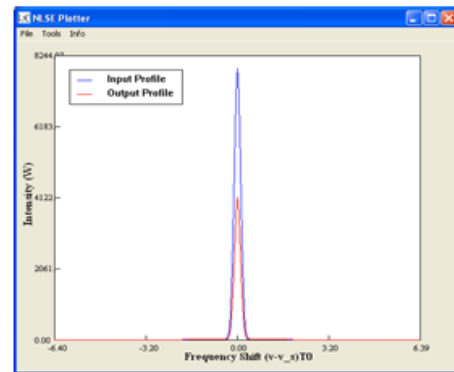


Figura 36. Pulso óptico en fibra NZ-DSF sin afectación debido a SPM ( $P_o=2\text{mW}$ ,  $V_t=10\text{Gbps}$  y  $L=200\text{Km}$ )

Para una potencia de 20 mW con  $L = 70 \text{ Km}$ , los resultados muestran degradación en el pulso por SPM y son:

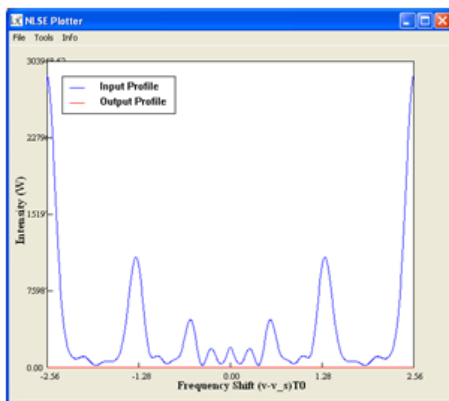


Figura 34. Pulso óptico en fibra NZ-DSF con afectación debido a SPM ( $P_o=20\text{mW}$ ,  $V_t=10\text{Gbps}$  y  $L=70\text{Km}$ )

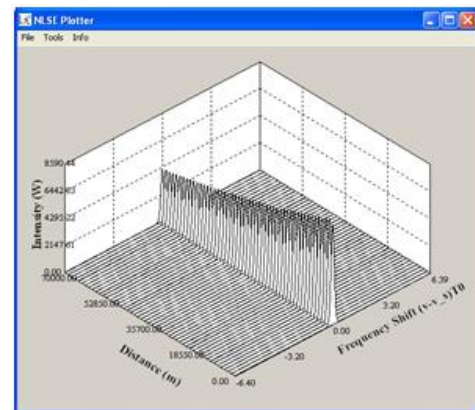


Figura 37. Pulso óptico sin degradación de SPM en fibra NZ-DSF ( $P_o=2\text{mW}$ ,  $V_t=10\text{Gbps}$  y  $L=200\text{Km}$ )

Para una potencia de 20 mW a la misma longitud los resultados presentan afectación en la forma del pulso y son:

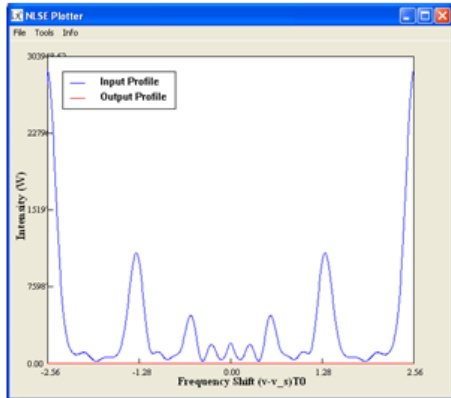


Figura 38. Pulso óptico en fibra NZ-DSF con afectación debido a SPM ( $P_o=20\text{mW}$ ,  $V_t=10\text{Gbps}$  y  $L=200\text{Km}$ )

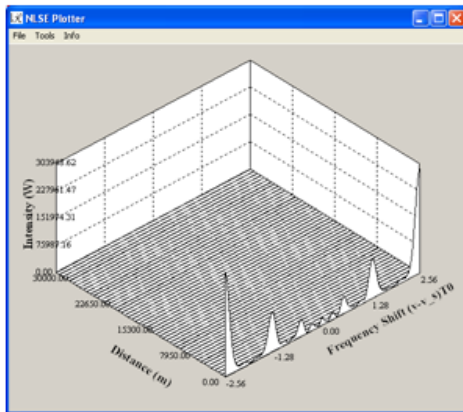


Figura 39. Pulso óptico con degradación de SPM en fibra NZ-DSF ( $P_o=20\text{mW}$ ,  $V_t=10\text{Gbps}$  y  $L=200\text{Km}$ )

En los resultados obtenidos se observa que la fibra óptica monomodo estándar es la que presenta menor afectación por los efectos de SPM; este resultado se debe a que es la fibra que mayor área efectiva tiene. En la actualidad existen fibras ópticas NZ-DSF de gran área efectiva extendida, las cuales mejoran la respuesta ante los efectos de la Automodulación de Fase con respecto a las NZ-DSF de reducida área efectiva.

## 5. CONCLUSIONES

Los efectos no lineales de automodulación de fase son de consideración cuando se transmite con una potencia superior a los 10 mW, a una potencia inferior sólo se presentan efectos lineales.

La longitud no lineal depende inversamente del coeficiente no lineal ( $\gamma$ ) y de la potencia de transmisión, por lo que si se transmite con mayor potencia, la longitud no lineal se reduce y afecta a la transmisión.

Para que se produzca el efecto de SPM se debe cumplir que la longitud de la fibra debe ser mucho menor que la longitud de dispersión y a su vez debe ser aproximadamente igual a la longitud no lineal.

- En el efecto Kerr, el índice de refracción tiene dos componentes, una lineal y otra no lineal. La parte lineal depende exclusivamente del material en el cual se propaga la luz. El segundo componente depende de la intensidad óptica. De ahí parte el origen de SPM y de la dependencia del índice de refracción de la potencia con la que se transmiten los pulsos.
- En el caso del parámetro no lineal, éste depende de muchos factores, entre ellos de la frecuencia central, la cual a su vez depende de la longitud de onda en la que se trabaja; por lo que se concluye que si se trabaja en ventanas de transmisión de menor longitud de onda, este parámetro aumentará haciendo que la longitud no lineal disminuya y se produzca el efecto de SPM con mayor incidencia.
- El diámetro del campo modal es otro factor que interviene en el parámetro no lineal. Si éste es mayor, el parámetro no lineal decrece.
- Cuando la potencia aumenta, la longitud no lineal disminuye, por lo que los efectos de SPM deberán ser tomados en consideración. Si a este efecto se suma una alta velocidad de transmisión, los pulsos ópticos se verán también afectados por el efecto dispersivo.
- La fibra óptica monomodo SSMF es la que mayor valor de longitud no lineal presenta, esto se debe a que tiene la mayor área efectiva en comparación a las fibras DSF y NZ-DSF, por esta razón esta fibra presenta una buena respuesta ante los efectos de SPM.

## REFERENCIAS

- [1] A. Leiva, Efectos de la Dispersión de Modo de Polarización, Tercera edición, 2007.
- [2] B. Ortega, Redes Ópticas, 2007.
- [3] C. Bianchi, Guías de Onda Ópticas. PDF 2003.
- [4] D. Abellan, Sistema de comunicaciones ópticos, 2007.
- [5] D. Grosz, "Sistemas de Comunicación por Fibra Óptica de alta capacidad", Buenos Aires, Argentina, 2003.
- [6] G. Agrawal, Efectos no lineales de Fibra Óptica, 3ra edición, 2001.
- [7] H. Guano, P. Molina, M.S. Jiménez, Estudio y Simulación de los Efectos No lineales Scattering Estimulado de Brillouin (SBS) y Scattering Estimulado de Raman (SRS) en una Fibra Óptica Monomodo, Revista Politécnica, Vol. 33. pp. 30-40. Enero 2014.
- [8] J. Albella, Optoelectrónica y Comunicación Óptica, 1988.
- [9] J. Martín, Sistemas de Redes Ópticas de Comunicaciones, Edición 2004. Editorial Isabel Capella
- [10] R. Diaz de la Iglesia, Comunicaciones por Fibra Óptica –Manual de Ingeniería–, Marcombo-Boixareu Editores, 1985.
- [11] TELNET - Fibras ópticas para NGN – Dispersión Cromática y PMD – 2009.

# Medición de Parámetros de Calidad de las Señales de Televisión Digital Terrestre (TDT) en Sitios Identificados como Zonas de Sombra Dentro del Distrito Metropolitano de Quito.

Páez X.\*

Quito-Ecuador

e-mail: xpaezster@gmail.com

**Resumen:** En este artículo se presenta una muestra de los resultados obtenidos en las mediciones de parámetros de calidad de las señales de televisión digital terrestre (TDT) realizadas dentro del Distrito Metropolitano de Quito en sitios identificados como zonas de sombra, donde no existe línea de vista con los lugares de transmisión de TDT. Las mediciones fueron ejecutadas en colaboración de la Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones (ARCOTEL) y de los canales de TDT que operan en la ciudad de Quito, los cuales tuvieron que variar parámetros técnicos de operación tales como, intervalo de guarda, *bit rate*, FEC, así como su potencia de transmisión de 500 W a 3000W, buscando establecer una combinación que permita garantizar una buena calidad de señal y máxima cobertura. Se presentan los diagramas de constelación de cada canal para tener una percepción más gráfica del comportamiento de cada estación televisiva.

**Palabras clave:** Mediciones TDT, diagramas de constelación, TDT Quito, Zonas de sombra.

**Abstract:** This article presents a sample of the results obtained in measurements of quality parameters of digital terrestrial television (TDT) performed within the Metropolitan District of Quito, at sites identified as shaded areas where no there is line of sight with TDT transmission sites. The measurements were performed in collaboration with the Agency for Regulation and Control of Telecommunications (ARCOTEL) and TDT channels operating in the city of Quito, which had to change technical operating parameters such as guard interval, bit rate, FEC, and its transmission power of 500 W to 3000 W, seeking to establish a combination that will guarantee a good signal quality and maximum coverage. Constellation diagrams for each channel, for a more graphical perception of the behavior of each television station are presented.

**Keywords:** TDT measurements, constellation diagrams, TDT Quito, shadow zones.

## 1. INTRODUCCIÓN.

Desde la adopción del estándar de TDT *Integrated Services Digital Broadcasting, Terrestrial, Brazilian version ISDB-Tb* en el Ecuador, en marzo de 2010 [1], la ciudadanía en general ha tenido poca oportunidad de participar en los debates realizados respecto de este tema. Uno de ellos tiene que ver con cuestiones relevantes de la tecnología de TDT, tales como el acceso a la Internet, posibilidad de las características de interactividad y la democratización del espectro radioeléctrico (canalización). Actualmente el proceso de implementación de la TDT en el Ecuador lo viene realizando el Ministerio de Telecomunicaciones MINTEL, con base al Plan Maestro de Transición a la TDT [2], aprobado para este fin y que permitirá la inserción definitiva de la TDT en el Ecuador.

El presente artículo, tiene como objetivo determinar la calidad de la señal de recepción de los canales de TDT en la zona sur de la ciudad de Quito, zona considerada de difícil recepción por cuanto se carece de línea de vista con los sistemas de transmisión ubicados en el Cerro Pichincha.

Como referencia se ha tomado el Barrio Nuevo Amanecer, considerado como zona de sombra dentro del Distrito Metropolitano de Quito. Este documento se estructura en 5 secciones. En la sección 1, se presenta una Introducción sobre el tema de investigación. A continuación en la Sección 2, se presentan un Marco Teórico con las principales características técnicas de la TDT y del estándar ISDB-Tb. Dentro de la Sección 3, se realiza una descripción de los puntos de medición de TDT y de los equipos utilizados para las mediciones. En la Sección 4, se realiza un análisis de las mediciones realizadas y de los resultados obtenidos en el sector de Nuevo Amanecer, Sur de Quito. En la sección 5, se presentan las conclusiones y recomendaciones producto de los resultados de las mediciones. Finalmente, se hace referencia a trabajos similares o documentos utilizados para el desarrollo del presente trabajo.

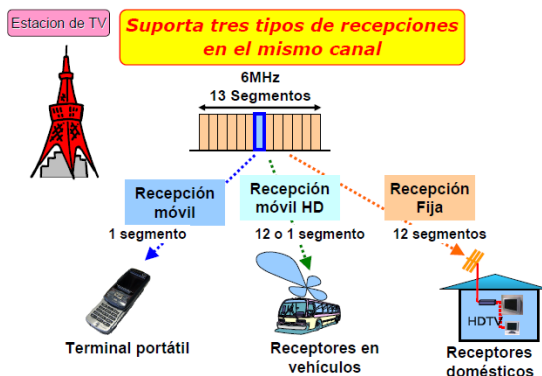
## 2. CARACTERÍSTICAS DEL ESTÁNDAR ISDB-Tb.

Se podría decir que la TDT es la Radiodifusión de vídeo y audio asociado mediante señal digital, que aprovecha las técnicas de procesado, multiplexación y modulación digital. Recomendación ITU-R BT-601-7: Parámetros básicos del sistema de TV digital.

### 2.1 Principales Ventajas de la TDT.

En la Fig. 1, se representan estas ventajas.

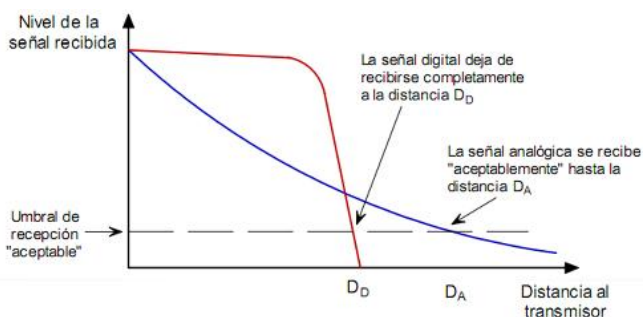
- Mejor calidad de sonido e imagen.
- Alta definición HDTV
- Inmunidad a ruidos.
- Mejor uso del espectro radioeléctrico.
- Menor potencia de transmisión.
- Posibilidad de transmisión de la señal a través de SFN (*Single Frequency Networks*).
- Sonido multicanal.
- Imagen panorámica (16:9).
- Procesado más fácil.
- Técnicas sofisticadas de compresión y edición de vídeo.
- Corrección de errores.
- Recepción móvil y en movimiento.
- Interactividad.
- Servicios multimedia



**Figura 1.** Ventajas de la TDT.

Fuente: *Digital broadcasting experts group (DIBEG)*.

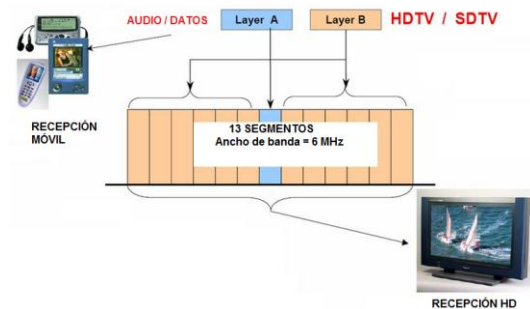
La desventaja de la señal de TDT es que deja de recibirse completamente a una determinada distancia respecto del sitio de transmisión, como se observa en la Fig. 2.



**Figura 2.** Desventaja de la señal de TDT.

Fuente: Fisher W

En los límites de cobertura de una transmisión de TDT los bits de error empiezan a incrementarse, por lo que ha determinada distancia del transmisor el receptor ya no puede corregir los errores y la señal de TDT se pierde totalmente (calidad de la señal baja). La TDT, permite transmitir multiprogramación por el mismo ancho de banda, así en la figura 3, se representa la transmisión de un solo segmento denominada 1seg o *Low-definition television (LDTV)*. *Low-definition television (LDTV)* En los otros 12 segmentos de tiene la posibilidad de tener un canal de señal *High Definition (HD)* y *standard-definition SD*.



**Figura 3.** TDT optimiza el uso de ancho de banda.

Fuente: *Digital broadcasting experts group (DIBEG)*.

### 2.2 Características principales del estándar ISDB-Tb.

- Sistema de televisión digital multiportadora OFDM modulada (QPSK, DPSK, 16-QAM o 64-QAM)
- Transmisión de banda en segmentos.
- Ancho de banda de cada segmento B/14 MHz (siendo B el ancho de banda del canal terrenal de televisión: 6, 7 u 8 MHz).
- Cada segmento puede tener su propio esquema de protección de errores individual y/o tipo de modulación (QPSK, 16-QAM o 64-QAM).
- Cada segmento puede ser combinado de manera flexible para integrar un servicio de banda ancha.
- Integración de distintos tipos de contenidos digitales: datos y multimedia.
- La tasa de datos para un canal de TDT de 5,57 MHz oscila entre 3,65 y 23,23 Mbit/s.

## 3. SITIO DE MEDICIÓN DE LAS SEÑALES DE TDT Y ESPECIFICACIONES DE LOS EQUIPOS UTILIZADOS.

Durante la ejecución de las pruebas de TDT que sirvieron de base para la adopción del estándar ISDB-Tb por parte de Ecuador, se pudo verificar de la existencia de lugares dentro del Distrito Metropolitano de Quito que correspondían a zonas de sombra, sitios en los cuales existía una mala recepción de señales analógicas de televisión, por cuanto no existe línea de vista con sistemas radiantes de transmisión ubicados en el Cerro Pichincha (coordenadas geográficas: 00°10'2.12" N; 78°31'22" W). Debido a la robustez que presenta la señal de TDT, para las mediciones que se realizaron en el mes de agosto de 2014, a los canales de TDT que actualmente operan en la ciudad de Quito, se escogió de entre los puntos antes descritos, el sector de

Nuevo Amanecer, calle Martha Bucarán ubicado en la zona Sur del Distrito Metropolitano de Quito (coordenadas geográficas: 00°17'50.8 S; 78°33'54.5" W). En la Fig. 4, se puede apreciar la representación del diagrama de perfil respecto del sitio de transmisión del sitio de medición denominado Nuevo Amanecer.



Figura 4. Diagrama de perfil del sitio Nuevo Amanecer. Fuente: Software ICS Telecom.

Para realizar las mediciones se utilizó una antena con polarización horizontal, de ganancia 14 dBi, ubicada a 10 metros sobre el suelo, cable con atenuación de 1.5 dB y un equipo analizador de TDT, marca Rohde&Schwarz (R&S), modelo ETH.

Para agosto de 2014, fecha en la que se realizaron las mediciones de TDT, en el Ecuador se tenía ya en operación más de 18 canales de TDT, distribuidos en las ciudades de Quito y Guayaquil. Para el presente estudio, se ha tomado como referencia los 9 canales de TDT que operan en el Distrito Metropolitano de Quito, descritos en la Tabla 1.

Tabla 1. Canales de TDT que operan en Quito.

Canal	Frecuencia Inicial	Frecuencia Final	Portadora Central TDT	Estación
26	542	548	545,14286	ECUADOR TV
30	566	572	569,14286	GAMA TV
32	578	584	581,14286	TELEAMAZONAS
34	590	596	593,14286	RTS
36	602	608	605,14286	ECUAVISIA
39	620	626	623,14286	TV SATELITAL
41	632	638	635,14286	TELESUCESOS
43	644	650	647,14286	RTU
45	656	662	659,14286	CANAL UNO

4. RESULTADOS DE LAS MEDICIONES DE TDT.

5.

Las mediciones de parámetros de calidad de las señales de TDT, fueron realizadas en varios puntos dentro del Distrito Metropolitano de Quito, tomando como referencia las configuraciones mostradas en la Fig. 5, en la que intervinieron parámetros técnicos como: potencia de transmisión, bit rate, intervalo de guarda y FEC, esto con el objeto de poder definir una combinación en la que los parámetros técnicos de operación de los diferentes canales de TDT, permitan garantizar la calidad de su señal.

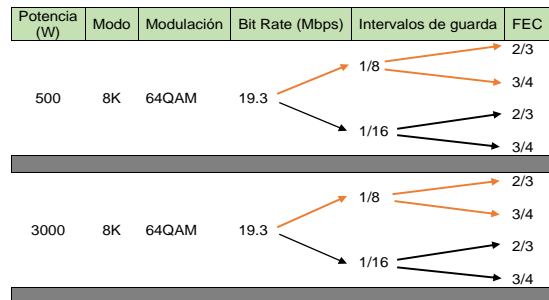


Figura 5. Combinación de parámetros en el transmisor.

4.1 Resultados obtenidos para una potencia de transmisión de 500 W.

En la Fig. 6, se muestra los parámetros de operación del canal 26 UHF Ecuadortv, que dentro de los 6 MHz de ancho de banda transmite señales: 1seg, SDTV y HDTV.

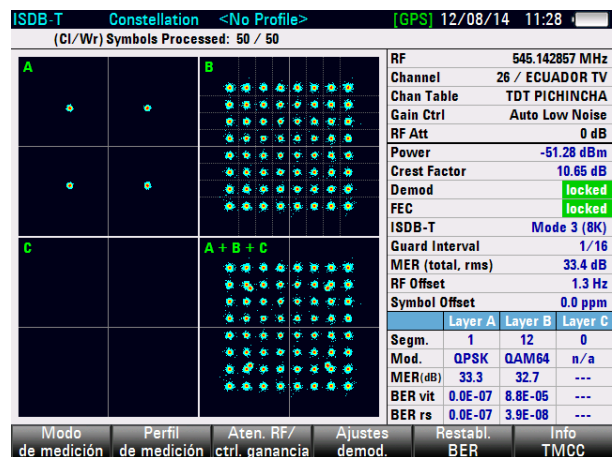


Figura 6. Diagrama de constelación del canal 26.

Existe la presencia de ruido blanco gaussiano (AWGN = Additive white Gaussian noise), con interferencias de baja intensidad, sin embargo todos los símbolos son reconocidos por el demodulador sin errores. Se pueden notar los símbolos con una ligera distorsión.

En la Fig. 7, se muestra la captura de pantalla de los parámetros de operación del canal 30 UHF Gamatv.

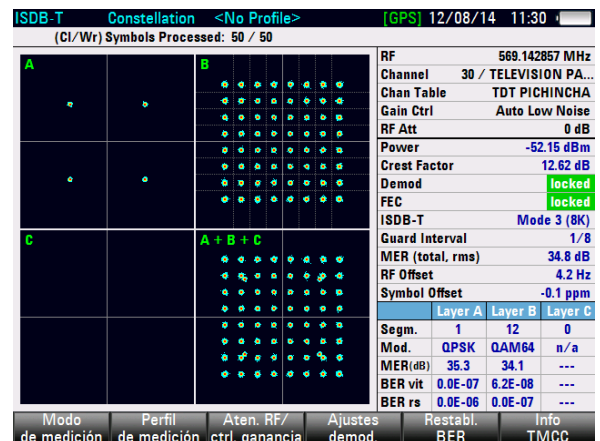


Figura 7. Diagrama de constelación del canal 30.

Ligera presencia de ruido blanco gaussiano aditivo, todos los símbolos son reconocidos por el demodulador sin errores, esto permitió que en este lugar se obtenga una señal de buena calidad.

En la Fig. 8, se presenta la medición del canal 32 UHF Telemazonas, que opera con 3 señales digitales: 1seg, SDTV y HDTV.

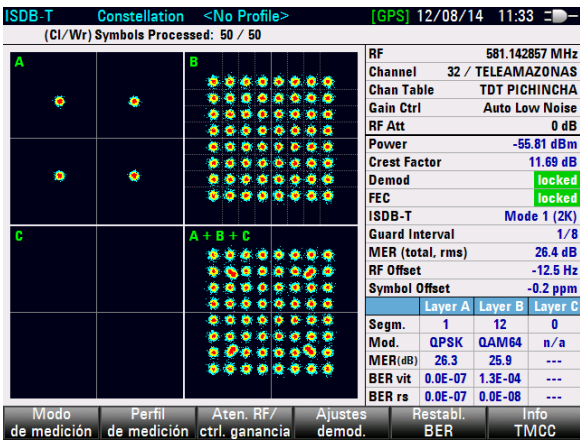


Figura 8. Diagrama de constelación del canal 32.

Existe la presencia de ruido blanco gaussiano (AWGN), con presencia de interferencias de baja intensidad.

En la Fig. 9, el canal 34 UHF Telesistema, se presenta una señal con muchos errores, alto ruido AWGN, haciendo que la etapa de corrección de errores del analizador, no pueda reconfigurar la señal.

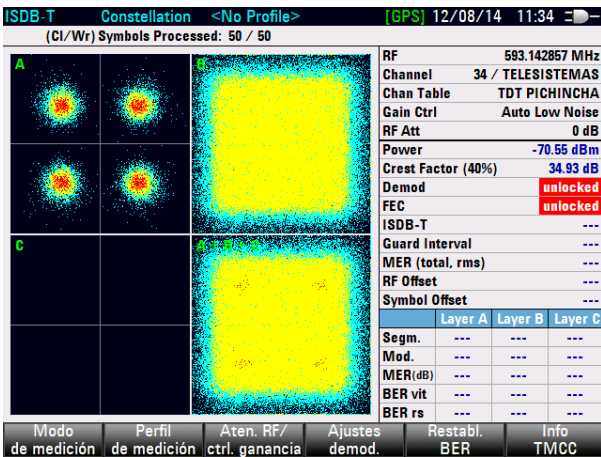


Figura 9. Diagrama de constelación del canal 34.

El canal 34 UHF, presenta un alto nivel de ruido (AWGN) e interferencias, los símbolos no son reconocidos por el demodulador presentando a la salida del receptor de TV una señal sin imágenes.

La Fig. 10, representa la operación del canal 36 UHF Ecuavisa, con problemas en la recepción.

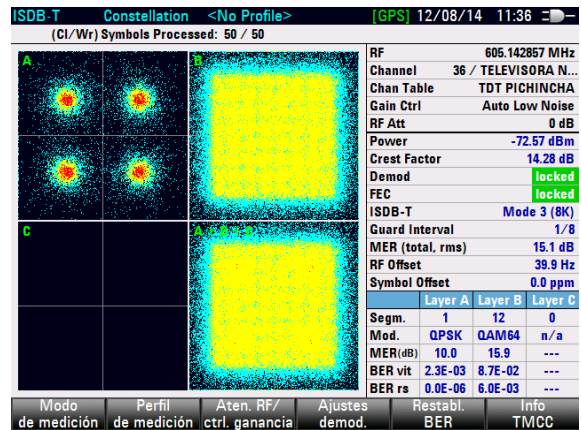


Figura 10. Diagrama de constelación del canal 36.

El canal de televisión Ecuavisa, presenta alto ruido por lo que los símbolos no son reconocidos por el demodulador.

La Fig. 11, que corresponde al canal 39 UHF Televisión Satelital, presenta una ausencia total de la señal.

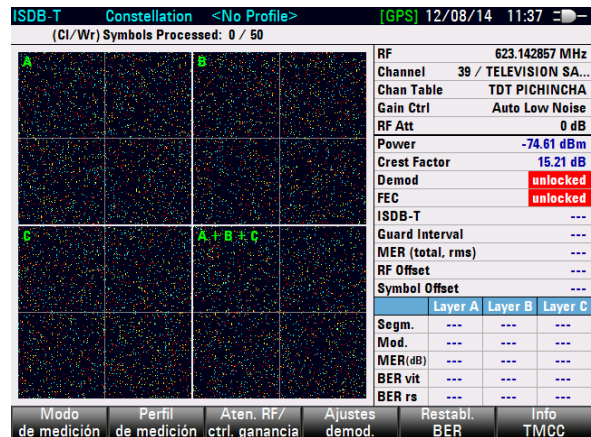


Figura 11. Diagrama de constelación del canal 39.

El canal 39 UHF, presenta una alta tasa de errores ocasionado por un alto nivel de ruido e interferencias.

En la Fig. 12, el canal Telesucesos, la señal 1 seg permanece con pixelaciones, mientras la señal SDTV, presenta baja calidad, con carencia de imágenes.

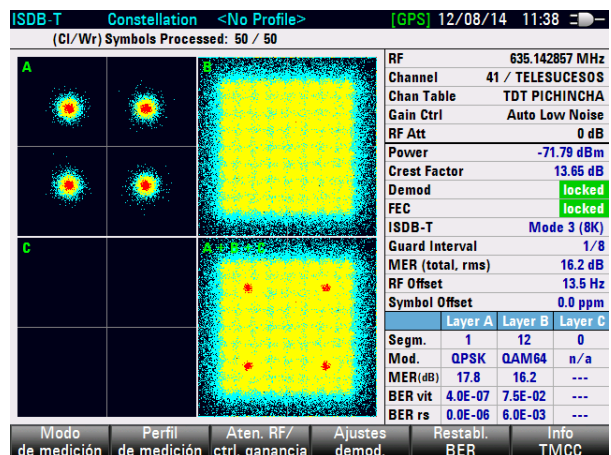


Figura 12. Diagrama de constelación del canal 41.

El canal Telesucesos, tiene una alta tasa de errores

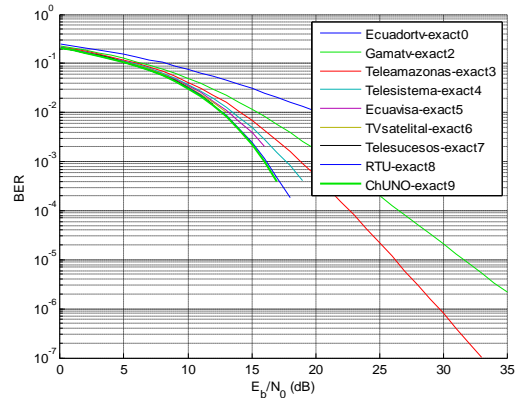
Todas las mediciones presentadas en las figuras anteriores, se cuantifican en la Tabla 2, presentada a continuación.

ESTACIÓN	C/N (dB)	BIT RATE (Mbps)	INTERVALOS DE GUARDA	FEC
ECUADOR TV	29,3	17,84	1/16	3/4
GAMA TV	35,6	....	1/8	3/4
TELEAMAZONAS	33,9	14,97	1/8	2/3
TELESISTEMA	19,5	....	....	....
ECUAVISAS	16,5	16,85	1/8	3/4
TV SATELITAL	13,4	....	....	....
TELESUCESOS	12,7	16,85	1/8	3/4
RTU	18,3	....	1/8	7/8
CANAL UNO	17,1	16,85	1/8	3/4

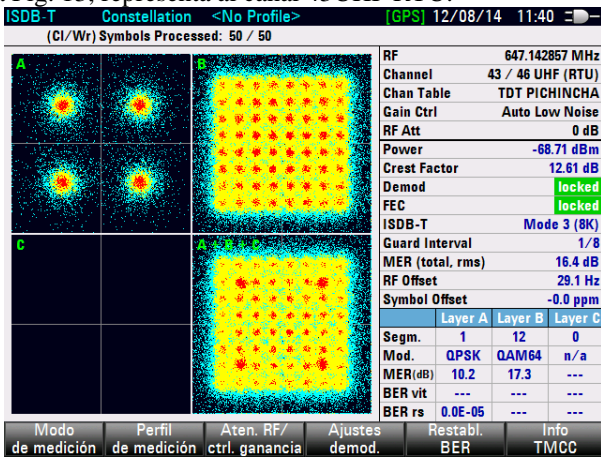
**Tabla 2.** Parámetros con potencia de 500 W, modulación 64QAM.

Los datos de la Tabla 2, son los que presenta en la parte de recepción el analizador de TDT R&S modelo ETH, es por ello que determinados canales no presentan valores en algunos campos. Los datos obtenidos permitieron realizar una comparación en Matlab, representada en la Fig. 15.

ocasionado por la presencia de ruido e interferencias. La Fig. 13, representa al canal 43UHF RTU.



**Figura 15.** Representación en Matlab de BER y Eb/No.



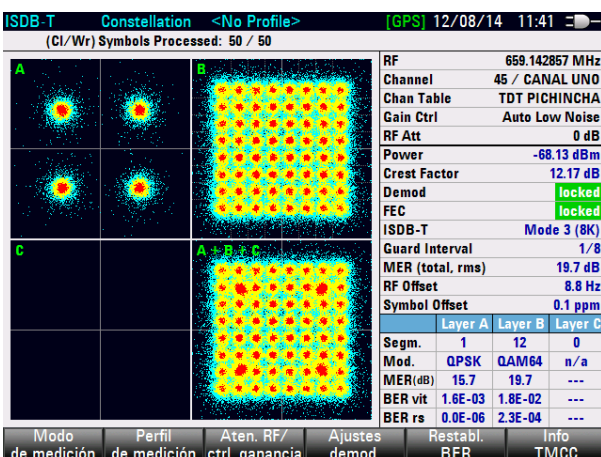
**Figura 13.** Diagrama de constelación del canal 43.

El canal RTU, muestra interferencia perjudicial por un nivel de ruido alto, los símbolos no son reconocidos por el demodulador. Los símbolos contienen perturbaciones. La Fig. 14, representa a Canal UNO Canal 45.

De los resultados obtenidos en el sector Nuevo Amanecer, con los sistemas de transmisión operando con 500 W de potencia, el canal 30 TDT Gamatv, presentó la mejor calidad de señal, en forma subjetiva se podría decir que este canal mostró menores errores, pudiendo los datos ser recuperados.

**4.2 Resultados obtenidos para una potencia de transmisión de 3000 W.**

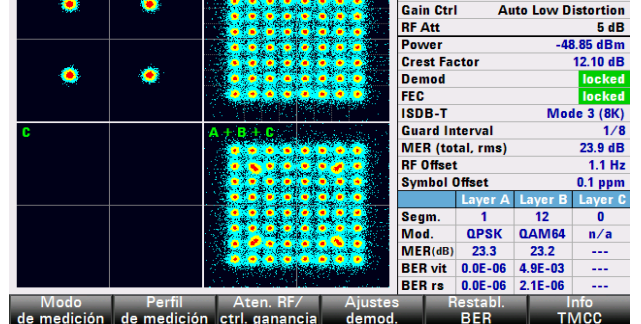
Representación en la Fig. 16, del canal 26 UHF Ecuadortv al operar su sistema de transmisión con 3000 W.



**Figura 14.** Diagrama de constelación del canal 45.

El canal 26 operando con potencia de 3000 W, presenta ruido con señales interferentes, los símbolos son reconocidos por el demodulador pero con errores.

Los parámetros de operación del canal 30 UHF Gamatv, en el sitio Nuevo Amanecer, son representados en la Fig. 17.



**Figura 16.** Diagrama de constelación del canal 26.

La señal de canal UNO, presenta ruido con presencia de interferencias perjudiciales, todos los símbolos son reconocidos por el demodulador con errores, se pueden notar además los símbolos con alta distorsión.



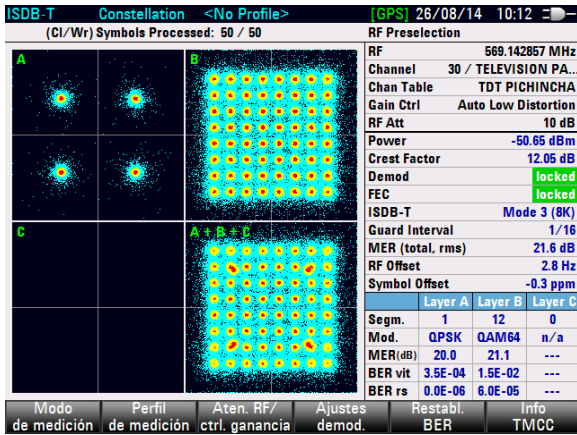


Figura 17. Diagrama de constelación del canal 30.

Se observa la presencia de ruido con señales interferentes, los símbolos son reconocidos con errores.

En la Fig. 18, que corresponde a Teleamazonas Canal 32, se observa la presencia de ruido y los símbolos son reconocidos con errores.

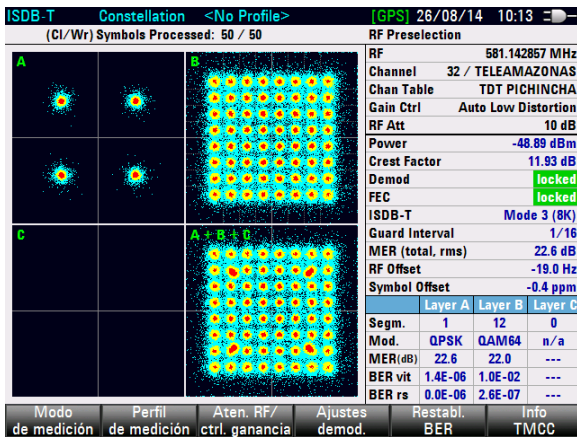


Figura 18. Diagrama de constelación del canal 32.

A continuación se presenta la Fig.19, que representa al canal Telesistema Canal 34.

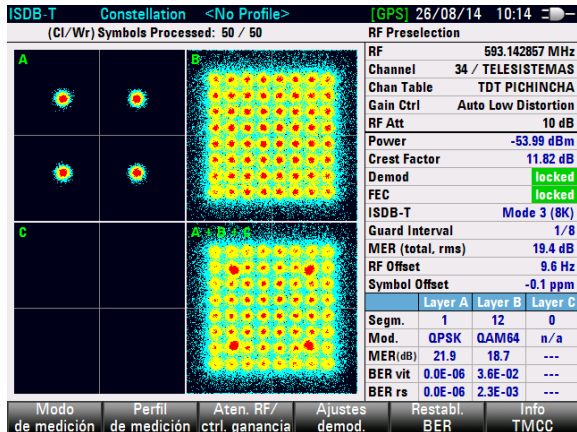


Figura 19. Diagrama de constelación del canal 34.

El canal Telesistema, presenta ruido con señales interferentes, los símbolos son reconocidos por el demodulador con errores.

En la Fig. 20, se puede observar que el canal 36 Ecuavisa, presenta en la recepción baja calidad de señal, lo que se traduce en ausencia total de imágenes.

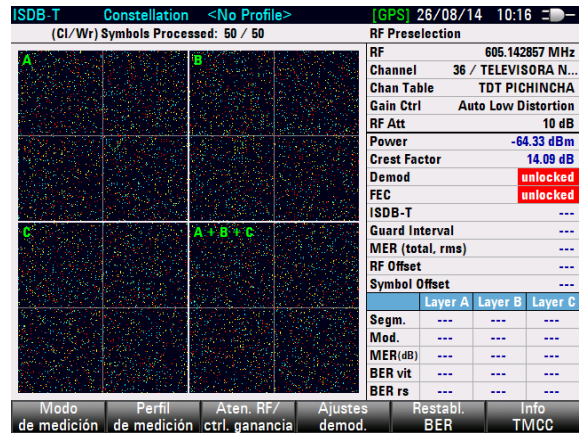


Figura 20. Diagrama de constelación del canal 36.

Existe alta presencia de ruido, con señales interferentes, los símbolos no son reconocidos.

La Fig. 21, el canal Televisión Satelital Canal 39 presenta en la recepción una señal de baja calidad.

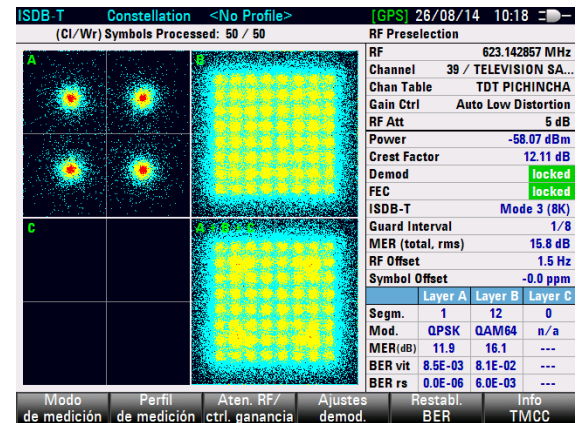


Figura 21. Diagrama de constelación del canal 39.

La señal de Televisión Digital, presenta alta presencia de ruido, con señales interferentes, los símbolos son reconocidos con mucha distorsión.

En el diagrama de constelaciones mostrado en la Fig. 22, se observa que el canal Telesucesos 41 UHF, no presenta imagen alguna en este sector.

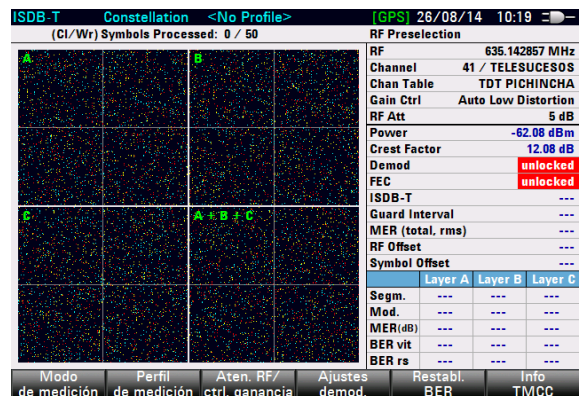


Figura 22. Diagrama de constelación del canal 32.

El canal Telesistema, presenta alta presencia de ruido, con señales interferentes, los símbolos no son reconocidos. RTU Canal 43UHF representado en la Fig. 23, muestra que la señal de este canal presenta problemas en la recepción. La señal 1 seg se presenta con mucha interferencia.

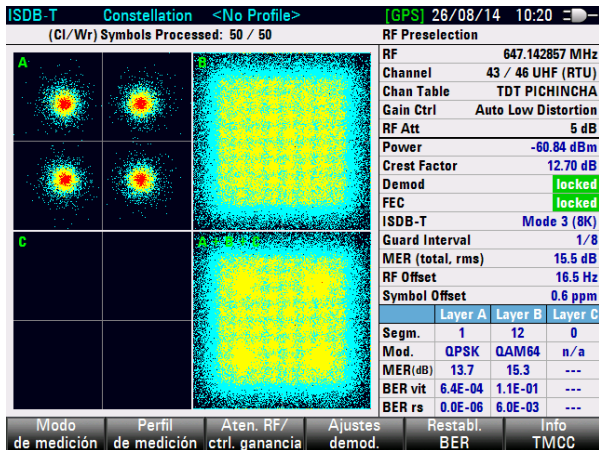


Figura 23. Diagrama de constelación del canal 43.

En la Fig. 24, el diagrama de constelación presentado por la señal del Canal 45 UNO, refiere a una señal con presencia de ruido, por lo que se presentan pixelaciones en la imagen.

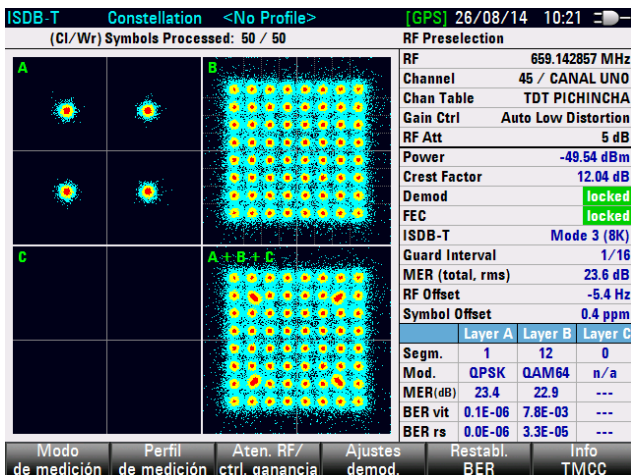


Figura 24. Diagrama de constelación del canal 45.

En la Tabla 3, se resume todas las mediciones efectuadas a los canales de TDT al operar con 3000 W de potencia.

Tabla 3. Parámetros con potencia de 3000 W y modulación 64QAM.

Nombre de la Estación	C/N (dB)	Bit rate (Mbps)	Intervalo de guarda	FEC
Ecuadortv	32.9	17.84	1/16	3/4
Gamatv	42.8	.....	1/8	3/4
Teleamazonas	43.1	14.97	1/8	2/3
Telesistema	38.2	.....	.....	.....
Ecuavisa	23.2	16.85	1/8	3/4
Televisión Satelital	21.3	.....	.....	.....
Telesucesos	17.9	16.85	1/8	3/4
RTU	21.6	.....	1/8	7/8
Canal UNO	31.4	16.85	1/8	3/4

Con los datos obtenidos en la Tabla 3, se realizó una gráfica comparativa en Matlab, Fig. 24, la que permitió observar el comportamiento de los diferentes canales.

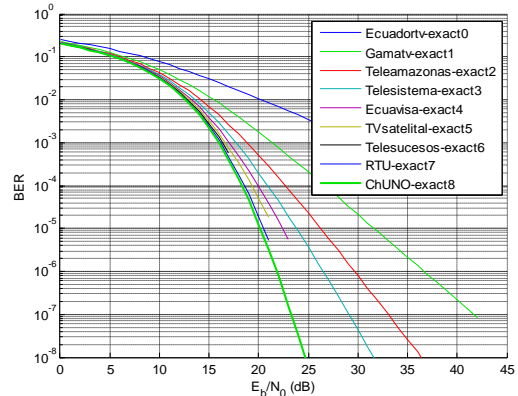


Figura 24. Representación en Matlab de BER vs Eb/No con base a los resultados obtenidos con potencia de 3000 W.

De los resultados obtenidos en el mismo sitio donde se realizaron las mediciones de TDT para una potencia de 500 W, al incrementar la potencia a 3000 W, se pudo notar que el Canal 45 TDT UNO, presenta una mejor calidad de señal, siendo su desempeño técnico superior a los demás canales de Televisión Digital Terrestre. En la Fig. 24, se observa que la señal de Canal UNO, se presenta sin error en más de 25 dB, lo que permite que la señal, comparada con los demás canales presente menor número de errores, siendo estos restaurados en la etapa de corrección de errores.

## 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 Conclusiones.

Algunos de los puntos de medición que fueron identificados como posibles zonas de sombra durante las pruebas de TDT en el año 2009, en las actuales mediciones, fueron cubiertos con el aumento de potencia de transmisión a 3000W, comprobándose la robustez de la señal ISDB-Tb, frente a interferencias por multitrayectoria y atenuación, mediante la utilización de OFDM y Time-interleaving utilizada por este estándar de TDT. La mejora en algunos caso puede deberse a que con la mayor potencia podía llegar hacia el receptor un determinado número de reflexiones radioeléctricas, producto de choque en los diferentes accidentes geográficos cercanos al sitio de medición. Sin embargo existen viviendas que se encuentran fuera de la primera zona de Fresnel y que por más que se aumente la potencia no llegará hasta este sitio, siendo necesario instalar un transmisor de baja potencia (gapfiller) para cubrir esta zona.

El ruido blanco Gaussiano aditivo conlleva a que los puntos de la constelación tengan forma de nube, cuanto más grande sea el punto de la constelación, mayor es el efecto del ruido. Las fuentes de interferencia afectan a las portadoras individuales o al rango de portadoras, estas se pueden parecer al ruido y los puntos de la constelación se vuelven nubes ruidosas, pero también podrían ser sinusoidales cuando los puntos de la constelación aparecen como círculos.

En algunos casos el error permanece aún en niveles altos de Eb/No, lo que se traduce en niveles altos de relación Portadora a Ruido C/N.

Mediante el análisis de un diagrama de constelación se pueden obtener datos de: Relación Señal a Ruido S/N, Convulsión de fase, Desequilibrio de amplitud I/Q, Error de fase I/Q, Tasa de error de modulación MER.

Dentro de la transmisión jerárquica que mantiene el estándar ISDB-Tb se verificó que mientras más altos son los valores de la modulación y del error de corrección menos robusta se presenta la de señal de TDT.

El parámetro Intervalo de Guarda mitiga el efecto multitrayectoria, por ello cuanto mayor es el número de portadoras se puede transmitir en alta definición (HDTV) sin embargo la señal se vuelve más vulnerable a los efectos de multitrayectoria y desvanecimiento.

La comparación de los niveles de potencia de transmisión que utilizan los sistemas de televisión analógica y digital, hace predecir una considerable disminución de los niveles de radiación no ionizante, siendo esto un gran avance en beneficio de la protección del medio ambiente.

La relación C/N representa la diferencia expresada en dB entre la potencia de la señal y el ruido que la acompaña. En televisión analógica una baja relación C/N da lugar a una imagen con ruido, pero en una señal digital el efecto degrada la información, lo que conlleva la aparición de un número mayor de errores, superior al margen de corrección del equipo, dando como resultado final la anulación de la imagen reproducida.

La tasa de errores de bit, es el parámetro principal de las medidas de cuantificación de las instalaciones receptoras, ya que se efectúa sobre el *transport stream* y por tanto, después de la demodulación y la corrección de errores del canal correspondiente. Los errores que presenta en este caso el analizador de TDT, son reales e irre recuperables.

Un código convolucional 1/2 quiere decir que de cada bit de entrada al codificador, salen dos (redundancia del 50%). En recepción, el descodificador convolucional se basará en el algoritmo de Viterbi. Este sistema se puede adecuar a otros códigos: 2/3, 3/4, 5/6, 7/8. La manera de especificar las características del codificador de Viterbi es mediante el FEC (*Forward Error Correction*).

El codificador de Viterbi, a diferencia del codificador Reed-Solomon, garantiza protección a nivel de bit.

La tasa de errores de bit tiene diferentes puntos de medida del sistema de transmisión, fundamentalmente de si el sistema emplea o no codificación Viterbi. Estos son:

BER antes de Viterbi.

BER después de Viterbi, que corresponde a la etapa del decodificador Reed-Solomon.

BER después del decodificador Reed-Solomon.

La tasa de error de mayor interés y que proporciona la mayor parte de información es la tasa de error de bits pre-Viterbi.

## 5.2 Recomendaciones:

En los sitios que fueron identificados como zonas de sombra cuando se realizaron las pruebas de TDT, previas a la decisión del estándar ISDB-T y que se ha comprobado mediante las actuales mediciones que su recepción mejoró

debido al aumento de potencia en los sistemas de transmisión, necesariamente deberán utilizar antenas en el rango de UHF exteriores para su recepción.

## REFERENCIAS

- [1] Informe para la definición e implementación de la televisión digital terrestre en el Ecuador (2010, 26 de marzo). [En línea]. Quito: Superintendencia de Telecomunicaciones. Disponible en: [http://www.supertel.gob.ec/pdf/publicaciones/informe\\_tdt\\_mar26\\_2010.pdf](http://www.supertel.gob.ec/pdf/publicaciones/informe_tdt_mar26_2010.pdf) [2013, 20 de mayo].
- [2] Plan Maestro de Transición a la TDT en el Ecuador (2012). [En línea]. Quito: Consejo Nacional de Telecomunicaciones. Disponible en: [http://www.conatel.gob.ec/site\\_conatel/images/stories/resolucionesconatel/2012/RTV-681-24-CONATEL-2012-PLAN%20MAESTRO-ACTUAL.pdf](http://www.conatel.gob.ec/site_conatel/images/stories/resolucionesconatel/2012/RTV-681-24-CONATEL-2012-PLAN%20MAESTRO-ACTUAL.pdf) [2013, 20 de mayo].
- [3] Bernard G. (1990). *Televisión Práctica y Sistemas de Video*. (5a. ed.). España: Marcombo, S.A.
- [4] Señal de Televisión. (1990). [En línea]. Perú: Universidad San Martín de Porres. Disponible en: <http://www.usmp.edu.pe/visión2011/exposiciones>.
- [5] Fisher W. (2004). *Digital Televisión: A practical Guide for Engineers*. (p. 331 – 363). Munich: Springer-Verlag Berlin Heidelberg Rhode&Schwarz GmbH & Co. ETS300744.
- [6] JAPON. NHK, Japan Broadcasting Corporation. 2008. *ISDB-Tb tecnologías de transmisión y sistemas de alertas de emergencia* (P.14).
- [7] Takada, M. (2008). *ISDB-T Seminario: ISDB-T tecnologías de transmisión y sistemas de alertas de emergencia* (p. 1 -37). Bogota: NHK, Japan Broadcasting Corporation.

# Revisión del Estado del Arte de los Estándares de Codificación y Compresión de Audio MPEG y sus Aplicaciones

Herrera L.\*; Tipantuña C.\*\*

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

e-mail: [luis.alberto.herrera.lara@gmail.com](mailto:luis.alberto.herrera.lara@gmail.com)

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

e-mail: [christian.tipantuna@epn.edu.ec](mailto:christian.tipantuna@epn.edu.ec)

**Resumen:** El presente artículo aborda una revisión del estado del arte de los estándares de codificación y compresión de audio de la familia *Moving Picture Experts Group* (MPEG). Desde los inicios de la era digital, la codificación de señales analógicas de audio en señales digitales y su posterior compresión han sido parte esencial de la actual era de la información. En este contexto, los estándares de codificación y compresión de audio MPEG han logrado una enorme acogida en aplicaciones multimedia, electrónica de consumo, producción de audio, telecomunicaciones, etc. El presente trabajo se enfoca en analizar los fundamentos teóricos de estos estándares así como también sus aplicaciones y los últimos avances en la mejora de los algoritmos usados en estos estándares y sus líneas abiertas de investigación.

**Palabras claves:** MPEG, codificación, compresión, señales analógicas de audio, codificación perpetua

**Abstract:** This article address a review of the state of art of standards of the *Moving Picture Experts Group* (MPEG) Family related to the codification and compression of audio signals. Since the dawn of the digital age, encoding analog audio signals into digital signals and its subsequent compression have been an essential part of the current era of information. In this context, the MPEG audio codification and compression standards have succeeded in multimedia applications, electronic consumer applications, audio production, telecommunications, etc. This paper focuses on analyzing the theoretical foundations, well as the applications and the latest developments in improving the algorithms used in these standards and their open research lines.

**Keywords:** MPEG, codification, compression, analog audio signals, codificación perpetua

## 1. INTRODUCCIÓN

Las técnicas de codificación de audio han sido y siguen siendo parte esencial de la actual sociedad de la información. Sin estas herramientas sería imposible imaginar los actuales avances aplicaciones multimedia, difusión de video, televisión digital, telecomunicaciones, entre otras. El objetivo principal de estos algoritmos es convertir señales analógicas de audio a formato digital garantizando la fidelidad de estas señales digitales con respecto a su original analógica. En este sentido, el desarrollo y mejoramiento de técnicas de codificación de audio así como también nuevos algoritmos y metodologías han suscitado el interés de muchos centros de investigación y universidades en donde expertos en codificación de audio trabajan en optimizar estas herramientas a fin

de conseguir resultados de alta fidelidad en la codificación de señales de audio analógicas en información digital [1–4].

El proceso de codificación de señales de audio analógicas en señales digitales consta básicamente de dos etapas fundamentales: el muestro y la cuantificación. En la etapa de muestreo se toma un conjunto de valores finito en el tiempo, a lo cual se conoce también como discretización de señales continuas. En esta etapa es necesario aplicar el teorema de *Nyquist* [4–6], el cual exige que para el proceso de discretización, que la frecuencia de toma de estos valores debe ser el doble o superior a la frecuencia de la señal discretizada para evitar los efectos de aliasing. En la etapa de cuantificación se representan los valores de la etapa de discretización con un cierto número de bits por muestra, donde reside el objetivo

Artículo recibido el XX, 2014; revisado XX Julio de 2014. (Escriba la fecha en que presento su documento para su revisión).

central de las técnicas de codificación de audio [5].

La etapa de cuantización como tal controla la fidelidad y tamaño del audio codificado en formato digital. En los inicios de la codificación de audio en señales digitales el método más popular a usar fue la Modulación por impulsos codificados (*Pulse Code Modulation - PCM*), donde la señal muestreada era cuantizada de manera uniforme. Este esquema dio origen a los primeros dispositivos de telefonía digital con señales discretizadas a  $8[kHz]$  y la música disponible en discos compactos con señales discretizadas a  $44.1[kHz]$ . En el caso de la música de audio con codificación para señales de audio estereofónicas se genera una tasa total de  $1.4[Mbits]$ , donde se puede apreciar ya, que para transmitir esta información en este formato se necesitaría un ancho de banda enorme. Este es el motivo central que promueve los esfuerzos de investigación en la optimización e innovación de algoritmos para la codificación de audio digital, la optimización del ancho de banda para la transmisión de información, en este caso, esto se traduce en reducir la información digital de las señales de audio codificadas a las mínimas necesarias garantizando la fidelidad de estas con respecto a sus originales analógicas [6, 7]. Gracias a esto es que hoy en día se disponen de servicios multimedios de transmisión de audio y video de gran fidelidad en redes de computadoras, transmisiones inalámbricas e internet [3-6].

En este trabajo se presenta una revisión introductoria a los Estándares de Codificación y Compresión de Audio *Moving Picture Experts Group* (MPEG) y sus Aplicaciones desde un punto de vista teórico - aplicativo. En la siguiente sección se analizan los principios sobre los cuales se definen los algoritmos usados en los estándares MPEG, luego en la siguiente sección se analizan las principales características y aplicaciones de los estándares MPEG-1, MPEG-2 y MPEG-4. También se presentan brevemente los algoritmos MPEG adicionales a los analizados. Luego se enumeran las principales líneas de investigación abiertas en el campo de la codificación de audio. Finalmente se anexan las conclusiones derivadas de la realización de este trabajo.

## 2. PRINCIPIOS BÁSICOS DE CODIFICACIÓN Y COMPRESIÓN DE AUDIO

La codificación de audio en la cual se basan los estándares MPEG se fundamenta en la filosofía de optimización de las señales digitales a través de la eliminación selectiva de las secciones de la señal de audio analógicas, las cuales son inaudibles para el oído humano. A estos criterios se los denomina también como técnicas de

codificación perceptual, ya que codifican solamente lo que es perceptible para el oído humano. La codificación perceptual se basa en los siguientes principios, el modelo psicoacústico (descripción físico - matemática) del oído humano, bandas críticas, el enmascaramiento temporal, el enmascaramiento frecuencial y finalmente la entropía perceptual. Estos conceptos son abordados a continuación en las siguientes subsecciones.

### 2.1 Umbral de Percepción del Oído Humano

El modelo psicoacústico de la percepción del oído humano fue definido por Fletcher en 1940. Este modelo muestra la capacidad de percepción del oído humano a sonidos de distinta frecuencia e intensidad o presión sonora en ambientes silenciosos [1, 2].

La Ecuación (1) describe la percepción del oído humano a valores de frecuencias  $f$ ,

$$T_a(f) = 3.64 \left( \frac{f}{1000} \right)^{-0.8} - 6.5e^{-0.6 \left( \left( \frac{f}{1000} \right) - 3.3 \right)^2} \dots \dots + 10^{-3} \left( \frac{f}{1000} \right)^4 \text{ [dB SPL]} \quad (1)$$

donde  $T_a(f)$  es el nivel de energía máximo permitido para las distorsiones producidas en la codificación de las señales de audio. Es decir, en cada frecuencia niveles mayores de intensidad de sonido a los descritos por la ecuación (1) dificultarían una correcta percepción de las señales de audio analógicas codificadas limitando así la fidelidad de las señales digitales con respecto a estas. En la práctica no se dispone de la información relativa a la intensidad de audio de las señales a codificar por lo que se asume que el nivel más bajo de la señal analógica a digitalizar es aproximadamente en  $4[kHz]$ , al cual se le asigna un nivel de amplitud de  $\pm 1[bits]$  de amplitud de voltaje, como nivel referencial para los reproductores de audio y sistemas de control de volumen [1, 2].

### 2.2 Bandas críticas

Las bandas críticas se definen como los rangos de frecuencias en los cuales la percepción del oído cambia abruptamente. Este fenómeno es característico en el funcionamiento de los sistemas sensoriales del oído y ocurre cuando se somete al oído a un primer tono el cual estimula un área determinada de sensores de audición, luego un tono adicional logra estimular un área mayor de sensores de audición, la cual incluye a la primera área estimulada. Dicho proceso de sobrelapamiento en la estimulación nerviosa opaca e incluso bloquea al

primer tono volviéndole inaudible, a pesar de que se eleve la intensidad de este con respecto al segundo tono, imposibilitando que el cerebro pueda distinguir dos tonos de frecuencia diferentes en la misma banda crítica.

Este fenómeno muestra que para el cerebro es más fácil distinguir tonos en baja frecuencia antes que en alta frecuencia. Las bandas críticas se estrechan en bajas frecuencias y agrandan en altas frecuencias debido a la fisiología del oído [1, 2]. Este proceso también puede ser interpretado como un banco de filtros muy solapados, en el cual las respuestas en cada banda crítica son asimétricas en amplitud y dependientes de la intensidad de la señal sonora. El ancho de banda de cada banda crítica es además no uniforme y se incrementa de forma no lineal con la frecuencia.

Para estimar el ancho de banda ( $BW_c(f)$ ) de cada banda crítica se usa la Ecuación (2),

$$BW_c(f) = 25 + 75 \left[ 1 + 1,4 \left( \frac{f}{1000} \right)^2 \right]^{0.69} \quad (2)$$

donde  $BW_c(f)$  se mantiene constante para rangos de  $100[Hz] - 500[Hz]$  aproximadamente y luego se incrementa alrededor de 20% en cada frecuencia central para valores superiores [8].

### 2.3 Enmascaramiento en temporal y frecuencial

Los fenómenos de enmascaramiento se producen cuando el oído está expuesto a dos o más sonidos simultáneos, donde uno de estos sonidos enmascara a los otros volviéndolos inaudibles. En la práctica, el nivel de intensidad de los sonidos del escenario descrito decidirá que sonido es audible y que sonido es perceptiblemente inaudible debido a este fenómeno de enmascaramiento, los sonidos más débiles enmascarados por los más fuertes. Existen dos tipos de enmascaramiento, el enmascaramiento temporal y el enmascaramiento frecuencial [1-3].

El enmascaramiento temporal se produce cuando un tono débil se encuentra cercano en el dominio del tiempo a un tono fuerte. La posición del tono débil define a su vez dos escenarios distintos, en los cuales este fenómeno se desarrolla de forma similar, el post-enmascaramiento y el pre-enmascaramiento. En el post-enmascaramiento si el tono débil llega luego del fuerte, el tono fuerte enmascarará al tono débil. En el pre-enmascaramiento en cambio, si llega primero el tono débil antes que el fuerte, el tono débil quedará igualmente enmascarado por el fuerte [2, 3].

En el fenómeno del enmascaramiento frecuencial en cambio pueden producirse dos casos en función de la intensidad sonora. En el primero los sonidos de baja frecuencia enmascaran a los sonidos de alta frecuencia y a su vez el caso contrario donde los sonidos de alta frecuencia enmascaran a los sonidos de baja frecuencia. Normalmente se produce el primer caso, ya que los tonos de alta frecuencia necesitarán una intensidad sonora considerablemente alta para poder enmascarar sonidos de baja frecuencia [2, 3]. En base a los fenómenos de enmascaramiento temporal y frecuencia, los algoritmos de codificación de audio deciden que parte de la señal analógica digitalizada codificar y que parte de esta señal descartar, ya que igualmente si se la codificará, esta sería inaudible para el oído humano [1-3].

### 2.4 Entropía Perceptual

La Entropía Perceptual (EP) combina el concepto clásico de entropía con los principios psicoacústicos básicos para evaluar los límites de comprensión de los segmentos de audio codificados. En otras palabras, evalúa hasta qué límite es posible reducir la cantidad de información para que el cerebro pueda decodificar la información presente en el segmento de audio que se produzcan errores de comprensión [1, 2].

El proceso de estimación de la EP se realiza de la siguiente manera: la señal de audio analógica es primeramente inventanada y transformada al dominio de la frecuencia, en donde se aplican los enmascaramientos en base a las reglas del modelo psicoacústico. Luego se determinan el número de bits de resolución requeridos para la inyección de una señal sin ruido de procesamiento. La entropía perceptual es medida construyendo un histograma sobre muchas ventanas, escogiendo el peor caso para la actual medición [1, 2]. La unidad de medición de la EP es  $\left[ \frac{\text{bits}}{\text{muestra}} \right]$ , misma que viene expresada por la Ecuación (3).

$$PE = \frac{1}{N} \sum_{f=f_m}^{f=f_M} \max \left( 0, \log_2 \frac{S(f)}{\text{umbral}(f)} \right) \quad (3)$$

donde  $f_m$  es la frecuencia inferior mínima y  $f_M$  es la frecuencia superior máxima,  $N$  el número de componentes frecuenciales entre  $f_m$  y  $f_M$ ,  $S(f)$  es la densidad espectral de potencia de la señal y  $\text{umbral}(f)$  es el umbral estimado de enmascaramiento [8].

## 2.5 Tipos de codificadores

En base a los principios descritos en las sub-secciones anteriores existen las siguientes familias de codificadores: codificadores de transformación de componentes, codificadores en el dominio del tiempo, codificadores de bancos de filtros, codificadores de predicción lineal predictiva (LPC) y codificadores híbridos. Los codificadores de transformación se usan en sistemas de audio de alta fidelidad debido a su alta resolución de análisis espectral y temporal. Los codificadores de sub-banda en cambio optimizan la compresión de la señal en base a los principios psicoacústicos descritos anteriormente y a las redundancias estadísticas. Los codificadores adicionales funcionan mezclando las características de los codificadores de transformación y de sub-banda, a excepción de los basados en algoritmos de LPC, donde la codificación se hace modelando la señal de audio analógica digitalizada como una combinación lineal de muestras más una señal de error [1,2].

## 3. ESTÁNDARES MPEG

Los estándares MPEG de codificación y compresión de señales analógicas de audio basan su funcionamiento en los principios de codificación perceptual descritos anteriormente. La aplicación de de estos principios a los actuales algoritmos involucrados en los estándares MPEG se realiza de la siguiente manera. El modelo psicoacústico determina el máximo valor permisible de cuatización en bits para evitar introducir ruido en la señal codificada, así como también las secciones de la señal analógica a cuantificar que tienen características inaudibles al oído humano. Luego se realizan los enmascaramientos de los sonidos inaudibles en función de los parámetros determinados por el modelo psicoacústico. La siguiente etapa es normalizar la señal cuantizada y normalizarla, luego se identifican los tonos del modelo de enmascaramiento, para luego decimar y reorganizar estos marcadores. Finalmente se recalculan los coeficientes de los umbrales de enmascaramiento global [5-7, 9, 10]. La arquitectura básica de un codificador perceptual se define entonces por el análisis en el dominio tiempo - frecuencia, el modelo perceptual estimado, las etapas de cuantificación y codificación y el entramado de bits [8].

Los estándares MPEG poseen una arquitectura asimétrica en cuanto a la codificación - decodificación como tal, ya que la estructura del codificador presenta un grado de complejidad mayor que el decodificador. El objetivo de esto es claro, una vez codificadas las señales de audio analógicas, reproducirlas, es decir decodificarlas debe ser barato, lo cual vuelve a estos algoritmos altamente atractivos desde el punto de vista

comercial en aplicaciones relacionadas con la electrónica de consumo [6, 7, 9, 10]. Para la etapa de codificación, la señal de audio a aplicar al codificador MPEG debe estar en formato PCM en frecuencias de  $32[kHz]$ ,  $44.1[kHz]$  o  $48[kHz]$  con 16 bits de resolución por muestra. Debido a que es impráctico limitar la longitud de la señal a codificar, esta es dividida en tramas cuya duración se define como  $t_{trama} = \frac{1000}{f_m} \times m_{trama}$ , donde  $t_{trama}$  es el tiempo de duración de cada trama<sup>1</sup>,  $f_m$  la frecuencia de muestreo de la señal analógica y  $m_{trama}$ , el número de muestras de cada trama, lo cual dependerá de los algoritmos usados en la arquitectura del codificador [9, 10]. Un codificador MPEG funciona de la siguiente manera, la etapa de banco de filtros separa la señal de audio analógica en las bandas críticas, luego se evalúan los efectos psicoacústicos y se elimina la información irrelevante. La información relevante es luego codificada en la etapa de asignación de bits. Finalmente la etapa de codificación de trama formatea usando algoritmos de codificación como Huffman o Ziv-Lempel además de controlar el flujo de bits de la señal codificada, añadir información sobre el autor, códigos de acceso, marcas de agua para protección de derechos de autor, entre otras posibilidades [5-7].

El decodificador por su parte posee un arquitectura más sencilla en comparación al codificador. En el decodificador solamente se extrae la información formateada en el codificador, se extraen las bandas de la señal digital, se las reconstruyen por separado y finalmente se las unen para formar la señal de audio a reproducir. La codificación de audio como tal constituye solamente una parte de los estándares MPEG, dentro de la cual destacan los estándares MPEG-{1, 2, 3, 4}. En las siguientes subsecciones se describen los fundamentos básicos, características y aplicaciones de estos estándares.

### 3.1 MPEG-1

El estándar MPEG-1 también conocido como *ISO/IEC 11172*, es el primero de la familia de los estándares MPEG, el cual codifica imágenes en movimiento y audio (video) en velocidades generalmente de hasta  $1.5[Mbits]$ , aunque el estándar permite alcanzar velocidades más altas. Este estándar está estructurado en tres modos de funcionamiento y de complejidad creciente.

En *MPEG-1 Layer - 1* y *MPEG-1 Layer - 2* con velocidades de codificación de  $192[kBs]$  y  $128[kBs]$  para canales monoaurales y a  $384[kBs]$  y  $192[kBs]$  para canales estéreo [8]. La capa 1 y 2 presentan las siguientes

<sup>1</sup>En aplicaciones prácticas estos valores se encuentran en el rango de  $2[ms]$  a  $50[ms]$ .

características comunes: en la entrada de los datos, para agruparlos, se usa segmentación fija, luego de la segmentación se usan bancos de filtros polifásicos para dividir la señal analógica de audio en 32 sub-bandas. La asignación de bits se hace a partir del modelo psicoacústico del codificador. Finalmente la cuantización se hace en compasión de bloques y se añade un codificador de trama. La capa 2 realiza operaciones más optimizadas que la capa 1 debido a los valores de asignaciones de bits, para la capa 1 de  $\{0, 2, \dots, 15\}$  [bits] y en la capa 2 de  $\{3, 5, \dots, 7, 9\}$  [niveles] de cuantización, lo que reduce la velocidad de codificación optimizando la transmisión de audio codificado usando esta capa [8].

Este estándar incluye al formato *MP3*, denominado formalmente como *MPEG-1 Layer - 3* [6, 7, 9, 10]. *MP3* codifica a velocidades de  $64[kBs]$  en canales monoaural y a  $128[kBs]$  en canales estéreo. La capa 3 del estándar *MPEG-1* combina características de la capa 2 con codificación *Huffman* estática. A diferencia de las capas anteriores, en la capa 3 se usan filtros híbridos conmutados con resoluciones de  $\{576, 216, 192\}$  [lineas], cuantización no uniforme y tratamiento del ruido usando análisis por síntesis [8].

Sus principales aplicaciones de este estándar están orientadas a codificar imágenes en movimiento y audio en discos compactos en formatos de *Video CD*, *SVCD* y en baja calidad para *Video DVD*. También fue usado en aplicaciones relacionadas con televisión digital y televisión satelital.

### 3.2 MPEG-2

*MPEG-2* también conocido como *ISO/IEC 13818*, se define como un estándar mucho más amplio y de mayor atractivo para la codificación de video a velocidades de  $4 - 10[Mbits]$ . Ese estándar fue y es usado aun en la actualidad en la emisión de televisión digital de consumo masivo, cuya calidad es comparable con los sistemas analógicos *Phase Alternating Line - PAL*, *Sequential Color with Memory - SECAM*, *Over-the-Air Televisión Digital - ATSC*, *Digital Video Broadcasting - DVB*, *Integrated Services Digital Broadcasting - ISDB*, y *National Television System Committee - NTSC* [5-7, 9]. En comparación al estándar *MPEG-1*, este estándar presenta dos mejoras importantes: la codificación multicanal compatible hacia atrás *MPEG-2 BC* y el estándar derivado *MPEG-2 Advanced Audio Coder MPEG-2 - AAC*. *MPEG-2 BC* cambia los canales *L* y *R* (derecho e izquierdo) del estándar *MPEG-1* por los canales  $L_C$  y  $R_C$ , los cuales vienen definidos por las expresiones 4 y 5,

$$L_C = \frac{1}{1 + \frac{1}{\sqrt{2}} + a} \left[ L + \frac{C}{\sqrt{2}} + a \times L_S \right] \quad (4)$$

$$R_C = \frac{1}{1 + \frac{1}{\sqrt{2}} + a} \left[ R + \frac{C}{\sqrt{2}} + a \times R_S \right] \quad (5)$$

donde  $L_C$  y  $R_C$  son codificados finalmente usando el mismo estándar *MPEG-1*. El factor  $a$  puede tomar valores de  $\left\{ \frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2\sqrt{2}}, 0 \right\}$ , por lo que este estándar puede reproducir audio digital de buena fidelidad a partir de una señal multicanal. En *MPEG-2 BC* se mantienen los mismos formatos de trama que en *MPEG-1*, los canales  $\{C, L_S, R_S\}$  se transmiten en campos auxiliares de la trama *MPEG-1* [1, 2, 8].

Para el caso de *MPEG-2 AAC* se elimina la compatibilidad hacia atrás y se introducen nuevos servicios estéreo multicanal. Este estándar presenta características adaptables al hardware de reproducción variando los recursos del canal y la calidad de reproducción deseada dependiendo del perfil de hardware disponible. El estándar recomienda la combinación de las siguientes herramientas: banco de filtros usando la transformada discreta de coseno levantado, estimación temporal del ruido, predicción como técnica de reducción de redundancias, escalamiento, cuantificación, codificación sin pérdidas usando códigos *Huffman* y el modelo psicoacústico similar al modelo 2 del estándar *ISO/IEC 11172-3* [1, 2, 8].

### 3.3 MPEG-3

El estándar *MPEG-3* no tuvo tanto éxito ni acogida como las versiones  $\{1, 2, 4\}$ , ya que presentaba redundancias con el estándar *MPEG-2*. Originalmente presentaba características escalables y de compresión multi-resolución orientado a aplicaciones de compresión de señales de video para televisión de alta definición con tasas superiores a  $10[Mbits]$  [6, 7].

### 3.4 MPEG-4

*MPEG-4* también denominado formalmente como *ISO/IEC 14496*. Este estándar mejora la codificación de la información a través del uso de algoritmos de compresión de mayor complejidad logrando así mayores radios de compresión que el estándar *MPEG-2*. Mas que un estándar *MPEG-4* es un conjunto de herramientas para aplicaciones de audio, voz y aplicaciones de sintetización de texto a voz, las cuales permiten realizar manipulaciones del sonido y composición *3D*, escalabilidad y procesamiento de efectos especiales, entre otros.

Este estándar está orientado mayoritariamente a aplicaciones multimedia para ordenadores para producción, distribución y acceso al contenido en televisión digital,



aplicaciones gráficas interactivas, aplicaciones multimedia, difusión de televisión en redes IP, dispositivos portátiles de juego, plataformas móviles de comunicaciones y entretenimiento, difusión de audio y video en internet, videoconferencias y difusión de radio y televisión satelital. La gran innovación de este estándar es convertir al decodificador de la información en un procesador de renderizado usando la información formateada para la descripción de formas tridimensionales y de textura de superficie. Se mejoran también los mecanismos de protección de propiedad intelectual, aplicaciones multimedia interactivas en ambientes Java. Las velocidades de codificación de este estándar rondan los  $64 - -256[kBits]$  [6, 7, 9–11].

### 3.5 Estándares MPEG Adicionales

Adicionalmente a los estándares descritos en la sección anterior existen variaciones y extensiones de los mismos que los complementan en sus aplicaciones en la codificación de audio y video. En [2, 7, 9–11, 15]

- *MPEG-7*, estándar usado en la descripción y búsqueda de audio digital.
- *MPEG-21*, estándar usado en Aplicaciones Multimedia.
- *MPEG-A*, estándar usado para aplicaciones específicas en formatos especiales de audio y video.
- *MPEG-B*, agrupa un conjunto de sistemas de estándares usados en aplicaciones específicas.
- *MPEG-C*, agrupa un conjunto de sistemas de estándares usados en aplicaciones de video.
- *MPEG-D*, agrupa un conjunto de sistemas de estándares usados en aplicaciones de audio.
- *MPEG-DASH*, estándar usado para la difusión de video en internet.
- *MPEG-E*, un estándar (M3W) que provee el soporte para la descarga y ejecución de aplicaciones multimedia.
- *MPEG-H*, estándar usado en aplicaciones de codificación de video de alta eficiencia.
- *MPEG-M*, estándar usado en módulos de dispositivos móviles con tecnología (PCI) para el empaquetado y reúso de tecnologías MPEG.
- *MPEG-U*, estándar usado en el mejoramiento de la interfaz de usuario.
- *MPEG-V*, estándar usado en el intercambio de datos en realidad virtual.

## 4. LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN ABIERTAS

A pesar que el estado de arte actual de los algoritmos de codificación de señales de audio es altamente superior al mostrado por estos en los orígenes de estas herramientas, existen aun problemas por solucionar y mejoras por desarrollar en cuanto a la optimización de la compresión de la información digital y el mejoramiento de la fidelidad de las señales de audio codificadas. En [1, 9] se analizan varias de las posibles líneas de investigación abiertas en el campo de la codificación y compresión de audio de entre las cuales destacan las siguientes:

- Nuevos Algoritmos de codificación usando bancos de filtros basados en *Wavelets*, *Choi-Williams*, *Zhao-Atlas-Marks*, *Born-Jordan* [12] y *Matching Pursuit* [13, 16–18].
- Esquemas alternativos a la codificación en subbandas, usando esquemas de codificación paramétrica.
- Predicción lineal con excitación por código(CELP) con codificación multimodo, usando códigos *Huffman*.
- Empaquetamiento de códigos usando *Wavelets adaptadas*.
- Codificación de tramas usando transformadas diferenciales(DPAC).

## 5. CONCLUSIONES

- Los algoritmos de los estándares MPEG basan su funcionamiento en los conceptos de codificación perceptual de audio, la cual es una técnica de codificación con pérdidas, donde la cantidad de información se optimiza descartando la información inaudible o imperceptible al oído humano de acuerdo a sus características temporales y frecuenciales (fenómenos de enmascaramiento).
- Los estándares MPEG como tal no poseen una definición estricta que los limite en cuanto a rendimiento, al contrario, son estándares abiertos donde solamente se realizan recomendaciones en cuanto al flujo de bits, para garantizar la compatibilidad entre reproductores de audio y recomendaciones en cuanto a la implementación de codificadores, esto ha permitido fomentar la investigación e innovación en nuevos algoritmos de codificación de audio manteniendo al mismo tiempo la compatibilidad entre codificación y decodificador independientemente de la estructura interna usada.

- Uno de los problemas más complejos en la definición de algoritmos y estándares de codificación es la compatibilidad entre algoritmos. Para esto, MPEG define sus estándares en capas, en donde cada capa define un codificador más sofisticado que el anterior. Los estándares de capa 1 solamente pueden reproducir codificaciones de capa 1, mientras que los estándares de capa 3 pueden reproducir codificaciones de capa 2 y capa 1.
- Los algoritmos de codificación de audio y estándares se encuentran actualmente en un grado avanzado de desarrollo, sin embargo existen aun temas por abordar en la optimización y mejoramiento de los procesos de codificación y fidelidad de las señales de audio.

#### REFERENCIAS

- [1] Painter, T.; Spanias, A., "A review of algorithms for perceptual coding of digital audio signals," Digital Signal Processing Proceedings, 1997. DSP 97., 1997 13th International Conference on , vol.1, no., pp.179,208 vol.1, 2-4 Jul 1997, doi: 10.1109/ICDSP.1997.628010.
- [2] J. Youngquist Robert, "Sampling Frequency Considerations," Journal of the Audio Engineering Society, pp. 54.
- [3] M. Willcocks, "A Review of Digital Audio Techniques," Journal of The AES, Jan-Feb, 1978, Volume 26, pages 56-64.
- [4] Heaslett A., "Some Criteria for the Selection for Sampling Rates in Digital Audio Systems," J. Aud. Eng. Soc., 26: 66, 68, 70, Jan./Feb. 1978.
- [5] Johnston, J.D., "Perceptual Audio Coding - A History and Timeline," Signals, Systems and Computers, 2007. ACSSC 2007. Conference Record of the Forty-First Asilomar Conference on , vol., no., pp.2085,2087, 4-7 Nov. 2007, doi: 10.1109/ACSSC.2007.4487605.
- [6] Spanias, A., Painter, T., Atti, V., *Audio Signal Processing and Coding*, ISBN: 9780470041963, 2006, Wiley Press.
- [7] Brandenburg K., "Mp3 and AAC Explained," AES 17th International Conference on High Quality Audio Coding, 1999.
- [8] Candeas Vera P., *Desarrollo de Técnicas de Codificación de Audio Basadas en modelos de señal paramétricos*, Tesis Doctoral, Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones, Universidad de Alcalá, 2006.
- [9] Rincón Rivera, David. *MP3 : sonido digital al alcance de todos*. "Buran", 1999, núm. 14, p. 4-12.
- [10] Noll, P., "MPEG digital audio coding," Signal Processing Magazine, IEEE , vol.14, no.5, pp.59,81, Sep 1997, doi: 10.1109/79.618009
- [11] Peter Noll, "MPEG Digital Audio Coding Standards, Chapter in: IEEE Press/CRC Press, The Digital Signal Processing Handbook" (ed.: V.K. Madisetti and D. B. Williams), pp. 40-1 - 40-28, 1998
- [12] Manas A., Neha M., *Audio Compression in MPEG Technology*. International Journal of Scientific and Research Publications, Volume 3, Issue 12, December 2013, ISSN 2250-3153.
- [13] Davis Pan. 1995. A Tutorial on MPEG/Audio Compression. IEEE MultiMedia 2, 2 (June 1995), 60-74. DOI=10.1109/93.388209 <http://dx.doi.org/10.1109/93.388209>.
- [14] Peter L. Stanchev. 2011. *Multimedia standards. history. state of art*. In Proceedings of the Third international conference on Future Generation Information Technology (FGIT'11), Tai-hoon Kim, Hojjat Adeli, Dominik Slezak, Frode Eika Sandnes, and Xiaofeng Song (Eds.). Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 39-42. DOI=10.1007/978-3-642-27142-76 <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-27142-76>.
- [15] Brandenburg, K.; Faller, C.; Herre, J.; Johnston, J.D.; Kleijn, W.B., "Perceptual Coding of High-Quality Digital Audio," Proceedings of the IEEE , vol.101, no.9, pp.1905,1919, Sept. 2013 doi: 10.1109/JPROC.2013.2263371.
- [16] Roberto Herrera Lara, Robin Álvarez Rueda, Alexis Andrango Pillajo, "Evaluación de las técnicas tiempo-frecuencia por medio de un equipo de adquisición de datos y un computador". Avances en Ciencias e Ingeniería, 2011, Vol. 3, No. 1, Pags. C33-C39. ISSN 1390-5384 .
- [17] S. G. Mallat and Z. Zhang, "Matching Pursuits with Time-Frequency Dictionaries", IEEE Transactions on Signal Processing, December 1993, pp. 3397-3415.
- [18] X. A. Calderón, C Montenegro, C Mullo, C Samaniego, "Desarrollo de una Aplicación Cliente/Servidor para un Wall View en base a la Plataforma Cruzada Opensource FFMPEG (Colección de Software Libre que puede Grabar, Convertir y hacer Streaming de Audio y Video)", La Revista Politécnica, EPN Journal, Vol. 33, No 3., Enero 2014.

# Análisis de Protocolos de Señalización para la detección de comportamientos irregulares en líneas de telefonía fija, utilizando sondas de señalización

Orquera E.\*; Herrera C.\*\*; Estévez L.\*

\*Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, tano\_1821@hotmail.com),  
\*Corporación Nacional de Telecomunicaciones, e-mail: luis.estevez@cni.gob.ec

\*\*Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica  
Quito, Ecuador (Tel: 593-2-507144; e-mail: carlos.herrera@epn.edu.ec)

**Resumen:** En el sector de las telecomunicaciones, es necesario tratar y gestionar al fraude con la debida importancia, puesto que este hecho produce pérdidas de alrededor del 4.8% del total de ingresos económicos obtenidos por las empresas que brindan estos servicios. Dichas empresas continuamente buscan implementar a sus procesos de gestión diferentes métodos para detectar conductas inusuales por parte de los suscriptores que puedan reflejar potenciales usos indebidos de los servicios o casos de fraude dentro de las telecomunicaciones y que posteriormente se traducen en pérdidas económicas para las empresas.

A consecuencia de lo expuesto surge el presente trabajo con el fin de realizar un control de fraude en telefonía fija a bajo nivel, mediante el análisis y establecimiento de valores umbrales de varios campos de los registros de llamadas conocidos como CDRs, los cuales son obtenidos al sondear protocolos de señalización, específicamente para el caso, SIP y SIGTRAN.

**Palabras clave:** Fraude en telefonía fija, protocolos de señalización, telefonía sobre IP, SIP, SIGTRAN.

**Abstract:** In the telecommunications sector, it is necessary to treat and manage fraud with due weight since this fact produces losses of about 4.8% of the total income obtained by the companies that provide these services. These companies continuously seek to implement different methods to detect unusual behavior by subscribers that may reflect potential misuse of the services or fraud within the telecommunications and subsequently translated in economic losses for enterprises to their management processes.

As a result of the above comes this work in order to perform a fraud control in fixed telephony at low level through the analysis and value thresholds for various fields of call logs known as CDRs, which are obtained to probing signaling protocols, specifically for the case, SIP, SIGTRAN.

**Keywords:** Fraud fixed telephony signaling protocols, IP telephony, SIP, SIGTRAN.

## 1. INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años, el avance tecnológico ha sido el pilar fundamental para proporcionar servicios de telecomunicaciones de alta calidad; en contraste, en el área correspondiente a la telefonía, este avance tecnológico desempeña un papel antagónico ya que permite desarrollar en mayor número y con mayor eficiencia, sistemas de fraude que ocasionan cuantiosas pérdidas a las empresas que prestan dichos servicios.

El objetivo del presente artículo se basa en la descripción de la implementación de un control de fraudes para telefonía fija mediante el análisis de protocolos de señalización.

Actualmente ha tenido una gran acogida la telefonía IP; la cual se basa en comunicaciones telefónicas realizadas a través de redes TCP/IP. La información que se transmite a

través de la red se divide en paquetes de datos, los cuales tienen un encabezado que identifica el origen y el destino, un número de secuencia, un bloque de datos y un código de comprobación de errores. Los enrutadores envían estos paquetes a través de la red hasta que llegan a su destino, en donde se utiliza el número de secuencia para volver a ensamblar en su orden original. Los paquetes de datos comparten un circuito con otras transmisiones a diferencia de la telefonía tradicional, que utiliza un circuito por cada llamada telefónica.

La importancia de la Telefonía IP radica en la reducción los costos de las llamadas (hasta en un 74%), cuyo precio no depende del tiempo de conexión; por lo cual la reducción en costos puede ser considerable, especialmente para las empresas que tienen sucursales en distintas ciudades o países. En la Fig. 1 se puede observar el proceso requerido para el establecimiento de una llamada telefónica IP.

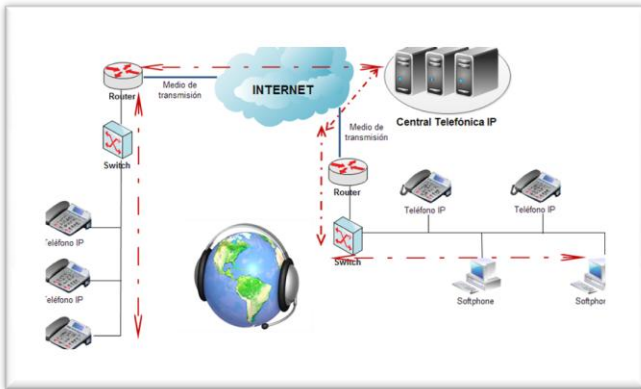


Figura 1. Proceso de llamada IP

## 2. SEÑALIZACIÓN EN TELEFONÍA.

La señalización es el proceso por el cual se realiza la localización de usuarios, establecimiento y negociación de sesiones y la gestión de la red. Las principales funciones de la señalización son: [1]

- Control de tráfico.
- Gestión de la red.
- Acceso a base de datos.

Existen dos diferentes tipos de señalización:

### a) Señalización de abonado.

Es el intercambio de un conjunto de señales entre el usuario y el centro de conmutación. Estas señales son las siguientes:

- Supervisión o estado: permite iniciar el establecimiento, mantenimiento y terminación de la comunicación.
- Dirección: contiene información del destino.
- Tarificación: provee información sobre el costo de la llamada.
- Información al usuario: indica el estado de la llamada

### b) Señalización entre centrales.

Se refiere al intercambio de un conjunto de señales entre centrales. Existen dos diferentes maneras de enviar la señalización:

#### Señalización asociada al canal.

La información de señalización se transmite por el mismo canal por donde se transmite el tráfico de voz. La señalización se transmite mediante un enlace PCM de 32 intervalos de tiempo para el estándar europeo, en donde la señal de línea se envía por el intervalo 16 y las señales de registro se envían por los canales de tráfico de voz.

#### Señalización por canal común.

Consiste en utilizar un mismo canal para enviar la señalización de varias comunicaciones separado del canal de voz. La señalización de canal común es más eficaz y flexible que la que se realiza dentro del canal de voz, dando mayor soporte a los requerimientos de las redes digitales de comunicación.

## 3. PROTOCOLOS DE SEÑALIZACIÓN SIP Y SIGTRAN.

### Protocolo SIGTRAN

SIGTRAN está definido por la IETF en el RFC 2719 publicado en octubre de 1999. Es un conjunto de protocolos que se encargan de transportar señalización de telefonía SS7 sobre redes IP. SIGTRAN describe la manera de presentar la información de SS7 sobre una red de transporte IP, permitiendo una interoperabilidad entre redes IP de nueva generación y redes SS7 ya existentes. [2]

Los protocolos SIGTRAN determinan los medios por los cuales se pueden transportar los mensajes de SS7 de una forma confiable sobre las redes IP. Existen tres componentes de la arquitectura SIGTRAN:

- Capa de red: IP estándar como protocolo de red.
- Capa de transporte: Protocolo de transporte común para la capa protocolar de SS7. Soporta un conjunto común de funciones para el transporte confiable de la señalización.
- Módulo de adaptación: para emular las capas más bajas del protocolo. Existen varios protocolos de aplicación de señalización, tales como: M2PA, M2UA, M3UA, SUA e IUA.

En la Fig. 2 se puede observar las capas correspondientes de la Arquitectura SIGTRAN.

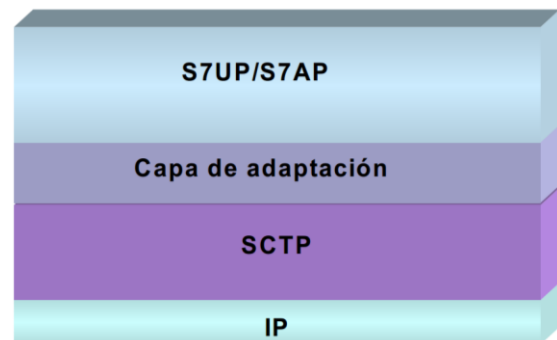


Figura 2. Arquitectura de SIGTRAN

Para obtener los registros de llamadas conocidas como CDRs, se debe analizar cada una de las capas de esta arquitectura. Estos datos son utilizados para posteriormente poder evaluarlos, con el objetivo de identificar posibles fraudes en telefonía.

### Protocolo SIP

SIP es el acrónimo de Protocolo de Inicio de Sesiones; definido en el RFC 3261. Es un protocolo de señalización usado en telefonía y videoconferencia a través de Internet o para comunicaciones que implican datos en tiempo real. SIP fue creado por IETF MMUSIC WorkingGroup para establecer, modificar y finalizar sesiones entre dos participantes, así como también sesiones multicast. Este protocolo está basado en el Protocolo de Transporte simple de correo (SMTP) y en el Protocolo de Transferencia Hipertexto (HTTP). SIP es un protocolo basado en el modelo cliente servidor y ubicado en la capa de aplicación de la arquitectura TCP/IP, se usa para comunicaciones multimedia con otros protocolos como RSVP, RTP, SDP, entre otros.

El protocolo de Inicio de Sesiones es independiente de los protocolos de las capas inferiores, puede soportarse sobre TCP o UDP; además sobre IP, ATM, FrameRelay o X.25.

Los mensajes SIP están en formato de texto plano y utilizan una sintaxis muy similar a la del protocolo HTTP. Estos mensajes pueden ser solicitudes o respuestas y su formato se detalla a continuación para cada uno de estos tipos. [3]

La estructura general que presenta un mensaje SIP contiene las siguientes partes, tal como se indica en la Fig 3.



Figura 3. Formato mensajes SIP

**Línea de inicio.**

Es el comienzo de cualquier mensaje SIP. Esta línea está definida para mensajes de solicitud (línea de solicitud) y para mensajes de respuesta (línea de estado).

**Mensajes de solicitud.**

**Línea de solicitud:** Contiene los siguientes campos como se indica en la Fig. 4.

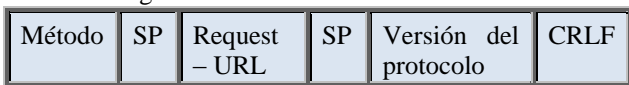


Figura 4. Estructura de línea de solicitud de mensajes SIP

**Mensaje de respuesta.**

**Línea de estado:** Contiene los siguientes campos como se indica en la Fig. 5.

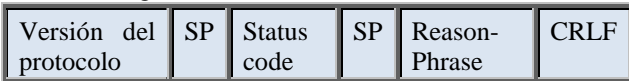


Figura 5. Estructura de línea de estado de mensajes SIP.

**Cabeceras de mensajes SIP.**

Dentro de los campos de cabecera se encuentra información relacionada con la sesión como es: origen de la llamada, tipo de mensaje, trayectoria del mensaje entre otras características.

**Cuerpo del mensaje SIP.**

El cuerpo del mensaje SIP se usa para describir la sesión que va a comenzar; también se lo llama carga útil y puntualiza algunas características específicas como son: versión del códec (normalmente el estructurado en SDP) de video y audio, así como también las frecuencias de muestreo.

En esta estructura de los mensajes SIP, se puede extraer los campos que conforman los detalles de llamada conocidos como CDRs, con el fin de evaluar y detectar fraudes en telefonía fija.

**4. FRAUDES EN TELEFONÍA Y MÉTODOS DE CONTROL.**

En telecomunicaciones, el fraude se determina por conductas ilegítimas que perjudican intereses de abonados y usuarios como cobertura y calidad de servicio. El fraude es el uso deshonesto de servicios de telecomunicaciones donde la persona que lo comete no tiene la intención de pagar por los servicios utilizados.

Existen varios factores que impulsan el cometer fraude en las telecomunicaciones como son: gran avance tecnológico, movilidad de los servicios, convergencia tecnológica determinada por la interconexión de redes mediante la utilización del Internet entre otros.

En la actualidad es de gran importancia el uso de herramientas que permitan controlar el tráfico telefónico para poder identificar conductas inusuales por parte de los

suscriptores, que puedan reflejar potenciales usos indebidos de los servicios o casos de fraude dentro de las telecomunicaciones que posteriormente se traducen en pérdidas económicas para las empresas.

Existen diferentes tipos de fraude en telefonía, entre los cuales se pueden describir los siguientes:

**FRAUDE POR SUSCRIPCIÓN.**

Este tipo de fraude consiste en la falsificación o alteración de documentos, suplantando la identidad de terceras personas con el fin de que los cargos se registren a nombre de ellas. El defraudador realiza el máximo uso posible de la línea telefónica hasta que es suspendida por falta de pago, afectando la imagen de las personas suplantadas, las cuales son registradas como usuarios morosos; aunque la empresa prestadora del servicio es la más afectada por no poder cobrar por el consumo realizado en la línea telefónica.

En una empresa de telecomunicaciones, es importante contar con un departamento que se encargue de la verificación de la veracidad de los datos del suscriptor, previo a la firma del contrato de servicio. Se debe tener un proceso minucioso de validación de información del suscriptor para evitar el fraude por suscripción. En la Fig. 6 se indica el proceso de fraude por suscripción.



Figura 6. Fraude por suscripción.

**FRAUDE CLIP-ON.**

Esta modalidad de fraude ocurre cuando el defraudador sustrae una línea telefónica activa desde la acometida de la red externa o desde el armario para llevarla hacia su domicilio y realizar llamadas, cuyo consumo será cobrado al suscriptor de la línea.

El principal afectado por este tipo de fraude es el suscriptor de la línea telefónica, puesto que debe pagar el consumo realizado por el infractor en el caso de que no se compruebe el fraude. Además la empresa prestadora del servicio se ve afectada en la imagen y en daños provocados en su infraestructura.

Este tipo de fraude se detecta generalmente mediante reclamos realizados por los propietarios de líneas telefónicas robadas, quienes se ven afectados en un incremento considerado de sus facturas. El fraude clip on también es detectado por los especialistas de fraude de las empresas, quienes analizan el tráfico telefónico con el objetivo de encontrar comportamientos atípicos que puedan reflejar un posible fraude por robo de líneas o clip on. [5]

**FRAUDE DE TERCER PAÍS.**

Se lo denomina así porque interviene un tercer país como defraudador, para la comunicación entre los otros dos países. En este tipo de fraude, el defraudador utiliza varias líneas telefónicas para comunicar a dos usuarios de diferentes países mediante un conmutador o una llamada en conferencia. En este proceso, el defraudador en un país Z llama a un destino en un país X, el cual solicita comunicarse con un destino en un país Y, la persona en el país Z marca hacia el destino del país Y y establece la comunicación. El defraudador realiza todas las llamadas posibles hasta que las líneas sean suspendidas por falta de pago, afectando directamente a las empresas proveedoras del servicio. En la Fig. 7 se ilustra el fraude de Tercer País.

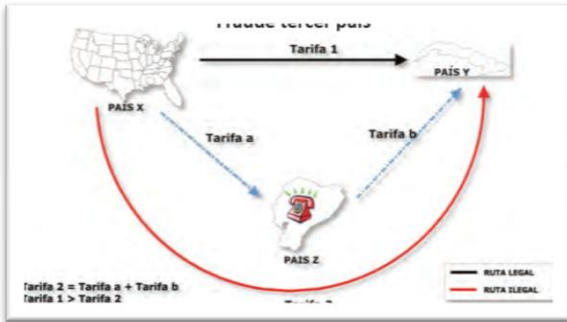


Figura 7. Fraude de Tercer País [5]

Este tipo de fraude se detecta por la presencia de llamadas hacia destinos internacionales atípicos. Cuando se identifica este tipo de llamadas el analista de fraude debe consultar la facturación de la línea que realiza la llamada, así como también analizar el tráfico telefónico que presenta la misma con el fin de determinar un perfil de comportamiento.

#### FRAUDE DE PBX.

Las Centrales Secundarias Privadas conocidas como PBX, son usadas por las empresas para conectarse a la red telefónica pública conmutada. Estas centrales son vulnerables a sufrir ataques por parte de defraudadores que obtienen beneficios económicos al cobrar por llamadas de tráfico nacional, internacional, llamadas a teléfonos móviles entre otras; siendo perjudicadas las empresas propietarias de las PBX que tienen que pagar por las llamadas fraudulentas realizadas. [6]

Este tipo de fraude es factible, ya que las PBX disponen de puertos de acceso remoto conocidos como DISA, estos puertos son usados para que empleados que se encuentran fuera de la empresa puedan realizar llamadas que son cargadas al número del PBX. Los defraudadores conocen las claves para poder acceder a la configuración de la PBX y poder lucrar mediante el uso ilícito de la misma.

En una PBX existe un puerto destinado al mantenimiento remoto, el defraudador logra acceder a este puerto mediante un módem y de esta forma realiza llamadas normalmente registradas en las noches y los fines de semana ocasionando un perjuicio económico directo a la empresa propietaria de la PBX. En la Fig. 8 se indica un ejemplo de este tipo de fraude.

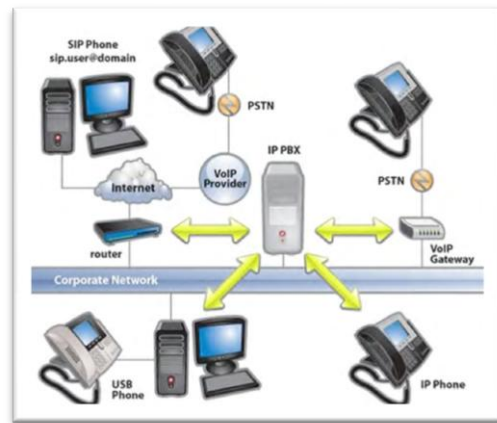


Figura 8. Fraude de PBX

El principal responsable para evitar este tipo de fraude es la empresa propietaria de la PBX, la cual debe tener un control completo de las personas y de las claves de acceso para la configuración de su PBX. Cuando existe un incremento considerable de las llamadas realizadas desde la central de la empresa, es muy importante realizar un análisis de los destinos llamados así como también de los horarios de las llamadas realizadas para lograr detectar el origen de la actividad fraudulenta. Si la empresa no cuenta con personal especializado para la configuración de la PBX, es necesario contratar terceras personas (empresas) para garantizar el correcto funcionamiento y mantenimiento de la central privada.

#### BY PASS

Este tipo de fraude consiste en cursar tráfico internacional de un país A hacia un país B; impidiendo que el mismo pase por las centrales de tráfico internacional y de esta forma registrar en la tarificación una llamada internacional como llamada local. [4] Los sistemas By-Pass son posibles ya que cuenta en su estructura con tres componentes: un enlace internacional, equipos que procesen la voz y un lugar encubierto con un gran número de líneas telefónicas para llevar cada llamada internacional a la central de una red local. En la Fig. 9 se ilustra un sistema Bypass con sus respectivos componentes.



Figura 9. Componentes Sistema ByPass

Existen dos tipos de sistemas By Pass:

- **Entrante:** Es el tráfico internacional que ingresa desde otros países, sin pasar por la central de tráfico internacional.

- **Saliente:** Es el tráfico internacional que sale de un país hacia el exterior. Se lo realiza generalmente mediante la venta de tarjetas de telefonía ilícitas, reventa de minutos, etc.

Para poder detectar un sistema de fraude tipo By Pass, es necesario contar con un departamento de control especializado que se encargue de efectuar un procedimiento llamado “pruebas de lazo”. En este tipo de pruebas, se realiza llamadas (manualmente o automáticamente) desde el país en donde se quiere identificar el fraude, usando para ello tarjetas de telefonía internacional. El objetivo principal de las pruebas de lazo es obtener información acerca del portador (carrier), si la llamada se la realizó legalmente el número identificado será un carrier legalmente establecido; caso contrario se identificará un número local, lo cual es una alarma de un posible sistema By Pass.

5. MÉTODOS DE CONTROL DE FRAUDE EN TELECOMUNICACIONES.

Actualmente los fraudes en telecomunicaciones perjudican económicamente a las empresas prestadoras de servicios limitando su capacidad de brindar más y mejores servicios a los usuarios o suscriptores. Es por ello que dichas empresas están conscientes de la importancia de mejorar la detección y la prevención del fraude en telecomunicaciones, ya que finalmente, al tener menos pérdidas ocasionadas por actos fraudulentos, se dispondrá de más recursos económicos que se puedan invertir en beneficio de la sociedad. Ahí radica la necesidad de contar con adecuados mecanismos de control que permitan una efectiva prevención, detección, análisis y disuasión de eventos de prestación de servicios de forma no legal, que puedan generarse en la red de comunicaciones de una empresa.

Dentro de los principales métodos de control de fraude en telefonía se describe los siguientes:

LLAMADAS DE PRUEBA DE TRÁFICO TELEFÓNICO INTERNACIONAL.

Este tipo de método de control de fraude se basa en la realización de llamadas internacionales con el fin de encontrar irregularidades en éstas, que generen señales de alerta sobre la presencia de posibles actividades fraudulentas. El propósito de estas pruebas es monitorear los canales y rutas que se están utilizando para comunicarse con el país a través de una red de telefonía. Existen diferentes mecanismos de llamadas de prueba como son:

Pruebas de lazo telefónico internacional (loop).

Su funcionamiento se basa en la generación manual o automática de llamadas internacionales desde el país donde se requiere identificar el fraude, usando para ello tarjetas de telefonía internacional. Todas estas llamadas se ejecutan hacia líneas terminales que son de propiedad de quien realiza la prueba, con el objetivo de obtener información acerca del número telefónico origen y real por el cual ingresó la llamada [6]. Cuando una llamada internacional ingresa a través de una ruta normal, el teléfono de prueba identifica un número asignado al carrier internacional que procesó la llamada; sin embargo, cuando la llamada fue recibida a través de un sistema ilegal, el identificador de llamadas registra un número local, del cual posteriormente se obtiene la localización exacta y la información de la persona a la cual

pertenece la línea telefónica. En la Fig. 10 se ilustra una prueba de lazo telefónico internacional.

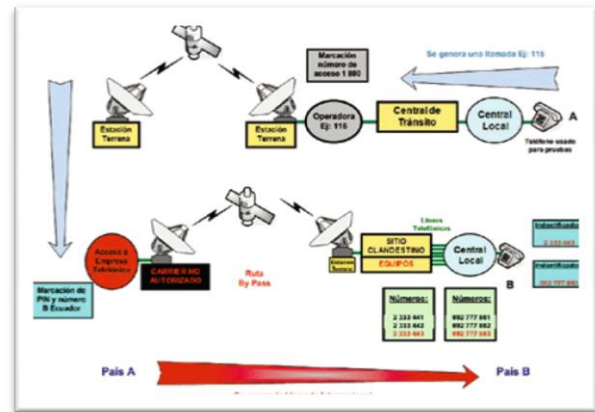


Figura 10. Prueba de lazo telefónico internacional.

El principal objetivo de este método de control es el de detectar en forma técnica los números de las líneas telefónicas que presuntamente están siendo utilizadas para cursar de manera no autorizada llamadas de origen internacional hacia las redes de operadoras telefónicas autorizadas en un determinado país. Permite detectar líneas que estén cursando tráfico telefónico internacional entrante no autorizado a través de operadores de Voz sobre IP (VoIP) y tarjetas prepago de telefonía internacional.

Bombardeo de llamadas.

Consiste en realizar llamadas desde distintos países a varios números telefónicos previamente seleccionados pertenecientes a una red de telecomunicaciones, con el objetivo de detectar líneas que cursen tráfico telefónico internacional entrante no autorizado. Es decir que verifica el correcto ingreso de llamadas internacionales entrantes desde las redes de telefonía hacia la red de una empresa de telecomunicaciones que realiza el control a través de rutas tipo “carrier” autorizados. Este tipo de mecanismo se indica en la Fig. 11.



Figura 11. Bombardeo de llamadas

PERFILAMIENTO DE TRÁFICO TELEFÓNICO

Este método analiza el tráfico cursado por las líneas telefónicas que conforman una red, con el fin de identificar aquellas que presentan un comportamiento atípico, indicador de un potencial escenario de fraude. Este método implica la determinación y cuantificación de parámetros que alertan el uso de una línea telefónica en actividades irregulares de telecomunicaciones. El establecimiento de valores umbrales de dichos parámetros que integran una llamada telefónica

constituyen verdaderos filtros, que permiten identificar aquellos números telefónicos que están siendo utilizados en una presunta práctica ilícita de telecomunicaciones.

En la Fig. 12, se detalla los pasos para establecer un control de fraude mediante perfilamiento del tráfico telefónico.

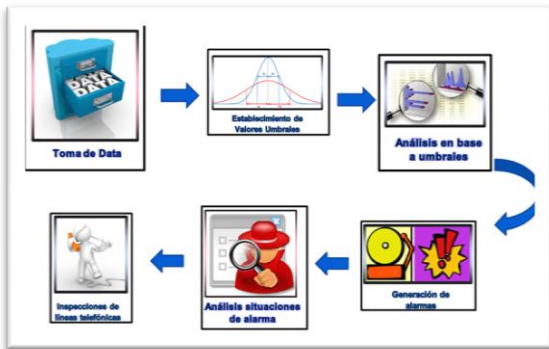


Figura 12. Perfilamiento de tráfico telefónico

El método de perfilamiento de tráfico telefónico se basa en analizar la información de una llamada creando perfiles de comportamiento de las líneas de telefonía y estableciendo valores máximos de ciertos parámetros de esta información, dentro de los cuales se puede considerar que se presenta un comportamiento regular. Este tipo de control se basa en un método llamado análisis del Archivo de detalle de Llamadas CDRs(Call Detail Record), el cual se indica a continuación.

#### Análisis de CDRs.

Los CDRs son registros que contienen información muy importante sobre una llamada telefónica, tales como el número de origen, número de destino, duración de llamada, número de llamadas entre otros. Todos estos parámetros son analizados para determinar el comportamiento que tiene cada una de las llamadas que generan una señal de alerta con el fin de garantizar que no exista actividades fraudulentas.

Cada uno de los campos que conforman un CDR es analizado en función de detectar diferentes tipos de fraude. Por ejemplo cuando un número de origen realiza muchas llamadas con destinos internacionales y recibe pocas llamadas, se presenta una alarma de que ese número llamante este siendo parte de un sistema By Pass. Cuando un número realiza llamadas con un destino atípico, se presume la existencia de un fraude de tercer país,

En la Fig. 13 se muestran los principales campos de los CDRs y se relaciona a cada uno de ellos con los diferentes tipos de fraude que se pueden identificar mediante su análisis.

Número de origen	Número de destino	Hora de inicio de llamada	Hora de Fin de llamada	Duración de llamada	Fecha de inicio de llamada	Fecha de fin de llamada
022852XXX	0013219457XXX	23:45	04:45	300	01/06/2014	02/06/2014

Figura 13. Campos de CDR.

- **Fraude Clip On:** Este tipo de fraude se lo identifica estableciendo valores umbrales para los parámetros de los campos: número de destino, hora de inicio de llamada, hora de fin de llamada y duración de llamada. Además es muy importante determinar el número de llamadas que se ha realizado desde la línea. Valores inusuales en estos campos indican la posible presencia de fraude.
- **Fraude Tercer País:** Para lograr identificar Fraude de Tercer País, es necesario evaluar el campo de destino de llamadas acompañado con el número de

llamadas realizadas. Varias llamadas a destinos atípicos dan la alerta de la existencia de este tipo de fraude. También se analiza el campo de duración de llamada.

- **Fraude de PBX:** En una empresa que cuenta con una PBX, es común el tipo de fraude por llamadas de terceros. Este tipo de fraude se puede identificar analizando principalmente los campos: número de destino, hora de inicio llamada, hora de fin de llamada y fecha de inicio y fin de llamada. Llamadas hechas en horarios fuera de oficina, en horas inusuales y a destinos internacionales o celulares, indican la sospecha de actividad fraudulenta.
- **Bypass:** Este tipo de fraude se lo detecta en forma similar al de relleno (refilling). Se debe analizar dentro de los CDRs los campos de origen de llamada, destino de llamada y duración con el fin de determinar el comportamiento de las líneas telefónicas. Cabe mencionar que resulta muy complejo identificar este tipo de fraude con el método de análisis de CDRs, por lo cual se utiliza el método de pruebas de lazo telefónico internacional descrito anteriormente.

## 6. DETECCIÓN DE POSIBLES FRAUDES EN TELEFONÍA FIJA MEDIANTE EL ANÁLISIS DE LOS CDRS.

Dentro de los servicios de telefonía fija que prestan las empresas de Telecomunicaciones, es de gran importancia realizar un control del tráfico telefónico para lograr identificar posibles usos indebidos del servicio que pueden representar potenciales escenarios de fraude. El método que se utilizó para lograr detectar comportamientos atípicos en las líneas de telefonía, se basa en el análisis de los registros de llamada conocidos como CDRs, los cuales contienen diferentes campos de información como son: origen, destino, fecha de la llamada, hora de inicio de la llamada, hora de finalización de llamada, duración, tipo de llamada entre otros [7]. En función de detectar posibles fraudes, se establecieron valores umbrales para varios de estos campos. Si al analizar los CDRs, se observan valores superiores a los umbrales, se genera una alarma, que debe ser tomada en cuenta para confirmar si existe una actividad fraudulenta. Cuando surge una alarma se realiza un análisis diferencial, en el cual se monitorean patrones de comportamiento de la línea telefónica comparando sus más recientes actividades con el historial de uso de la misma; un cambio en el patrón de comportamiento permitirá detectar escenarios fraudulentos.

### CONTROL DE TRÁFICO TELEFÓNICO PARA FRAUDE CLIP ON.

Existe un patrón de comportamiento habitual en las líneas de telefonía fija mediante las cuales se realiza el denominado fraude Clip On o Robo de Líneas. Este comportamiento se basa en la realización de llamadas, generalmente a destinos celulares e internacionales; las llamadas son de larga duración efectuadas en altas horas de la noche con la finalidad de que el defraudador no sea descubierto por el dueño de la línea telefónica al coincidir en la utilización de la misma. Otro indicador importante es la presencia de llamadas hacia destinos nunca antes realizados bajo las condiciones



anteriormente descritas. En la Fig. 14 se indica el comportamiento de una línea telefónica con fraude Clip On.

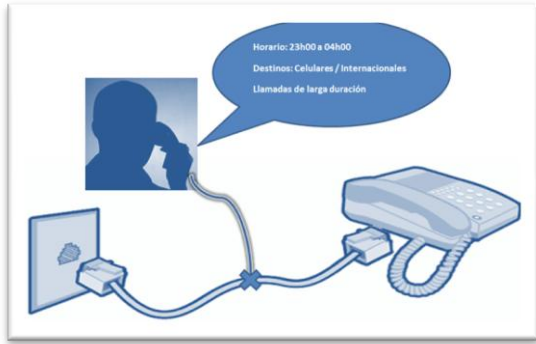


Figura 14. Comportamiento Fraude Clip On.

Valores umbrales de los campos a ser considerados.

Para algunos de estos campos fue factible establecer valores umbrales después de realizar varias pruebas del control para este tipo de fraude. En otros campos del CDR, únicamente se estableció algún tipo de restricción que permita optimizar las cadenas de consultas. En la tabla 1 se detalla estos valores y restricciones con la respectiva justificación.

Tabla 1 Umbrales - Restricciones de campos para Fraude Clip On.

CAMPO	VALOR UMBRAL	RESTRICCIÓN	JUSTIFICACIÓN / OBSERVACIÓN
Número de origen	Ninguno	Números de Pichincha.	Se restringe el número origen solo a la provincia de Pichincha.
Número de destino	Ninguno	Destinos internacionales y celulares	En el fraude Clip On, el defraudador generalmente trata de sacar el mayor provecho de la línea telefónica a la cual está estafando; por ello es muy común que realice llamadas hacia destinos celulares e internacionales que tiene una tarifa más alta en el mercado de la telefonía.
Fecha inicio	Ninguno	Ninguno	Parámetro modificable.
Fecha Fin	Ninguno	Ninguno	Parámetro modificable.
Hora de inicio	23h00 a 04h00	Ninguno	El defraudador prefiere realizar llamadas dentro del horario indicado para evitar ser descubierto por el dueño de la línea telefónica al coincidir en el uso de la misma.

<b>Hora de fin</b>	23h00 a 04h00	Ninguno	El defraudador prefiere realizar llamadas dentro del horario indicado para evitar ser descubierto por el dueño de la línea telefónica al coincidir en el uso de la misma.
<b>Duración</b>	Llamadas con duración mayor a 1 hora	Ninguno	Generalmente en este tipo de fraude, las llamadas realizadas son de larga duración. Después de varias pruebas y en base al monitoreo de patrones de uso de la línea telefónica; se estableció como valor umbral para la duración de las llamadas una hora.

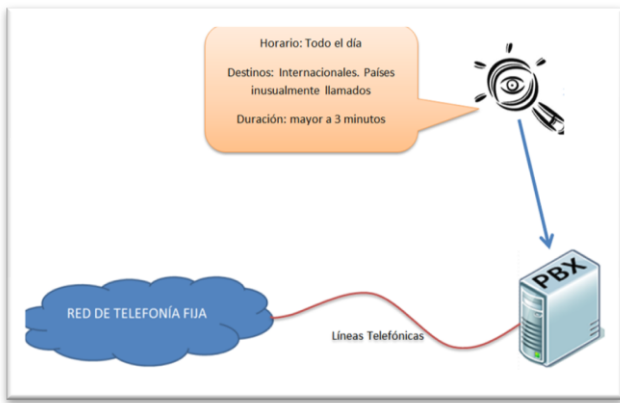
CONTROL DE TRÁFICO TELEFÓNICO PARA FRAUDE PBX.

Las centrales secundarias privadas conocidas como PBX pertenecientes generalmente a empresas, deben tener un alto grado de seguridad en su configuración para evitar la presencia de fraude. En la práctica, existen diferentes mecanismos por los cuales los defraudadores pueden hacer mal uso de estas centrales con el objetivo de lucrar de forma ilícita. Todos estos métodos reflejan patrones de comportamientos definidos en los cuales existe la presencia de llamadas generalmente hacia destinos internacionales (países inusuales con tarifas telefónicas altas).

Los defraudadores hacen uso de estas líneas telefónicas en horarios fuera de oficina; es decir en horas de la noche y en días no laborables con el fin de realizar el máximo consumo de llamadas sin la posibilidad de ser descubiertos o interrumpidos por el personal administrativo y técnico de la empresa de ser el caso.

Es muy importante aclarar que este tipo de fraude representa un gran impacto en la economía de pequeñas empresas o de suscriptores residenciales; los cuales deben asumir el pago de las llamadas fraudulentas realizadas desde su central privada. Un incremento de tan solo centenas o miles de dólares en la planilla telefónica mensual, puede resultar catastrófico para este tipo de suscriptores; es decir que en estas líneas se debe realizar un control minucioso del tráfico telefónico generado por la central PBX con el fin de detectar la presencia de fraude.

En una gran mayoría, los fraudes realizados en las PBX, son efectuados generalmente en aquellas líneas en las cuales existe la presencia de llamadas hacia destinos internacionales muy poco usuales y con tarifas de telefonía altas; con el objetivo de tener un mayor beneficio económico. En la Fig. 15, se puede observar de forma detallada el comportamiento de las líneas telefónicas para este tipo de fraude.



**Figura 15.** Comportamiento Fraude PBX

Valores umbrales de los campos a ser considerados.

Según el patrón de comportamiento descrito anteriormente, los campos de los CDRs a ser considerados para este tipo de fraude, se detalla en la Tabla 2

<b>Hora de inicio</b>	Todo el día	Ninguno	En fraude de PBX de empresas grandes, solo se necesita tener una llamada hacia destinos internacionales inusuales para tener una señal de alarma.
<b>Hora de fin</b>	Todo el día	Ninguno	En fraude de PBX de empresas grandes, solo se necesita tener una llamada hacia destinos internacionales inusuales para tener una señal de alarma.
<b>Duración</b>	Mayor a 3 minutos	Ninguno	Una llamada con pocos minutos de duración hacia destinos internacionales atípicos es motivo suficiente para un análisis de tráfico telefónico con el propósito de detectar un posible fraude.

CONTROL DE TRÁFICO TELEFÓNICO PARA FRAUDE BYPASS.

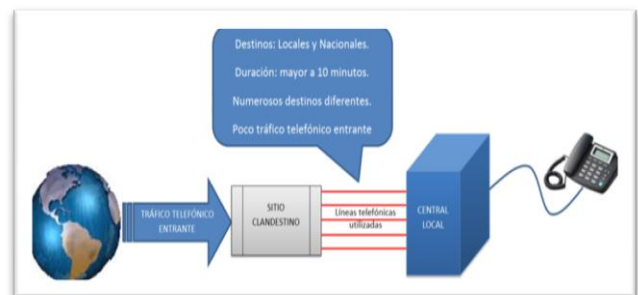
Para la ejecución de fraude By Pass, los defraudadores generalmente deben contar con varias líneas telefónicas para finalizar las llamadas internacionales en la red de telefonía de una operadora. Estas líneas telefónicas tienen un patrón de comportamiento en el cual presentan volúmenes de tráfico altos; a su vez no tienen muchas llamadas recibidas.

Un potencial indicativo, de un fraude By Pass, en el comportamiento de las líneas telefónicas, es la diversidad y variedad existente de los números telefónicos de destino los cuales son únicamente números locales y nacionales. El tiempo de duración de las llamadas es media. Todo el comportamiento descrito anteriormente se presenta con una mayor intensidad los fines de semana y días festivos.

En la Fig. 16, se detalla el comportamiento de líneas telefónicas utilizadas en un fraude By Pass.

**Tabla 2.** Umbrales - Restricciones de campos para Fraude PBX.

CAMPO	VALOR UMBRAL	RESTRICCIÓN	JUSTIFICACIÓN / OBSERVACIÓN
Número de origen	Ninguno	Números correspondientes solo a líneas de Pichincha.	Este tipo de fraude se lo analiza únicamente en los números correspondientes a PBX de empresas o personas particulares.
CAMPO	VALOR UMBRAL	RESTRICCIÓN	JUSTIFICACIÓN / OBSERVACIÓN
Número de destino	Ninguno	Destinos internacionales	En este tipo de fraude el principal objetivo es obtener el mayor provecho de las centrales PBX; por ello las llamadas son hechas hacia destinos internacionales poco usuales que tienen una tarifa más alta en el mercado de la telefonía.



**Figura 16.** Comportamiento de líneas telefónicas usadas en fraude By Pass Entrante

Valores umbrales de los campos a ser considerados.

Una vez descrito el patrón de comportamiento de las líneas telefónicas utilizadas para realizar fraude By Pass, en la tabla 3, se indican los diferentes campos con los respectivos valores umbrales o restricciones.

**Tabla 3.** Umbrales - Restricciones de campos para Fraude By Pass Entrante.

CAMPO	VALOR	RESTRICCIÓN	JUSTIFICACIÓN /
-------	-------	-------------	-----------------

	UMBRAL		OBSERVACIÓN
Número de origen	Ninguno	Números correspondientes solo a líneas de Pichincha.	Solo se analizará líneas telefónicas fijas de la provincia de Pichincha.
Número de destino	Ninguno	Destinos locales y nacionales	En este tipo de fraude se introduce el tráfico telefónico internacional por líneas telefónicas locales y nacionales.
Hora de inicio	Todo el día	Ninguno	Se analizará el tráfico telefónico generado durante todo el día.
Hora de fin	Todo el día	Ninguno	Se analizará el tráfico telefónico generado durante todo el día.
Duración	Mayor a 10 minutos	Ninguno	Las llamadas hacia destinos internacionales tienen una duración media aproximada de diez minutos.

Número de destino	Ninguno	Destinos Internacionales	En el fraude de Tercer País, el defraudador generalmente realiza llamadas a destinos internacionales (en especial a Medio Oriente, África y Cuba), para de esta forma sacar el mayor beneficio posible a las líneas telefónicas utilizadas.
Hora de inicio	Todo el día	Ninguno	Se analizará el tráfico telefónico generado durante todo el día.
Hora de fin	Todo el día	Ninguno	Se analizará el tráfico telefónico generado durante todo el día.
Duración	Mayor a 5 minutos	Ninguno	Las llamadas hacia destinos internacionales tienen una duración media aproximada de cinco minutos.

**CONTROL DE TRÁFICO TELEFÓNICO PARA FRAUDE DE TERCER PAÍS.**

Para el fraude de Tercer País, el defraudador usa una o varias líneas telefónicas para realizar llamadas hacia destinos internacionales, en especial hacia países de África, Medio Oriente y Cuba, ya que en esos países se registra antecedentes históricos para este tipo de fraude. El fraude de Tercer País generalmente viene acompañado de un fraude por suscripción, puesto que el estafador adquiere líneas telefónicas con identidades falsas, mediante las cuales realiza la mayor cantidad de llamadas posibles las 24 horas del día, hasta que estas líneas son suspendidas por falta de pago. También es muy común encontrar este tipo de fraude basado en sistemas By Pass. En la Fig. 17 se indica el comportamiento de líneas telefónicas implicadas en fraude Tercer País.

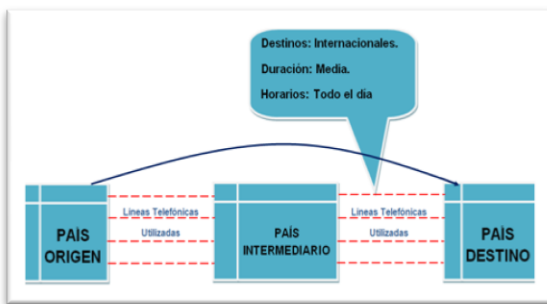


Figura 17. Comportamiento Fraude Tercer País

**Valores umbrales de los campos a ser considerados.**

En la tabla 4, se detalla los diferentes campos a ser considerados con los respectivos valores umbrales o restricciones.

Tabla 4. Umbrales - Restricciones de campos para Fraude de Tercer País.

CAMPO	VALOR UMBRAL	RESTRICCIÓN	JUSTIFICACIÓN / OBSERVACIÓN
Número de origen	Ninguno	Números correspondientes solo a líneas telefónicas de Pichincha.	El presente proyecto está destinado a analizar fraudes realizados en telefonía fija en la provincia de Pichincha.

**7. RESULTADOS FINALES**

Después de implementar y ejecutar el control de fraude en telefonía fija surgieron diversas alarmas en el análisis de cada uno de los tipos de fraude. Cuando surge una alarma se realiza un análisis diferencial, en el cual se monitorean patrones de comportamiento de la línea telefónica comparando sus más recientes actividades con la historia de uso de la misma; un cambio en el patrón de comportamiento permitirá detectar escenarios fraudulentos. De esta forma se obtuvieron los siguientes resultados.

a) FRAUDE CLIP ON.

En la realización del presente Proyecto, existieron 11 líneas telefónicas identificadas como probables escenarios de fraude. Finalmente se realizó las inspecciones, encontrando fraude por robo de líneas telefónicas en cuatro de ellas; por lo que se procedió a informar a los abonados y tomar las medidas correctivas en estos casos.

b) FRAUDE PBX.

Dentro de varias fechas en las cuales se ejecutó el presente control, se obtuvo seis números telefónicos asociados a PBX de los cuales se analizó el tráfico cursado resultando una sola línea telefónica perjudicada por este tipo de fraude, la cual registró pérdidas económicas sobre los \$2800 durante dos meses.

c) FRAUDE BYPASS.

Inicialmente se encontraron 25 líneas telefónicas potencialmente usadas para fraude Bypass Entrante. Se determinó que en este caso la gran mayoría de líneas telefónicas estaban definidas como líneas comerciales, lo cual justifica la existencia de tarifas altas de facturación y de altos volúmenes de tráfico generadas por las mismas. Finalmente quedó como señal de alarma una línea telefónica residencial en la cual el abonado propietario estaba haciendo un mal uso del servicio; ya que se utilizaba la línea telefónica residencial ubicada en un local de negocio. El abonado obtenía beneficios económicos al alquilar dicha línea residencial. Es por ello que este caso se cerró al no encontrar la presencia de

fraude ByPass, existiendo únicamente una recategorización de la línea telefónica.

#### d) FRAUDE TERCER PAÍS.

Después de ejecutar la consulta de acuerdo a los parámetros establecidos para la misma, se pudo observar que durante todas las fechas en las cuales se tomó los datos con el analizador de protocolos, únicamente se generaron como alarmas 3 líneas telefónicas para ser examinadas. Se contactó con los propietarios de las líneas telefónicas, quienes confirmaron que las llamadas fueron realizadas desde sus instalaciones de forma legítima, por lo cual se cerraron estos tres casos de análisis de fraude.

### 8. CONCLUSIONES

Para la implementación del control de fraude, en este Proyecto se utilizó el método de perfilamiento de una línea telefónica, en el cual se analiza la información de las llamadas realizadas por las líneas telefónicas con el objetivo de identificar aquellas que presentan un comportamiento atípico, indicador de un potencial escenario de fraude. Este método crea perfiles de comportamiento de las líneas de telefonía y establece valores umbrales para los campos de los CDRs como son: número de origen, número de destino, duración de llamada, fecha de inicio y fin de llamada, hora de inicio y fin de llamada. Si existen valores mayores a los umbrales establecidos, se genera una señal de alerta que debe ser considerada por el analista de fraude para examinar las líneas telefónicas más detalladamente.

Una vez finalizados la implementación y ejecución del control elaborado en este Proyecto, se puede concluir que los fraudes realizados en telefonía fija pueden llegar a ser causales de pérdidas económicas muy elevadas tanto en líneas comerciales como residenciales; es por esta razón que es muy importante realizar el monitoreo de la red de telefonía en tiempo real y analizar los casos de fraude con la brevedad posible, para evitar que las repercusiones económicas sean demasiado altas para los abonados perjudicados.

Después de aplicar el control de fraude implementado en este proyecto, se puede concluir que es común encontrar fraude Clip On en líneas telefónicas debido a que es uno de los fraudes más fáciles de realizarlos y no demandan una adquisición previa de infraestructura determinada para realizarlo. Generalmente este tipo de fraude se lo comete vulnerando la acometida externa del servicio, aunque también se puede conectar un cable secundario al cable troncal y llevándolo hacia la ubicación del defraudador siendo este último proceder más complejo.

El fraude hacia una PBX también está presente debido fundamentalmente a las vulnerabilidades existentes al configurar una PBX sin las debidas normas de seguridad. De acuerdo a la experiencia, este tipo de fraude se lo comete realizando llamadas hacia países de destino inusualmente llamados por los abonados de Ecuador; es por esta razón que el control de fraude PBX implementado se basa en encontrar específicamente llamadas realizadas desde una PBX hacia países que tienen antecedentes históricos en este tipo de fraude.

Mediante la aplicación del control de fraude, se puede concluir que actualmente, las redes de telefonía fija de las empresas de telecomunicaciones se encuentran libres de

fraudes como By Pass entrante y Tercer País debido a controles más específicos que se realizan para estos tipos de fraude como es la prueba de lazo cerrado en la cual se genera llamadas internacionales desde el país donde se quiere identificar el fraude hacia líneas terminales que son de propiedad de quien realiza la prueba identificando si la llamada pasó por un carrier autorizado o por un sistema ilegal.

### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue auspiciado y asesorado por la Escuela Politécnica Nacional y la Corporación Nacional de Telecomunicaciones.

### REFERENCIAS

- [1] RENDÓN, Álvaro. SEÑALIZACIÓN EN REDES TELEFÓNICAS. <http://dtm.unicauca.edu.com/pregrado/conmutacion/transp/2.4-Senalizacion.pdf>. 2013
- [2] PEREIRA, Javier. SISTEMA DE SEÑALIZACIÓN SIGTRAN. [https://eva.fing.edu.uy/pluginfile.php/67122/mod\\_resource/content/1/20110619\\_sigtran.pdf](https://eva.fing.edu.uy/pluginfile.php/67122/mod_resource/content/1/20110619_sigtran.pdf). 2011.
- [3] Request for Comments 3261. Internet Engineering Task Force (IETF). Network Working Group. SIP: Session Initiation Protocol. <https://www.ietf.org/rfc/rfc3261.txt>. 2002
- [4] Universidad Distrital Francisco José Francisco de Caldas.. TÉCNICAS DE DETECCIÓN, PREVENCIÓN Y CONTROL DE FRAUDE EN TELECOMUNICACIONES. Colombia. 2004.
- [5] MEZA, María. Dirección General de Investigación Especial en Telecomunicaciones (SUPERTEL). FRAUDE EN TELECOMUNICACIONES. Primera edición. Quito. 2008.
- [6] SUPERTEL. Delitos en Telecomunicaciones. [http://www.supertel.gob.ec/pdf/publicaciones/delitos%20telecomunicaciones%20revista\\_supertel.pdf](http://www.supertel.gob.ec/pdf/publicaciones/delitos%20telecomunicaciones%20revista_supertel.pdf). Quito. 2011.
- [7] 1) MEJÍA, David; GARZÓN Carlos. IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE SISTEMA DE REPORTES WEB PARA TELEFONÍA IP. Revista Politécnica. Vol. 33. Año 2014.

# Internet Bot para la Obtención y Análisis de Información Empleando el Motor de Búsqueda de Google

Cevallos D.\*; Cevallos F.\*; Bernal I.\*; Mejía D.\*

\*Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Quito, Ecuador  
e-mail: (davidcepn@yahoo.com; epnfernando@gmail.com; {ivan.bernal; david.mejia}@epn.edu.ec)

**Resumen:** Este artículo presenta la implementación de un *Internet bot* que puede ser utilizado por una o varias aplicaciones cliente a través de un servicio web. El *Internet bot*, empleando el motor de búsqueda de Google y un listado de palabras clave y URL de sitios web ingresados por el usuario, realiza varias búsquedas para obtener las páginas web de los sitios indicados que contengan información relacionada con las palabras clave. El *Internet bot* analiza la información de cada página web encontrada y, mediante un algoritmo de puntuaciones propio del *Internet bot*, determina por cada página web únicamente la información que con mayor probabilidad contiene el dato exacto que el usuario busca. De esta manera, el usuario puede encontrar de manera sencilla y rápida información precisa en Internet y no tan sólo los URL de las páginas web que contienen dicha información.

**Palabras clave:** Internet bot, servicio web, Google, Uniform Resource Locator, página web, sitio web, texto plano, algoritmo.

**Abstract:** This paper presents the implementation of an *Internet bot* that can be used by one or more client applications through a web service. The *Internet bot*, by using the Google search engine, a list of keywords and URL of websites specified by users, performs several searches for getting the web pages of the indicated sites that may have information related with the provided keywords. The *Internet bot* analyzes the information of each webpage found during the Google search and by using a scores algorithm, specifically developed for the *Internet bot*, determines, for each web page, only the information that most likely contains the precise data that the user is looking for. Thus, the user can easily and quickly find accurate information in the Internet and not just the URL for the pages that contain such information as is the case with a Google search.

**Keywords:** Internet bot, web service, Google, Uniform Resource Locator, web page, website, plain text, algorithm.

## 1. INTRODUCCIÓN

Considerando la gran cantidad de información disponible en la web, el uso de buscadores adquiere cada día mayor importancia. Mejoras sorprendentes en la búsqueda de información han hecho que sea extremadamente fácil encontrar una lista de las páginas web más relevantes. El motor de búsqueda de Google es un claro ejemplo del uso de estas mejoras gracias a su algoritmo *PageRank* y, sin lugar a duda, es el buscador más utilizado a nivel mundial [4].

Sin embargo, las personas emplean sólo una pequeña fracción de su esfuerzo y tiempo en buscar las páginas web, la mayor parte se emplea en la fase posterior, es decir, mirando las páginas web individuales para encontrar el contenido específico deseado. Otro aspecto de interés es el que la información obtenida corresponda a un sitio web de confianza con información fiable.

En este artículo se presenta la implementación de un *Internet bot* que usa Google para obtener un listado de páginas web a partir palabras claves y sitios web de confianza que el usuario especifica; luego se analiza el contenido de las páginas listadas para extraer y presentar únicamente la información de importancia para el usuario.

El artículo está organizado de la siguiente manera: En la sección 2 se presenta el mecanismo que emplea el *Internet bot* para obtener la información de Internet empleando el motor de búsqueda de Google, y en la sección 3 el mecanismo empleado para disponer de la información de una página web en texto plano. En la sección 4 se presenta el algoritmo de puntuaciones del *Internet bot* con el cual se analiza la información en texto plano de cada página web y finalmente se determina aquella información de interés para el usuario. En la sección 5 se presenta la aplicación cliente a través de la cual el usuario puede hacer uso del *Internet bot*. En la sección 6 se presentan algunos ejemplos de la funcionalidad del *Internet bot*, y en la sección 7 se realiza un análisis de las ventajas y limitaciones del *Internet bot* implementado, así como también una comparación con otras tecnologías existentes. Finalmente, en la sección 8 se presentan las conclusiones del artículo.

Artículo recibido el 14 de diciembre de 2014. Este trabajo fue financiado por la Escuela Politécnica Nacional (proyecto semilla PIS-12-30) y con el soporte del MINTEL y la RedAUTI en la que participa la EPN, parte de las "Iniciativas sobre TV Digital" que se desarrollan en el DETRI. Información de contacto: Iván M. Bernal, e-mail: ivan.bernal@epn.edu.ec, Tel: 593-2-2507-144 ext.2338. Escuela Politécnica Nacional. Ladrón de Guevara E11 - 253. Quito, Ecuador.

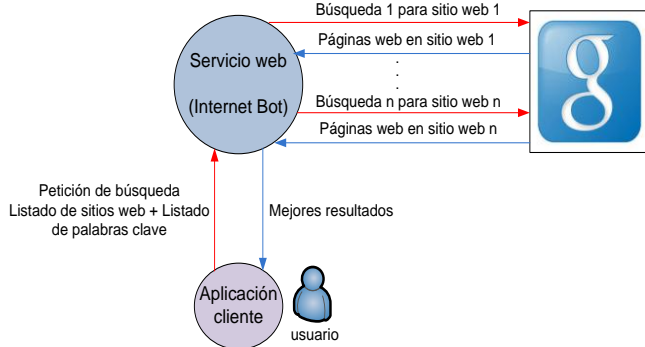


Figura 1. Funcionamiento del sistema

## 2. BÚSQUEDA DE INFORMACIÓN

### 2.1 Visión general del sistema

La Fig. 1 presenta una visión del funcionamiento del sistema. El usuario utiliza la aplicación cliente para generar una petición de búsqueda al servicio web, indicando una lista de sitios web de confianza en donde se debe realizar la búsqueda y un listado de palabras clave. Por cada sitio web indicado, el *Internetbot* realiza una búsqueda en Google utilizando el listado de palabras clave. La búsqueda que se realiza es la misma que haría el usuario directamente en el buscador, ingresando cada palabra clave separada por un espacio en blanco y colocando al final del listado, el URL del sitio web. Por cada búsqueda realizada se obtiene, a partir de los diez primeros resultados retornados por Google, un listado con los URL correspondientes a las páginas web contenidas en el sitio, las cuales podrían tener información útil para el usuario. Finalmente, el *Internetbot* convierte la información de cada página web encontrada por Google en texto plano y se la separa en párrafos, cada párrafo es puntuado mediante un algoritmo de puntuaciones desarrollado específicamente para el *Internetbot*, de manera que se presente al usuario solo el párrafo con el puntaje más alto de cada página web. El servicio web y la aplicación cliente fueron implementados mediante la plataforma Visual Studio .NET 2012 con el lenguaje de programación C#. El servicio web emplea la tecnología WCF (*Windows Communication Foundation*) y el protocolo SOAP (*Simple Object Access Protocol*) para la comunicación con la aplicación cliente.

### 2.2 Búsqueda empleando el motor de búsqueda de Google

Con el fin de realizar una búsqueda en Google, el *Internet bot* emplea la clase *WebClient* de .NET, disponible a través del espacio de nombres *System.Net* [9]. Un objeto de esta clase permite descargar la información de un recurso web a través del método *DownloadData()* cuyo argumento es el URL del recurso [9]. En este caso, este URL corresponde a una petición de búsqueda a Google, la cual tiene la siguiente estructura

`http://www.google.com.ec/search?q=búsqueda`  
 a. La palabra *búsqueda* consiste en una cadena de texto conformada por el listado de palabras clave con las cuales se realiza la búsqueda y el URL del sitio web, separados por el

Tabla 1. Algunas clases de la biblioteca *HTMLAgilityPack*

Clase	Descripción
<i>HtmlDocument</i>	Modela un documento con código HTML.
<i>HtmlNode</i>	Representa un nodo HTML, el cual puede ser hijo de otro nodo y a la vez contener nodos hijos.
<i>HtmlAttribute</i>	Representa una propiedad de la etiqueta HTML de un nodo.
<i>HtmlWebException</i>	Permite manejar excepciones producidas por código HTML mal formado.
<i>HtmlDocument</i>	Modela un documento con código HTML.
<i>HtmlNode</i>	Representa un nodo HTML, el cual puede ser hijo de otro nodo y a la vez contener nodos hijos.

símbolo+. Al emplear este URL, Google retornará los diez primeros resultados de la búsqueda. El método *DownloadData()* retorna un *array* de *bytes*, correspondiente al resultado de la búsqueda en Google, el cual puede ser convertido en una cadena de texto empleando la clase abstracta *Encoding*, disponible a través del espacio de nombres *System.Text* [7]. El resultado final es una cadena de texto en formato HTML (*HyperText Markup Language*) en la cual están contenidos los URL de las páginas web resultantes de la búsqueda, que se pueden obtener haciendo uso de la biblioteca *HTMLAgilityPack*. *HTMLAgilityPack* es una biblioteca de clases que permite analizar el código HTML de páginas web de manera sencilla para poder obtener la información que se desee; este proceso es también denominado *screen scraping*. La biblioteca fue desarrollada para C# y puede obtenerse de [2]. La Tabla 1 presenta algunas de las clases de la biblioteca, que permiten manipular el código de páginas web sin tener que preocuparse de si el código HTML está bien formado o no, ya que encontrar páginas web cuyo código HTML contenga errores es bastante común en Internet.

Una de las principales características de *HTMLAgilityPack* es que permite obtener, mediante consultas *XPATH*<sup>2</sup>, una colección de nodos HTML correspondientes a determinadas etiquetas HTML que cumplan con la condición de la consulta; también se puede obtener de manera sencilla el valor de determinadas propiedades de las etiquetas HTML de dichos nodos. Para ello, se debe proveer como argumento al método *SelectNodes()* de un objeto de la clase *HtmlNode* una ruta *XPATH* como una cadena de texto. Particularmente, el nodo padre de un documento HTML se puede obtener mediante la propiedad *DocumentNode* del objeto de la clase *HtmlDocument* que representa el código HTML de la página web.

Dado que en un resultado de búsqueda retornado por Google los enlaces hacia las páginas web están contenidos en la propiedad *href* de las etiquetas con el *tag name* *a*, mediante la consulta *XPATH* de estructura `//a[@href]` se podrá obtener fácilmente una colección con los nodos HTML cuyo *tag name* sea *a* y contengan la propiedad *href*. De esta manera, se logra obtener una colección con todos los URL de las páginas web correspondientes a la búsqueda en Google.

<sup>2</sup>*XPATH*(ruta XML) evalúa una expresión de tipo `//tag_name[@propiedad]` para obtener un subconjunto del conjunto de nodos HTML que cumplan con la condición de la expresión [10].

### 2.3 Obtención de los URL de páginas web

Por defecto, Google emplea un mecanismo propietario de codificación de URL, por lo que los URL obtenidos en la búsqueda no pueden ser empleados directamente para acceder a las páginas web [4]; un análisis detallado del mecanismo de codificación de URL que Google realiza excede el alcance de esta investigación.

Es suficiente mencionar que, de manera general, el URL codificado está conformado por varios campos separados por el símbolo `&` y que el URL sin codificar se puede obtener a través de la manipulación del campo inicial, es decir, de la cadena de texto antes de la aparición del primer símbolo `&`. El proceso de decodificación del URL retornado por Google se detalla en la Fig. 2. En este proceso se ha añadido un paso de selección, en el que únicamente se toman los URL correspondientes a páginas web con contenido HTML, para su posterior análisis.

Si la página web está contenida dentro del sitio web indicado previamente por el usuario, el valor de la propiedad `href` empezará con la secuencia `/url?q=` seguido del URL del sitio web. Si no es así, la página web corresponde a otro sitio web por lo que se descarta. Ciertos caracteres especiales dentro del URL retornado por Google están codificados.

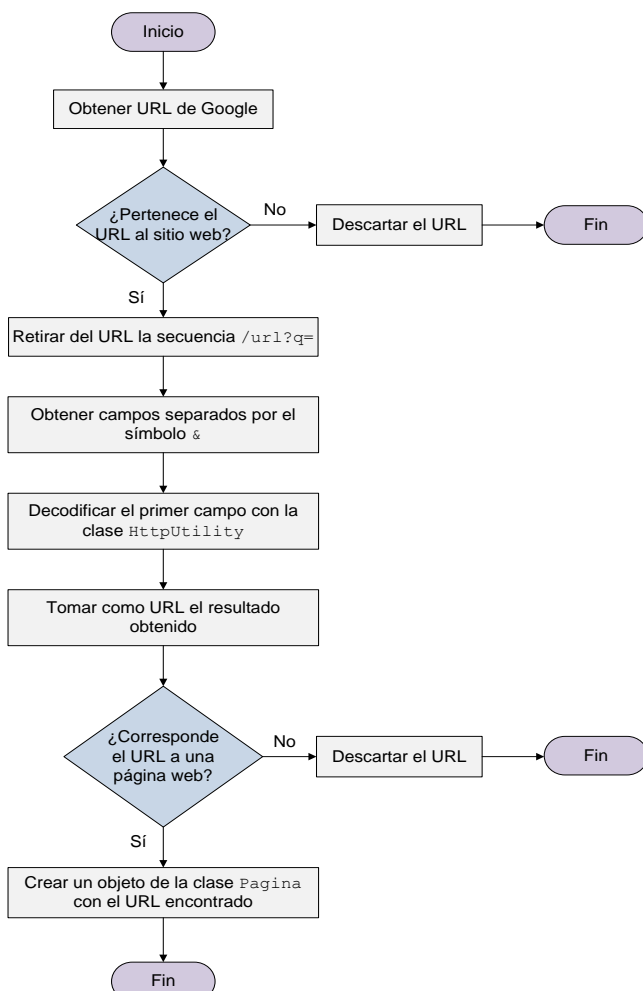


Figura 2. Proceso de decodificación y selección de un URL obtenido mediante una búsqueda en Google

Por ejemplo, los espacios en blanco son reemplazados con un signo `+`, y algunos caracteres especiales son reemplazados por un signo `%` seguido por su equivalente hexadecimal en código ASCII [11]. .NET ofrece la clase `HttpUtility` disponible en el espacio de nombres `System.Web` [8]. El método `UrlDecode()` de esta clase recibe como argumento una cadena de texto que posee caracteres especiales codificados y retorna como resultado la cadena de texto decodificada.

El URL original (sin la codificación de Google) puede ser recuperado si se elimina de la cadena de texto del URL codificado por Google la secuencia inicial `/url?q=y` todo el texto restante después del primer `&` (incluyendo al símbolo `&`); y se pasa la cadena resultante al método `UrlDecode()` de la clase `HttpUtility`.

Finalmente, como paso adicional, se analiza la extensión del recurso al cual corresponde el URL obtenido con el fin de asegurarse de que el URL corresponda a una página web con contenido HTML y no a recursos como, por ejemplo, documentos o aplicaciones en línea. Por lo tanto, si el URL culmina en extensiones tales como `.indd`, `.pdf`, `.ppt`, `.doc`, `.xls`, `.pptx`, `.docx`, `.xlsx`, `.exe`, entre otras, dicho URL es descartado. Si el URL es válido, entonces se crea un objeto de la clase `Pagina`<sup>3</sup> (el cual representa una página web) con el URL encontrado.

### 3. OBTENCIÓN DE LA INFORMACIÓN DE UNA PÁGINA WEB EN TEXTO PLANO

Una vez que el *Internet bot* ha obtenido los URL correspondientes a las distintas páginas web en las que puede existir información de interés para el usuario, debe obtenerse el código HTML de cada página web mediante un objeto de la clase `WebClient` y el empleo de la clase `Encoding`, de forma similar al mecanismo de obtención del resultado de búsqueda en Google.

La información de la página web está contenida en nodos HTML por lo que, para facilitar su posterior análisis mediante el algoritmo de puntuaciones, es necesario obtener dicha información en texto plano, eliminando las etiquetas HTML y tomando únicamente la información de interés; es decir, tomando como una cadena de texto únicamente la información correspondiente a la que el usuario puede leer al abrir la página web.

Esta tarea se la puede realizar mediante la biblioteca `HTMLAgilityPack` la implementación de un método recursivo que recorra cada uno de los nodos HTML, e ir añadiendo la información encontrada en cada nodo a una cadena de texto inicialmente vacía. La Fig. 3 describe el método recursivo que implementa el *Internetbot* para este propósito.

Antes de invocar al método por primera vez, se obtiene el nodo padre del documento HTML mediante la propiedad `DocumentNode` del objeto de la clase

<sup>3</sup>La clase `Pagina` y la clase `Respuesta`, que se mencionan en la próxima sección, son clases que se implementaron para el *Internet bot* con el objetivo de representar y gestionar a una página web y a una línea/párrafo de texto respectivamente.

HtmlDocument correspondiente al código HTML de la página web.

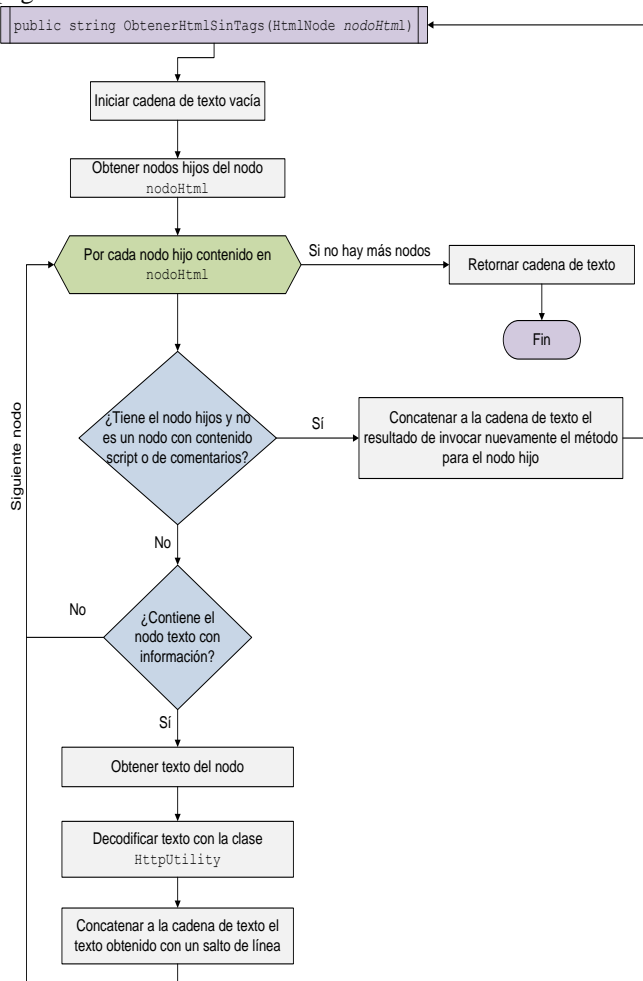


Figura 3. Método recursivo para obtención de la información de una página web en texto plano

Luego, al invocarse el método recursivo, se pasa el nodo padre como argumento.

El nodo padre, al igual que el resto de nodos del documento HTML, es manipulado mediante la creación de un objeto de la clase `HtmlNode`. La Tabla 2 detalla los atributos de la clase `HtmlNode` empleados en el método recursivo para manipular los nodos. Si el nodo no corresponde a un nodo con una etiqueta `script` o de comentario y posee nodos hijos, el método se invoca nuevamente con el nodo como argumento. Si el nodo no posee más nodos hijos y corresponde a una etiqueta que contiene información, se añade a la cadena el texto contenido en el nodo HTML, el cual se puede obtener mediante el atributo `InnerText` del objeto de la clase `HtmlNode` correspondiente al nodo.

Al culminar el método recursivo, el resultado será la información contenida en la página web como una cadena de texto.

Tabla 2. Algunos atributos de la clase `HtmlNode` de la biblioteca `HTMLAgilityPack`

Atributo	Descripción
<code>ChildNodes</code>	Colección de objetos <code>HtmlNode</code> correspondientes a los nodos hijos del nodo.
<code>OriginalName</code>	Nombre original de la etiqueta HTML del nodo que permite reconocer el contenido de la etiqueta. Por ejemplo: <ul style="list-style-type: none"> <li><code>script</code>: La etiqueta contiene código de <i>scripting</i>.</li> <li><code>#comment</code>: La etiqueta contiene un comentario.</li> <li><code>#text</code>: La etiqueta contiene información.</li> </ul>
<code>InnerText</code>	Texto contenido dentro de la etiqueta HTML.

#### 4. ALGORITMO DE PUNTUACIONES

El algoritmo de puntuaciones del *Internet bot*, el cual se describe en la Fig. 4, es efectuado para cada página web correspondiente a los URL obtenidos con la búsqueda en Google. En primer lugar se debe obtener la información contenida en la página web como texto plano, mediante el proceso descrito en la sección anterior, para luego proceder a puntuar cada línea.

El algoritmo emplea el listado de palabras clave ingresado por el usuario para puntuar a cada línea. Por cada palabra clave se analiza cada línea para determinar si ésta contiene la palabra, para lo cual se emplean tres criterios:

- Si la línea contiene en alguna parte de su texto la palabra clave, se suman dos puntos.
- Si la línea contiene exactamente la palabra clave más otro texto adicional, se suman tres puntos.
- Si la línea contiene exactamente la palabra clave sin otro texto adicional, se suman cuatro puntos.

La puntuación total de cada línea corresponde a la suma de los puntajes obtenidos por su análisis con cada palabra clave. Para obtener resultados más precisos, el algoritmo añade un punto adicional a cada línea que sea inmediatamente anterior o posterior a una línea con un puntaje mayor o igual a dos, pues es probable que el dato exacto que busca el usuario se encuentre entre estas líneas. Si la línea ha recibido puntaje (es decir, tiene un puntaje mayor o igual a uno) se crea un objeto de la clase `Respuesta`, que representa la línea. Finalmente, aquellas líneas que no han recibido puntaje son eliminadas.

Luego, el texto resultante es separado en párrafos. La división en párrafos que realiza el algoritmo no corresponde a párrafos gramaticales, sino a un conjunto de líneas que recopilan la mayor cantidad de coincidencias con las palabras clave, y en las que es más probable se encuentre el dato exacto que el usuario está buscando. Las líneas con puntaje igual a uno determinan el inicio y final de cada párrafo. La puntuación total del párrafo se obtiene entonces con la suma de los puntajes de cada una de las líneas que lo conforman. Por cada párrafo se crea un objeto de la clase `Respuesta` que representa al párrafo.

El párrafo con el puntaje más alto es el que se presenta al usuario como resultado de búsqueda en la página web, pues existe una mayor probabilidad de que en dicho párrafo se encuentre la información que el usuario está buscando.



Puede darse el caso de que ninguna línea haya recibido puntaje de acuerdo a los criterios del algoritmo, de manera que todas las líneas hayan sido eliminadas. En este caso, el algoritmo considera que en la página web no existe

información de interés para el usuario y no retornará resultados para dicha página.

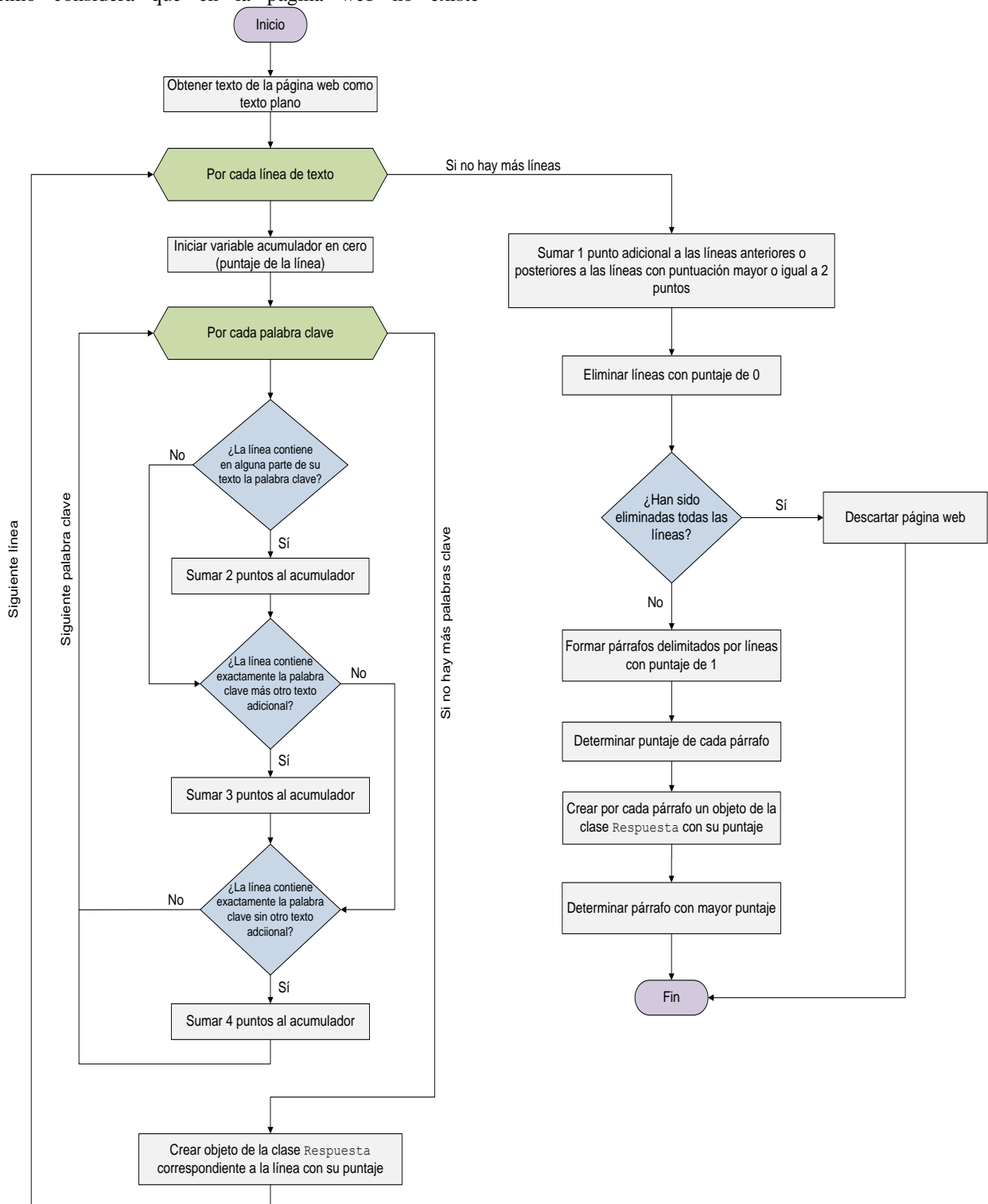


Figura 4. Algoritmo de puntuaciones

## 5. APLICACIÓN CLIENTE

### 5.1 Interfaz gráfica

La aplicación cliente brinda una interfaz gráfica al usuario de manera que pueda hacer uso del servicio web que ofrece la funcionalidad del *Internet bot*.

La Fig.5 presenta la ventana de trabajo que la aplicación cliente brinda para que el usuario pueda ingresar el listado general de los URL correspondientes a los sitios web de confianza que se emplearán para las distintas búsquedas de datos que desee realizar. Al abrir esta ventana, el listado de sitios web de confianza ingresado se presentará al usuario. El usuario puede agregar más sitios web así como eliminarlos.

La ventana principal de trabajo de la aplicación se presenta en la Fig. 6. Esta ventana provee la interfaz gráfica a través de la cual el usuario puede crear, cambiar o eliminar temas correspondientes a un tópico general; así como crear, cambiar o eliminar subtemas (subtópicos correspondientes al tópico general). Esto permite al usuario realizar búsquedas correspondientes a varias temáticas de forma organizada.

En la parte inferior de la ventana principal de trabajo, el usuario cuenta con los recursos necesarios para poder realizar la búsqueda de un dato específico para la celda seleccionada con el navegador interactivo. El sitio o los sitios web seleccionados para realizar la búsqueda, con el fin de obtener

la información a almacenarse en la celda, pueden ser seleccionados de entre las direcciones de confianza en la pestaña "*Direcciones web en donde buscar*" que se presenta en la Fig. 7.

Para cada subtema, la aplicación permite crear una matriz de las dimensiones que el usuario desee. Cada celda de la matriz podrá almacenar información. La ventana principal de trabajo dispone de un navegador interactivo a través del cual el usuario puede movilizarse entre las distintas celdas de la matriz creada de un subtema seleccionado. El usuario puede ingresar el contenido de la celda de forma manual o a través del *Internet bot* que brinda el servicio web.



Figura 5. Ventana para ingreso de sitios web de confianza

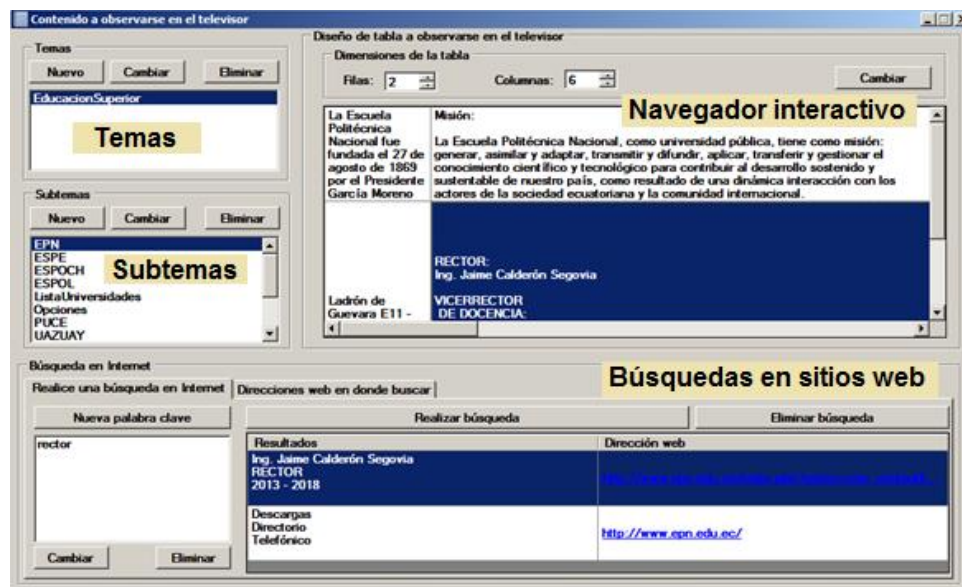


Figura 6. Ventana principal de trabajo

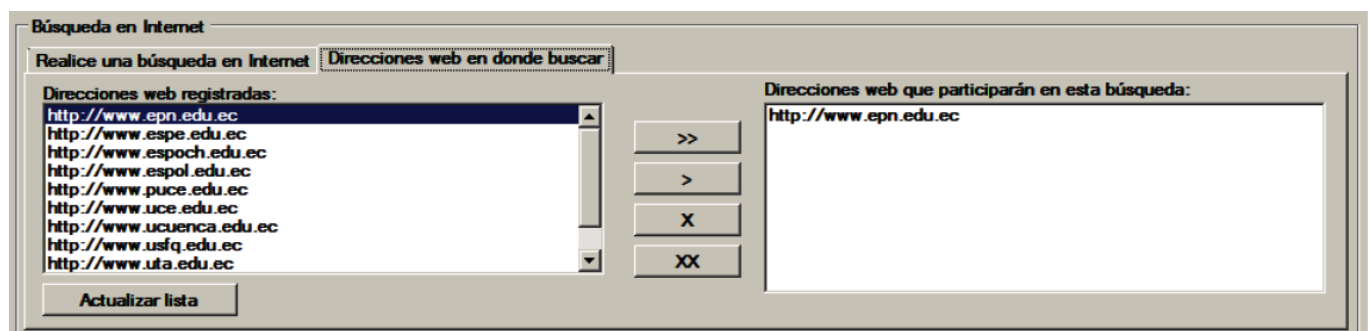


Figura 7. Pestaña "*Direcciones web donde buscar*"

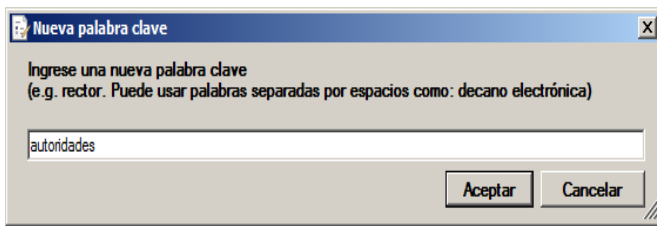


Figura 8. Ventana para ingreso de una palabra clave

Para realizar la búsqueda de un dato específico con los sitios web indicados, el usuario deberá ingresar un listado de palabras con el botón “Nueva palabra clave”. Al hacer clic sobre este botón, se presentará al usuario una ventana como la de la Fig. 8 para que ingrese la nueva palabra clave.

El listado de palabras clave ingresado se presentará en la parte inferior de la ventana principal de la aplicación. La búsqueda se realizará al hacer clic sobre el botón “Realizar búsqueda”. La aplicación lista el mejor resultado obtenido (párrafo mejor puntuado) de cada página web encontrada por el *Internet bot* con la ayuda de Google y presenta junto al resultado el URL de dicha página. Conforme el usuario se moviliza entre las distintas celdas con el navegador interactivo, los resultados de las búsquedas realizadas para cada celda se desplegarán en la parte inferior de la ventana principal de trabajo. Adicionalmente a todas estas funcionalidades, la aplicación cliente permite especificar horarios de búsqueda para la realización de búsquedas automáticas.

## 5.2 Configuración de horarios de búsqueda automática

Con el fin de que el usuario pueda disponer de información actualizada, empleando la aplicación cliente se puede emplear la opción de configuración de horarios de búsqueda automática de información que brinda el *Internet bot*.

La Fig. 9 presenta la ventana de configuración de horarios de búsqueda automática de información. Un horario de búsqueda está determinado por el día de la semana, la hora y los minutos en los cuales se desea que el servicio web ejecute automáticamente la funcionalidad del *Internet bot*. El usuario puede especificar uno o varios horarios.

Cada vez que se ejecuta una búsqueda automática, la aplicación cliente recibe la información encontrada por el *Internet bot* y la presenta en la parte inferior de la ventana como sugerencias para el usuario; así, el usuario puede determinar si la información encontrada es de utilidad o no.

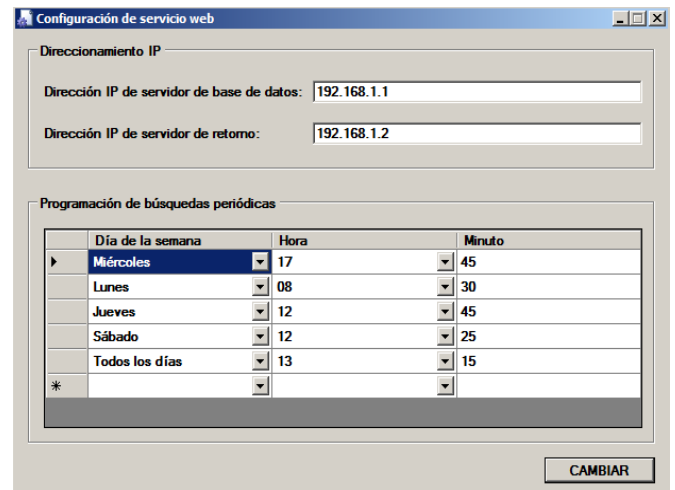


Figura 9. Ventana de configuración de horarios de búsqueda automática

Por otro lado, la ventana de configuración de horarios permite establecer la dirección de un servidor de bases de datos y de un servidor de retorno. Si se especifica una dirección de un servidor de bases de datos, el usuario puede emplear la aplicación cliente para enviar la información al servidor de bases de datos externo correspondiente a la dirección especificada. Si se especifica una dirección de un servidor de retorno, el usuario puede enviar la información a un servidor externo (servidor web, ftp, etc.) en donde se almacenará la información para cualquier fin posterior. Esta función de almacenamiento es independiente de si la información se obtuvo de la ejecución de una búsqueda automática (mediante el establecimiento de un horario) o de una búsqueda manual (haciendo clic sobre el botón “Realizar búsqueda”).

## 6. EJEMPLO DE FUNCIONALIDAD

A manera de ejemplo, utilizando la aplicación cliente, se han realizado varias búsquedas para encontrar, con el *Internetbot*, información de interés general respecto a universidades del Ecuador.

La Fig.10 presenta el resultado obtenido al realizar la búsqueda para obtener los nombres de las autoridades de la Pontificia Universidad Católica de Quito (PUCE). Las palabras clave ingresadas para esta búsqueda son: autoridades, rector y vicerrector; y el único sitio web indicado es <http://www.puce.edu.ec>.

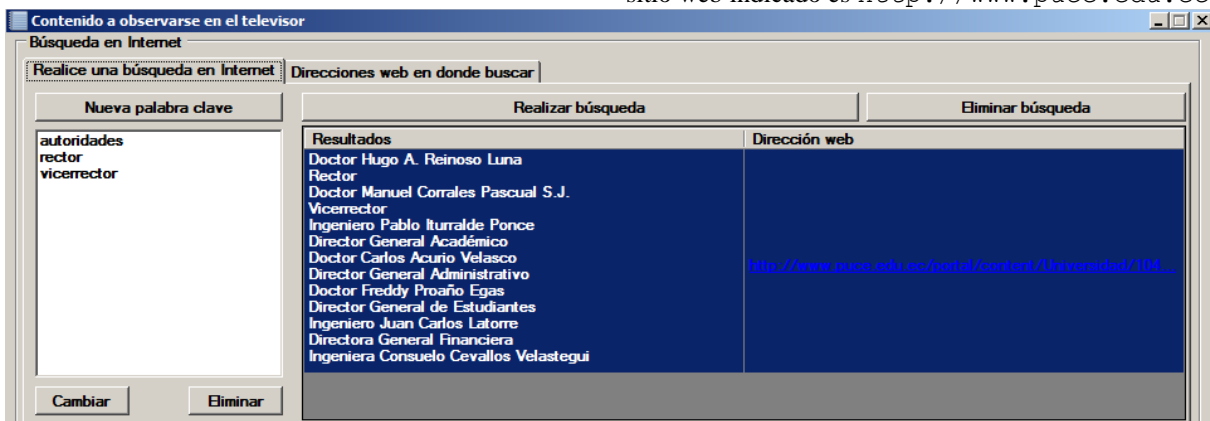


Figura 10. Búsqueda realizada para obtener los nombres de las autoridades de la PUCE



Figura 11. Página web de la cual el Internet bot obtuvo información de las autoridades de la PUCE



Figura 12. Página web de la cual el Internet bot obtuvo información de la misión de la EPN

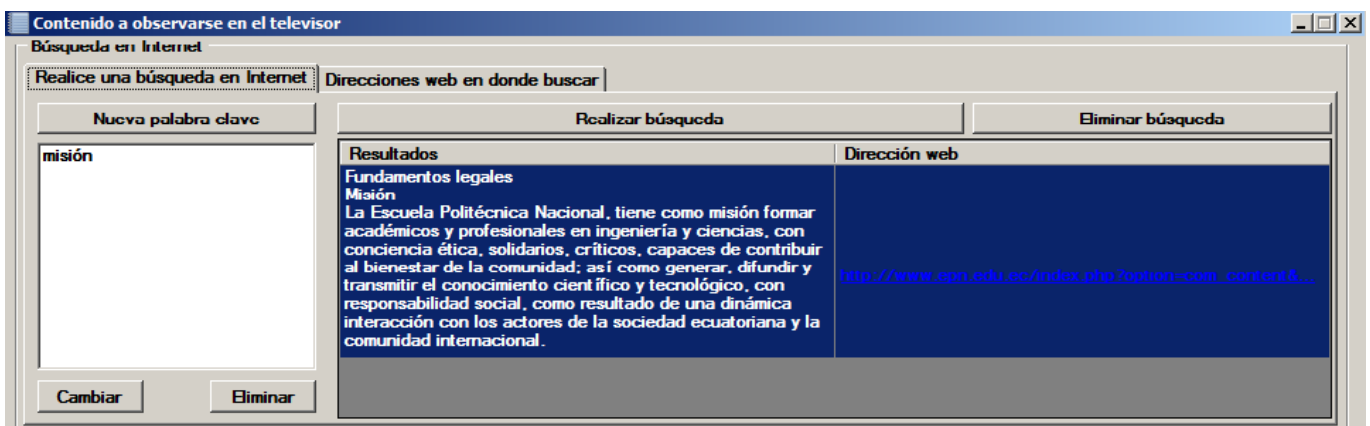


Figura 13. Búsqueda realizada para obtener la misión de la EPN

Para el caso de la PUCE, al hacer un clic derecho sobre el URL de la página web y seleccionar la opción “Abrir” del menú contextual emergente, se presentará al usuario en el navegador la página web de la cual el Internet bot obtuvo la información, la cual se presenta en la Fig. 11

La Fig. 13 presenta la búsqueda realizada para encontrar la misión de la Escuela Politécnica Nacional (EPN). La única palabra clave ingresada para esta búsqueda es misión; y el único sitio web indicado es <http://www.epn.edu.ec>. La Fig. 12 presenta la página web de la cual el Internet bot obtuvo la información.

Como se puede apreciar en los ejemplos, la información que se presenta en el resultado es bastante precisa al dato que se pretende buscar. Mediante la configuración de horarios de búsqueda automática se puede obtener información

permanentemente actualizada, lo cual puede ser de interés para el usuario dependiendo de sus necesidades.

Como ya se mencionó, la información obtenida a través del Internet bot puede ser almacenada en un servidor de bases de datos con el fin de ser empleada posteriormente. A continuación se presenta un ejemplo de esta funcionalidad aplicada en el campo de la interactividad en televisión digital [3]. La Fig. 14 presenta el diagrama general de este ejemplo. Una vez que la información de las universidades es obtenida mediante el Internet bot, el usuario (empleando la aplicación cliente) almacena dicha información en un servidor de bases de datos.

El servicio web está conectado a través de Internet con el receptor del televidente en donde se ejecuta una aplicación interactiva de televisión digital.

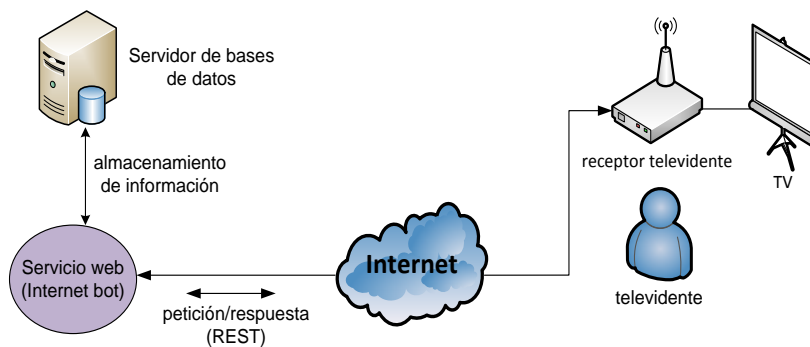


Figura 14. Diagrama general de ejemplo de almacenamiento de información obtenida mediante el Internet bot

El servicio web emplea la tecnología REST para transmitir la información de las universidades (obtenida mediante el *Internetbot* y almacenada en el servidor de bases de datos) cada vez que la aplicación interactiva solicita dicha información. De esta manera, la aplicación interactiva podrá presentar al televidente en la pantalla del televisor la información obtenida mediante el *Internetbot*. Si además se emplea la funcionalidad de búsquedas automáticas de información, cada vez que se encuentre nueva información se almacenará en el servidor de bases de datos. De esta manera, el televidente podrá contar con información actualizada.

## 7. VENTAJAS, LIMITACIONES Y COMPARACIÓN DEL INTERNET BOT CON OTRAS TECNOLOGÍAS EXISTENTES

En esta sección se analizan algunas de las ventajas y limitaciones del *Internet bot* implementado, y se realiza una comparación del mismo con otras tecnologías ya existentes.

### 7.1 Ventajas

El *Internet bot* tiene varias ventajas en la obtención y análisis de información en Internet. La principal ventaja (y la cual comprende el estado del arte de esta investigación) radica en que el *Internetbot* desarrollado permite obtener información de determinados sitios web en un tiempo mucho menor que el que tomaría explorar cada sitio recursivamente en búsqueda de dicha información. A este aspecto se suma la ventaja de que la información que el *Internetbot* obtiene comprende datos que, con mayor probabilidad, corresponden a la información precisa que el usuario está buscando y que pueden contestar a sus interrogantes gracias al algoritmo de puntuaciones propio del *Internetbot*.

Otra ventaja del *Internetbot* implementado es la flexibilidad que éste brinda. Así por ejemplo, el *Internetbot* permite determinar horarios de búsqueda de información para realizar búsquedas automáticas, en lugar de tan solo permitir la realización de búsquedas manuales (es decir, búsquedas que el usuario indica realizar al hacer clic sobre un botón). Aunque el *Internetbot* ha sido programado para obtener los diez primeros resultados de la búsqueda de Google (pues en los diez primeros resultados retornados por Google probablemente se encuentra la información de mayor interés para el usuario), dicho parámetro puede ser fácilmente modificable para que en lugar de analizar únicamente los diez primeros resultados se pueda analizar la cantidad de resultados que se desee.

La idea original con la cual se implementó el *Internet bot* implica que el usuario ingrese los sitios web de su confianza con el fin de obtener información fiable, ya que encontrar sitios web con información no fiable en Internet es algo bastante común. Sin embargo, la ventaja del *Internetbot* implementado radica en que el usuario puede prescindir (si así lo desea) de especificar los sitios web para realizar las búsquedas. En ese caso, el *Internetbot* realizará las búsquedas retornando información proveniente de cualquier sitio web, de acuerdo a los resultados de la búsqueda en Google.

Por otro lado, si bien el *Internetbot* implementado hace uso del motor de búsqueda de Google, debe notarse que si se cambia en el código del *Internetbot* el URL del buscador y si se omite el proceso de decodificación de los URL, el *Internetbot* puede ser capaz de obtener información empleando otros buscadores como Yahoo, Bing, Ask, Gigablast, entre otros. Cabe mencionar que este mismo mecanismo también podría ser empleado para obtener y analizar información retornada no por tan solo buscadores sino también, por ejemplo, redes sociales como Twitter o Facebook, lo cual puede ser una mejora del *bot* que le permitiría obtener información de varias fuentes (no de tan sólo buscadores). Finalmente, como ya se expuso en la sección anterior, el *Internetbot* brinda una importante ventaja al permitir, a través de la aplicación cliente, que la información que éste retorna pueda ser almacenada en un servidor de bases de datos y/o algún servidor externo.

### 7.2 Limitaciones

Existen ciertas funcionalidades que el *Internet bot* no considera en su implementación y que podrían ser posibles mejoras. En primer lugar, el algoritmo de puntuaciones considera únicamente la frecuencia de aparición de las palabras clave en la información y el cómo son presentadas. No se toma en cuenta casos de polisemia (una palabra con varios significados), homonimia (palabras de misma escritura pero con significados distintos) ni el contexto en el cual aparece la palabra. De igual manera, no se analizan aspectos como, por ejemplo, el tipo de letra de la palabra, el tamaño, el color o si la palabra está marcada en negrita o no, lo cual podría ayudar a discriminar si la información es relevante o no. Así, si la palabra está marcada en negrita o si es parte de un título, es más probable que la información del contexto sea de mayor importancia que aquel cuando la misma palabra aparece sin negrita o es parte de un párrafo.

A esto se suma el hecho de que el *Internetbot* no es capaz de determinar por sí mismo si la información de un sitio web es actualizada o no, y debe confiar en este aspecto en el motor de búsqueda de Google. El *Internetbot* analiza la fecha de las páginas web y confía en que Google retornará los resultados más actualizados en cada búsqueda.

Finalmente, otra limitante del *Internetbot* radica en el tema de seguridad. El *Internetbot* no discrimina si la información obtenida es proveniente de un sitio web seguro que posea un certificado digital o al cual se pueda acceder mediante una sesión HTTPS (*HyperText Transfer Protocol Secure*), lo cual puede ser un aspecto de mucha importancia en ciertos casos.

Aunque todas las observaciones expuestas son actuales limitantes, podrían ser implementadas a futuro con el fin de mejorar la funcionalidad del *Internet bot*.

### 7.3 Comparación con otras tecnologías existentes

En la actualidad se impulsa la investigación de buscadores semánticos. Un buscador semántico se basa en el uso de la semántica web y, a diferencia de un buscador común, efectúa la búsqueda tomando en consideración el significado de las palabras con el fin de que la búsqueda sea más precisa sin

basarse en simples etiquetas [5]. En la actualidad existen varios buscadores semánticos como por ejemplo Kngine, Hakia, Lexxe, Kosmix, DuckDuckGo, Evri, Powerset, entre muchos otros [6].

La diferencia entre el *Internet bot* y un buscador semántico radica en dos aspectos básicos:

- Un buscador semántico busca información con precisión empleando semántica web, mientras que el *Internet bot* busca información con precisión analizando la información obtenida como resultado de búsquedas en Google.
- Un buscador semántico toma en cuenta el significado de las palabras y su contexto, mientras que el *Internet bot* se basa únicamente en la frecuencia de aparición de las palabras y el cómo son presentadas (algoritmo de puntuaciones).

Sin embargo, cabe mencionar que la semántica web es aún un campo en investigación y varios buscadores semánticos están siendo empleados aún en versiones beta [5]. El objetivo del *Internet bot* implementado es lograr los mismos resultados que al emplear un buscador semántico pero sin hacer uso de la semántica web (aún en desarrollo). Vale rescatar el hecho de que el *Internetbot* podría ser empleado con un buscador semántico en lugar de Google si así se desea. La Fig. 15 presenta, como ejemplo, la búsqueda realizada en el buscador semántico DuckDuckGo para obtener la misión de la EPN, la cual se obtuvo anteriormente empleando el *Internet bot*.

Nótese que se ha realizado la búsqueda en este buscador señalando el sitio web en donde buscar a través de la palabra *site*.

Finalmente, vale la pena hacer una comparación entre el *Internetbot* implementado y un *web crawler*. Un *web crawler* es un *bot* de búsqueda que metódica y automáticamente navega sitios web en Internet con el fin de crear un índice (*web indexing*) de los sitios web que navega, el cual pueda ser usado posteriormente por un motor de búsqueda [12]. Como ejemplos de *web crawlers* tenemos a GoogleBot (usado por Google), Yahoo Slurp (usado por Yahoo) y MSNBot (usado por Bing) [1].

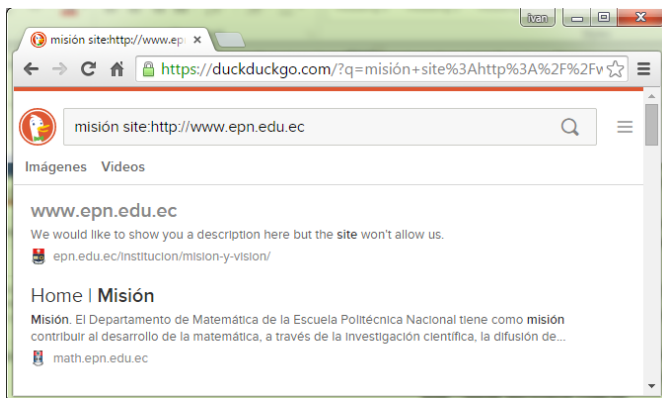


Figura 15. Búsqueda de información con el buscador semántico DuckDuckGo

La principal diferencia entre el *Internet bot* implementado y un *web crawler* radica en que el *Internet bot* no busca información recursivamente en cada sitio web por sí mismo, sino que hace uso del motor de búsqueda de Google para esta tarea; por lo tanto el *Internetbot* es mucho más rápido. De igual manera, el *Internetbot* no crea un índice de los sitios web que visita.

## 8. CONCLUSIONES

El *Internet bot* implementado facilita la obtención de información precisa en sitios web al presentar los mejores resultados obtenidos mediante un algoritmo de puntuaciones. Para su funcionamiento se hizo uso del motor de búsqueda de Google, el cual permitió obtener los URL de las páginas web contenidas dentro de los sitios web indicados por el usuario en un tiempo mucho menor que al explorar recursivamente cada sitio.

El motor de búsqueda de Google emplea, a diferencia de otros buscadores, un mecanismo de codificación de URL; por lo tanto no es posible hacer uso directamente de estos URL sin antes someterlos a un proceso de decodificación. El servicio de búsqueda puede trabajar con otros buscadores si se omite la ejecución del proceso de decodificación de URL. El desarrollo de *bots* de búsqueda capaces de obtener información que responda con exactitud a las preguntas del navegante en Internet es aún un campo en desarrollo.

## REFERENCIAS

- [1] AHFX. GoogleBot and other spiders. [Online]. Disponible en: <http://www.ahfx.net/weblog/39>
- [2] CodePlex. HTMLAgilityPack. [Online]. Disponible en: <http://htmlagilitypack.codeplex.com>
- [3] D. Cevallos, F. Cevallos, D. Mejía y I. Bernal, "Sistema de Búsqueda, Almacenamiento y Procesamiento de Información para generar contenido interactivo de Televisión Digital," Revista Politécnica, vol. 33, no. 3, Ene. 2014.
- [4] G. Colouris, J. Dollimore, T. Kindberg y G. Blair, "Distributed Systems Concepts and Design", 5ta ed., Addison-Wesley, Ed. USA: Pearson, 2012.
- [5] Google. Buscadores semánticos. [Online]. Disponible en: <https://sites.google.com/site/buscadoressemanticos/-que-es-un-buscador-semantico>
- [6] Google. Ejemplos de buscadores semánticos. [Online]. Disponible en: <https://sites.google.com/site/buscadoressemanticos/ejemplos-de-buscadores-semanticos>
- [7] Microsoft. Encoding (Clase). [Online]. Disponible en: <http://msdn.microsoft.com/es-es/library/system.text.encoding%28v=vs.110%29.aspx>
- [8] Microsoft. HttpUtility (Clase). [Online]. Disponible en: <http://msdn.microsoft.com/es-es/library/system.web.httputility%28v=vs.110%29.aspx>
- [9] Microsoft. WebClient (Clase). [Online]. Disponible en: <http://msdn.microsoft.com/es-es/library/system.net.webclient%28v=vs.110%29.aspx>

- [10] Visual Studio. Sintaxis de XPATH. [Online]. Disponible en:  
<http://msdn.microsoft.com/es-es/library/vstudio/ms256471%28v=vs.100%29.aspx>
- [11] Wikinsonpc. Codificando y decodificando una dirección URL. [Online]. Disponible en:  
<http://www.wilkinsonpc.com.co/free/articulos/codificar-decodificar-url.html>
- [12] Wikipedia. WebCrawler. [Online]. Disponible en:  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Web\\_crawler](http://en.wikipedia.org/wiki/Web_crawler)

# Generador de Flujos Únicos de Paquetes de Transporte TS en base a la Norma ISDB-Tb

Moncayo T.\*; Pozo M.\*; Mejía D.\*; Bernal I.\*

\*Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Quito, Ecuador  
e-mail: tatiana\_23.moncayo@hotmail.com, pozocaicedom@gmail.com, {ivan.bernal; david.mejia}@epn.edu.ec

**Resumen:** Este artículo inicia con una breve síntesis acerca de la estructura de los flujos únicos de paquetes de transporte TS, así como su generación mediante OpenCaster. Luego se presenta una aplicación que sirve como interfaz entre el usuario y OpenCaster, cuyo objetivo es facilitar y automatizar el proceso de generación de los mencionados flujos. La aplicación presenta una interfaz gráfica y considera los casos en los que los flujos incluyen no solo el audio y el video de uno o varios programas, sino también el código y los medios necesarios para transmitir aplicaciones interactivas que deben difundirse en conjunto con dicha programación. Estos flujos también deben integrar las tablas que permiten al decodificador ensamblar y sincronizar el audio y el video de cada programa y recuperar el código y los medios de una aplicación. Se presentan también los resultados de emplear el Generador de Flujos con distintas configuraciones de número de programaciones, resolución y aplicaciones interactivas. Los flujos luego son probados en un sistema con receptores digitales reales.

**Palabras clave:** TS, BTS, ISDB-Tb, Tablas PSI/SI.

**Abstract:** This article starts by presenting a brief summary about the structure of single transport packet streams and the way these streams are generated by OpenCaster. Then an application that allows a user to visually interact with OpenCaster is presented. This application makes it extremely easy to automatically generate the streams. The application considers scenarios in which the streams must carry not only the audio and video of one or several TV programs but also the code and media for transmitting interactive applications that need to be broadcasted along with the regular programming. These streams must also include all of the tables that make it possible to reassemble and synchronize the audio and video of each program and collect the code and media of an application. The results of using this new application are presented considering a variety of configurations to generate the streams, with different number of programs, resolution and interactive applications. These streams are later tested on actual digital receptors.

**Keywords:** TS, BTS, ISDB-Tb, PSI/SI Tables.

## 1. INTRODUCCIÓN

El estándar para TV Digital Terrestre ISDB-Tb (*International System for Digital Broadcast, Terrestrial, Brazilian version*), adoptado por el Ecuador en marzo de 2010, fue desarrollado en Brasil y es el resultado de una modificación al estándar japonés ISDB-T y se diferencia básicamente en el esquema de compresión de audio y video empleado y en el middleware que se usa para la interactividad.

Entre las características más sobresalientes del estándar ISDB-Tb se pueden mencionar: soporte para movilidad y portabilidad; uso eficiente del espectro y multiprogramación; formato panorámico (16:9); y, la interactividad a través de su middleware abierto Ginga.

La interactividad es posible a través de la ejecución de aplicaciones interactivas, las cuales son programas informáticos que habilitan el contenido interactivo; y que son transmitidas, generalmente, por el aire junto con el audio y video de un programa televisivo. Las aplicaciones se ejecutan sobre Ginga que debe estar disponible en el receptor [2]. La Fig. 1 muestra un ejemplo de aplicación interactiva en ejecución.

La temática de TV Digital abarca dos aspectos fundamentales: el de transmisión y el desarrollo de aplicaciones interactivas. Estos aspectos se interrelacionan cuando las aplicaciones desarrolladas deben ser transmitidas.



Figura 1. Aplicación interactiva en ejecución [11]

Artículo recibido el 14 de diciembre de 2014; revisado el 25 de marzo de 2015. Este trabajo fue financiado por la Escuela Politécnica Nacional y con el soporte del MINTEL en el marco de las "Iniciativas sobre TV Digital" (<http://ginga.epn.edu.ec>) que se desarrollan en el DETRI bajo la dirección de David Mejía, MSc. e Iván Bernal, Ph.D. Información de contacto: Iván M. Bernal, e-mail: ivan.bernal@epn.edu.ec, Tel: 593-2-2507-144 ext.2338. Escuela Politécnica Nacional. Ladrón de Guevara E11 - 253. Quito, Ecuador.



Las señales de audio y video de una programación deben multiplexarse entre sí, luego de haber sido comprimidas de acuerdo a lo señalado por el estándar MPEG-4. Estas señales de audio y video multiplexadas de una programación deben a su vez multiplexarse junto con el audio y video de otras programaciones (multiprogramación), generalmente, de diferente resolución: resolución baja 1seg para los móviles, estándar (SD) y de alta definición (HD) para otros receptores. Estas multiprogramaciones deben también multiplexarse con información que permita en el receptor discriminar la información correspondiente a cada programa. Finalmente, todo lo anterior debe estar multiplexado con: información de *closedcaption*; guía electrónica de programación (EPG); y, el código de las aplicaciones interactivas y medios que ayudan a implementar su funcionalidad, como imágenes, páginas HTML, etc. Todo lo mencionado se resume en la Fig. 2.

En el estándar ISDB-Tb, audio, video y datos de una programación, deben ser multiplexados formando así, el *TransportStream* (TS). Luego, las múltiples salidas del multiplexor que contienen la información de las distintas programaciones deben ser re-multiplexados para formar el denominado “**flujo único de paquetes de transporte TS**”, el cual después de realizar un proceso de codificación en la etapa de salida del re-multiplexor conforma la señal BTS (*BroadcastTransportStream*) [10]. Mediante la re-multiplexación, el estándar ISDB-T consiguió adaptar el TS de MPEG-2 de tal manera que funcione para transmisión jerárquica y recepción parcial.

Para que el desarrollo de las aplicaciones interactivas no se circunscriba solamente al uso de simuladores y emuladores sino que las aplicaciones puedan ser evaluadas en televisores y STB (*Set Top Boxes*) reales, y que las pruebas de las mismas puedan realizar con usuarios interactuando con las aplicaciones a través del control remoto, es necesario establecer un sistema básico y de bajo costo.

Una alternativa es generar en software el flujo único de paquetes de transporte TS, por cuanto la codificación a la salida del re-multiplexor se realiza normalmente en hardware para conforma el BTS. Luego de lo cual se debe emplear un transmisor de bajo costo que acepte el flujo generado.

OpenCaster [5] es un software que permite la generación de flujos únicos de transporte de paquetes para el estándar europeo DVB-T. El laboratorio LIFIA [13] de Argentina generó un parche para OpenCaster [14] para permitir la generación de flujos únicos de transporte de paquetes para el estándar ISDB-Tb. En [6], [12] se han presentado diferentes alternativas para la generación de estos flujos; sin embargo, en la mayoría de los casos el proceso no es claro, y depende de que el usuario del software conozca todas las particularidades de los diferentes comandos requeridos.

El objetivo del artículo es presentar una aplicación desarrollada para automatizar el proceso de generación de los flujos únicos de paquetes de transporte con OpenCaster.

Este artículo está organizado de la siguiente forma: en la sección 2 se presenta una breve discusión de la estructura de los TS y BTS, lo cual es fundamental para entender la forma en que se generan en OpenCaster y la automatización de este proceso. Una revisión del procedimiento de generación de los

flujos con OpenCaster se presenta en la sección 3; en la sección 4 se introduce la aplicación “Generador de Flujos”, se describe la idea detrás de la automatización del proceso de generación de flujos y funcionalidad de la aplicación. La sección 5 presenta los resultados obtenidos al emplear el generador de flujos y usar los flujos generados en un sistema con receptores reales. Finalmente, en la sección 6 se presentan las conclusiones del trabajo.

## 2. TS y BTS

ISDB-Tb utiliza para la compresión del audio y video MPEG-4 y para la multiplexación de las varias programaciones sigue empleando parte del estándar MPEG-2 [16], el denominado Flujo de Transporte o *TransportStream* (TS).

Para obtener un paquete TS, primero deben pasar, tanto el audio como el video, por un proceso de codificación y compresión independiente, formando cada uno de ellos un flujo elemental de información denominado ES (*ElementaryStream*), como se indica en la Fig. 3. Un ES es la unidad básica de transporte de paquetes de audio y video que se encuentra a la salida de los codificadores. Luego, cada ES de audio o video, pasa por un paquetizador, que lo convierte en un PES (*PacketizedElementaryStream*). Un PES es un paquete de tamaño variable, de máximo 65.536 bytes.

En la Fig. 3 se puede observar que a la salida del multiplexor MPEG-2, se obtienen paquetes de 188 bytes, de los cuales 4 bytes son de cabecera y el resto corresponde a la información.

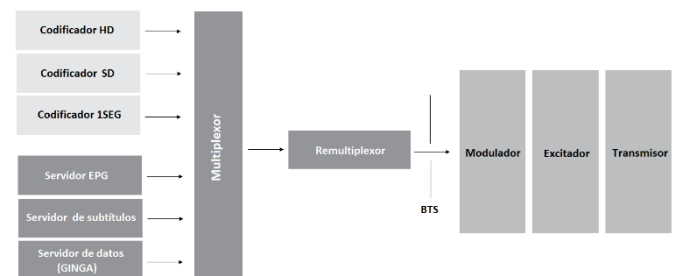


Figura 2. Generación de una señal con multiprogramación y aplicación interactiva incluida [8]

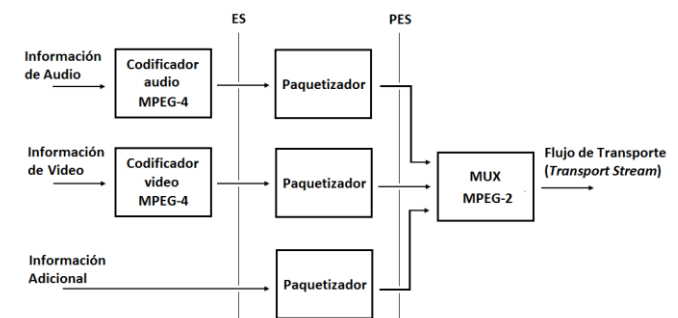


Figura 3. Conformación del TS para una programación [18]

Como se mencionó anteriormente, los TS de varias fuentes de video deben ser re-multiplexados para formar el flujo único de paquetes de transporte TS, el cual sometido a una codificación de Reed-Solomon conforma el BTS. El BTS está conformado por unidades básicas denominadas TSP (*TransportStreamPacket*) que tienen un tamaño de 204 bytes, como se indica en la Fig. 4. Los flujos únicos de paquetes de transporte TS pasan por un proceso de codificación, en el cual se agregan 16 bytes; los ocho primeros sirven para identificar la información de la capa jerárquica, que permite tener programaciones transmitidas a distinta resolución, y pueden transportar información auxiliar, y los 8 bytes restantes identifican la paridad que se obtiene del codificador Reed-Solomon.

### 2.1 Cabecera del paquete TS

La cabecera del paquete TS se presenta en la Fig. 5. De la cabecera es relevante mencionar los 13 bits correspondientes al PID (*PacketIdentifier*), que especifica el tipo de información que se encuentra en la carga útil. De forma análoga a los PES, se tienen las denominadas secciones que son paquetizadas y transportadas en los paquetes TS de 188 bytes. Una sección encapsula las tablas PSI/SI y carrusel de datos para organizar la transmisión de las aplicaciones interactivas y sus medios.

### 2.2 Tablas PSI/SI

Las Tablas PSI/SI (*ProgramSpecificInformation/Service Information*), contienen datos con información del TS para que sea demultiplexado correctamente en el decodificador, de tal forma que el decodificador pueda localizar tanto el video como el audio de cada programa; además, permiten la sintonización automática de los terminales, creación de la guía electrónica, entre otros.

Las tablas PSI proveen información específica de uno o varios programas que fueron multiplexados de acuerdo al estándar MPEG-2, y su función principal es ayudar en la demultiplexación y la presentación de la información en el decodificador. Las tablas que contribuyen con información específica del programa son: *ProgramAssociationTable* (PAT) – proporciona la correspondencia entre el número de programa y los paquetes de audio, video y datos que lo componen, *ProgramMapTable* (PMT) – define los PID que identifican los flujos individuales que constituyen un programa y *Conditional Access Table* (CAT) – empleada para definir los accesos en servicios del tipo *pay-per-view*. Estas tablas están definidas en la norma MPEG-2.

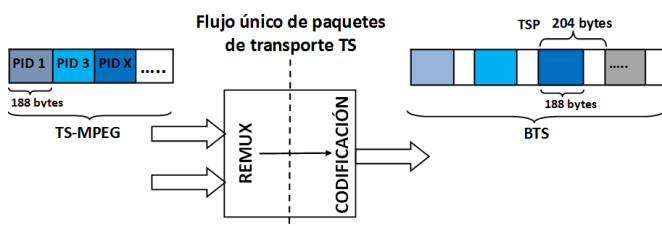


Figura 4. Re-multiplexación del TransportStream [10]

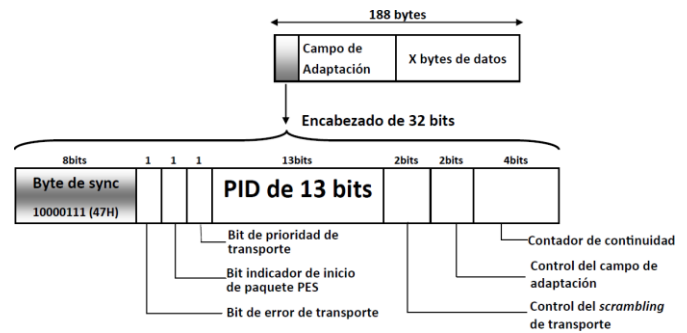


Figura 5. Estructura de un paquete TS [17]

Las tablas SI funcionan como complemento de las tablas PSI, permiten el control del receptor y el envío de la EPG, aplicaciones interactivas, entre otros servicios. También se las conoce como tablas de servicios de información. Existen 15 tablas SI según la norma ABNT NBR 15603-1 [1], [2], de estas las que más información brindan son: *Network InformationTable* (NIT) – ayuda en la sintonización de un nuevo canal, *Service DescriptionTable* (SDT) – describe los servicios contenidos en el TS, los nombres de proveedores, los nombres de los canales y *ApplicationInformationTable* (AIT) – contiene información sobre la aplicación interactiva.

## 3. GENERACIÓN DE FLUJOS ÚNICOS DE PAQUETES DE TRANSPORTE CON OPENCASTER

OpenCaster es un software de código abierto desarrollado principalmente por AVALPA Digital Engineering SRL como parte de AVALPA Broadcaster Server. El Laboratorio de Investigación y Formación en Informática Avanzada (LIFIA) de la Universidad Nacional de la Plata realizó modificaciones a OpenCaster, para soportar el estándar ISDB-Tb. Estas modificaciones están disponibles como un parche que deben ser aplicadas a OpenCaster. OpenCaster puede ser descargado de la página oficial de AVALPA [5] y la versión modificada por LIFIA se encuentra disponible en [14].

Para la instalación de la versión 2.4 de OpenCaster es necesario cumplir con los siguientes requerimientos: sistema operativo GNU/Linux (Ubuntu 12.10), lenguaje de programación Python (Python 2.7.3), y el compilador del lenguaje C (GCC 4.6.3). Un resumen del proceso de instalación se presenta a continuación:

1. Ubicar en un mismo directorio los archivos: OpenCaster2.4.tgz y OpenCaster2.4-lifia-rev362.patch.
2. Ingresar en el directorio creado y descomprimir el archivo mediante:

```
$ tarzvf OpenCaster2.4.tgz
```
3. Ejecutar el parche desarrollado por LIFIA:

```
$ cd OpenCaster2.4/
$ patch -p1< ../OpenCaster2.4-lifia-rev362.patch
```
4. Instalar OpenCaster con los privilegios del usuario root:

```
$ sudo make
$ sudo makeinstall
```

### 3.1 Comandos de OpenCaster

OpenCaster emplea una serie de comandos que deben ser ejecutados en el terminal de Linux, puesto que no dispone de una interfaz gráfica. Algunos de los comandos más importantes con su respectiva función se mencionan a continuación:

`esaudio2pes`: encapsula los ES de audio en PES.

`esaudioinfo`: entrega información sobre los ES de audio.

`esvideo2pes`: encapsula los ES de video en PES.

`oc-update.sh`: genera un TS a partir de una carpeta que contiene el código y los objetos media de las aplicaciones interactivas de las que se generará un carrusel de objetos.

`pesaudio2ts`: encapsula un PES de audio en un TS.

`pesinfo`: analiza la información contenida en un PES y la muestra en pantalla.

`pesvideo2ts`: encapsula un PES de video en un TS.

`tschrmmuxer`: multiplexa los flujos de audio y video de todos los servicios, las tablas PSI/SI y los flujos que contienen la información de la aplicación interactiva, en un flujo único de transporte TS.

`tspcrmeasure`: presenta la tasa de bits de un TS.

`tsstamp`: corrige los PCR de un TS para que la llegada de los paquetes al STB sea precisa. Un PCR (*Program Clock Reference*) permite al decodificador presentar el contenido sincronizado.

### 3.2 Generación de un flujo único de paquetes de transporte TS para un servicio sin aplicación interactiva

En la Fig.6 se muestra el proceso que debe seguirse para obtener a partir de un video un archivo .ts que contenga el flujo único de paquetes de transporte. Inicialmente se separa del archivo original su audio y video. Este proceso de separación da como resultado un ES de audio y un ES de video, luego de lo cual cada ES se procesa por separado. A cada ES se le añade una cabecera transformándolo así en un PES. Un PES es un archivo de gran tamaño, por lo que es necesario dividirlo en paquetes de 184 bytes y añadir a cada uno de estos paquetes una cabecera de 4 bytes, obteniendo así 188 bytes que conforman un paquete TS. Este TS se almacena en un archivo .ts.

Una vez que se tiene un archivo .ts de audio, y uno de video, se deben generar las tablas PSI/SI y convertirlas en un archivo .ts. OpenCaster incluye un script en Python el cual debe ser modificado de acuerdo a las necesidades del usuario para generar estas tablas. También es necesario un archivo null.ts, el cual contiene un paquete nulo, y que ayudará a mantener la tasa de datos constante (29,9582 Mbps) en caso de que el audio, video y tablas PSI/SI no lo consigan.

Una vez se dispone de todos estos archivos, se procede a multiplexarlos para obtener finalmente el flujo único de paquetes de transporte TS; luego es necesario sincronizar las estampillas de tiempo para que los paquetes lleguen en el orden correcto al receptor; al final del proceso se obtiene un archivo que contiene el flujo único de paquetes de transporte TS, el cual puede ser entregado al transmisor para su posterior difusión.

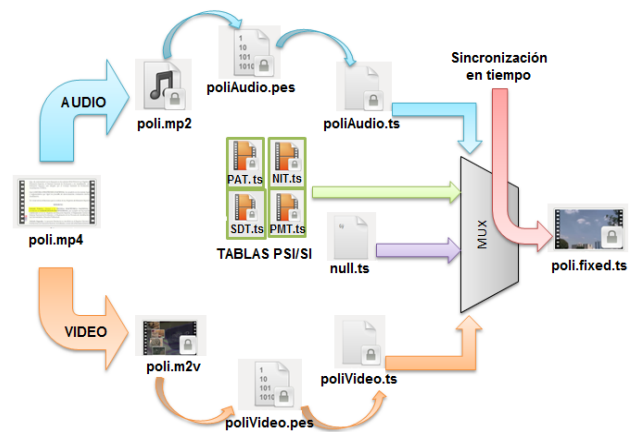


Figura6. Procedimiento para la generación del flujo

Este proceso se presenta mediante un ejemplo práctico para clarificarlo, una explicación detallada de los diferentes valores empleados en los comandos presentados se puede encontrar en [6], [12], [19]:

1. Es necesario colocar en una sola carpeta todos los archivos necesarios, por ejemplo: el script para generación de tablas `gtables.py`, el archivo con el paquete nulo `null.ts` y el video que será procesado `poli.mp4`.
2. Editar el script de generación de tablas para especificar, por ejemplo, un ID de red, los ID de los servicios que se incluirán, los ID de las tablas, entre otros. Una vez editado el archivo se lo ejecuta:
 

```
$ python gtables.py
```
3. Convertir el video al formato AVI (*Audio Video Interleave*). Este paso es necesario debido a que luego de realizar varias pruebas se comprobó que este formato de video permite que OpenCaster realice su trabajo correctamente. Para esto se debe ejecutar el comando:
 

```
$ ffmpeg -i poli.mp4 -s 720x576 -r 25 -aspect 16:9 -b 5000k convertido.avi
```
4. Obtener el ES de audio:
 

```
$ ffmpeg -i convertido.avi -vn -ac 2 -acodec mp2 -f mp2 -ab 128000 -ar 48000 poli.mp2
```
5. Obtener el ES de video:
 

```
$ ffmpeg -i convertido.avi -an -vcodec mpeg2video -f mpeg2video -s 720x576 -r 25 -aspect 16:9 -deinterlace -b 5000k -minrate 5000k -maxrate 5000k -bf 2 -bufsize 1835008 poli.m2v
```
6. Encapsular el ES de audio en un PES de audio:
 

```
$ esaudio2pes poli.mp2 1152 48000 384 3600 >poliAudio.pes
```
7. Encapsular el ES de video en un PES de video:
 

```
$ esvideo2pes poli.m2v >poliVideo.pes
```
8. Obtener el archivo .ts de audio:
 

```
$ pesaudio2ts 2075 1152 48000 384 0 poliAudio.pes >poliAudio.ts
```
9. Obtener el archivo .ts de video:

```

$ pesvideo2ts 2065 25 112 5750000 0
poliVideo.pes>poliVideo.ts
10. Multiplexar los archivos .ts de audio, video y tablas:
$tsctbrmuxer 4220000 b:15040pat.ts
b:15040 pmt_sd.ts b:3008 sdt.ts
b:3008 nit.ts b:5750000 poliVideo.ts
b:188000 poliAudio.ts
b:23984198null.ts>poli.ts
11. Sincronizar audio y video:
$ tsstampmpoli.ts 29958294
>poli.fixed.ts

```

### 3.3 Generación de un flujo único de paquetes de transporte TS para un servicio con aplicación interactiva

En la Fig.7 se presenta un diagrama de la generación del flujo único de transporte TS en caso de que exista una aplicación interactiva. Tanto audio como video serán procesados de la misma manera que en el caso anterior, la diferencia es que cuando se incluye una aplicación interactiva se necesitan los archivos de la aplicación en formato .ts para el multiplexado final, para lo cual se debe generar un carrusel de objetos del directorio que contiene el código de la aplicación y los medios. También es necesario incluir la tabla AIT en el multiplexado. Finalmente, todos los archivos obtenidos ingresan al multiplexor, teniendo a la salida, el flujo único de paquetes de transporte TS final, que incluye audio, video, tablas y la aplicación interactiva y que podrá ser entregado al transmisor.

El proceso de generación de un flujo único de paquetes de transporte TS para un servicio con aplicación interactiva se presenta mediante un ejemplo práctico para clarificarlo:

1. Es necesario colocar en una sola carpeta todos los archivos necesarios, por ejemplo: el script para generación de tablas (gtables.py), el archivo con el paquete nulo (null.ts) y el video que será procesado (poli.mp4), así como la carpeta que contiene el código y los medios de la aplicación interactiva (Ginga).
2. Generar el carrusel de objetos:

```
$ oc-update.shGinga 0x0C 1 2004 2
```

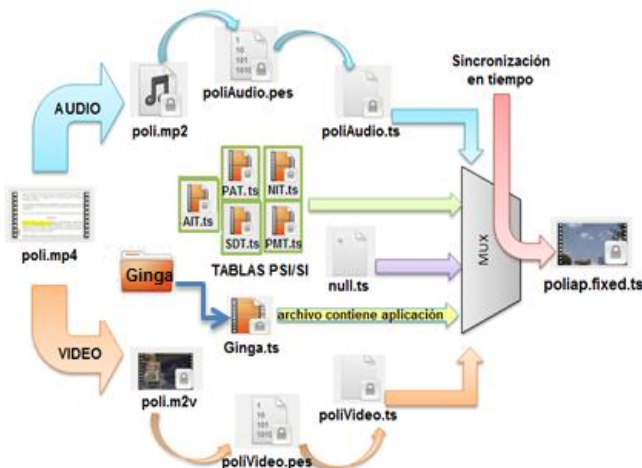


Figura 7. Procedimiento para la generación del flujo con interactividad

3. Editar el script de generación de tablas para incluir la tabla AIT y ejecutarlo:

```
$ python gtables.py
```
4. Obtener los archivos .ts de audio y video siguiendo el proceso descrito en el caso anterior. Multiplexar todos los archivos .ts mediante:

```
$tsctbrmuxer 4220000 b:15040pat.ts
b:15040 pmt_sd.ts b:3008 sdt.ts
b:3008 nit.tsb:3008
ait.tsb:2500000Ginga.ts b:5750000
poliVideo.ts b:188000 poliAudio.ts
b:21481190null.ts>poliap.ts
```
5. Sincronizar la llegada de audio y video al STB, incluyendo las estampillas de tiempo sincronizadas:

```
$ tsstampmpoliap.ts 29958294
>poliap.fixed.ts
```

## 4. AUTOMATIZACIÓN DEL PROCESO DE GENERACIÓN DE FLUJOS ÚNICOS DE PAQUETES DE TRANSPORTE TS MEDIANTE UNA APLICACIÓN

Como se presentó en la sección anterior, para generar los flujos, es necesario que el usuario conozca una serie de parámetros, configuraciones y comandos que deben emplearse para la generación de los flujos únicos de paquetes de transporte TS mediante OpenCaster. Si el usuario comete un error en uno de los pasos, o emplea un valor equivocado en una opción de los comandos u olvida ejecutar uno de los procesos posible que el archivo con el flujo único de paquetes de transporte tenga errores o no se genere.

Para automatizar este proceso y reducir la complejidad del mismo, y debido a que OpenCaster no dispone de una interfaz gráfica, se desarrolló una aplicación que sirva como interfaz entre el usuario y OpenCaster y simplifique el proceso de generación del flujo único.

### 4.1 Requerimientos previos a la generación

Existen dos herramientas importantes que ayudan con información y procesamiento antes de realizar la multiplexación: *ffmpeg*: es un programa que permite la conversión rápida de formato de audio y video con gran calidad, haciéndola incluso en tiempo real, además incluye libavcodec, que es la librería de codificación de audio y video más importante actualmente, soporta una gran variedad de formatos tanto para audio como para video. Es necesario para la generación, ya que ayuda a obtener los ES, tanto de audio como de video; *tovid*: es una herramienta de software libre que reúne una colección de herramientas para Linux, y permite crear DVD, es importante para la generación ya que brinda información sobre las propiedades del video fuente. Para lograr la generación de los flujos únicos de paquetes de transporte TS, se utilizan las tablas PSI/SI, las cuales típicamente se generan mediante un script en Python, que contiene el código de las distintas tablas; este script debe ser modificado manualmente dependiendo del número de servicios que se vayan a multiplexar, así como también si se incluye o no una aplicación interactiva. Lo mencionado

implica tener conocimiento de la estructura de las tablas PSI/SI y sus descriptores, para que al momento de ejecutar el script en el terminal de Linux, no se generen errores. El generador de flujos se encarga de la manipulación y modificación de los scripts para así evitar al usuario complicaciones que se puedan presentar.

Los scripts que internamente emplea el Generador de Flujos permiten multiplexar hasta tres programaciones, que es el número que se está exigiendo en el Ecuador en las concesiones temporales que actualmente tienen los canales de TV para realizar sus pruebas con señales de TV digital.

Los scripts incluyen los comandos que determinan las acciones a realizarse en el shell de Linux, es decir los ejecutables que serán invocados con las opciones que sean adecuadas y en el orden indicado anteriormente, y dependiendo de si se incluye o no una aplicación interactiva. En base a lo ingresado por el usuario en la ventana principal y si desea en la ventana de opciones avanzadas, la aplicación modifica estos scripts para que generen adecuadamente las tablas PSI/SI que correspondan.

La aplicación emplea dos hilos de ejecución (*threads*), uno para manejar la interfaz de usuario y otro para realizar el procesamiento contemplado en el script. Cuando el hilo concluya el procesamiento se le informará al usuario que el proceso ha concluido. El Generador de Flujos fue desarrollado usando Qt que a su vez se basa en C++.

#### 4.2 Implementación del Generador de Flujos

Para el desarrollo de esta aplicación se plantearon los siguientes objetivos: elaborar una interfaz gráfica amigable para el usuario, y que sea fácil de usar; permitir al usuario modificar información importante para la generación de los flujos únicos de paquetes de transporte TS; automatizar el proceso de generación y simplificarlo; permitir que el usuario modifique características propias del video como: resolución, relación de aspecto, calidad de video, entre otros.

Estos objetivos fueron modelados mediante un diagrama UML (*Unified Modeling Language*) [4] de casos de uso, el mismo que se presenta en la Fig. 8.

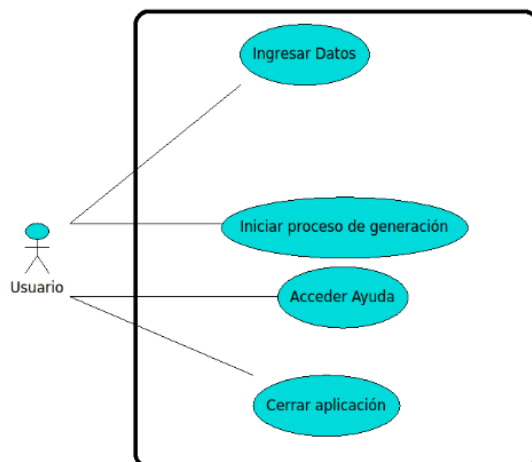


Figura 8. Diagrama de casos de uso del Generador de Flujos

El usuario de la aplicación no requiere conocimientos avanzados sobre OpenCaster, pero si es necesario que conozca algunas particularidades del procesamiento de audio y video, sobre todo si desea modificar ciertas características en el proceso de generación de flujos únicos de paquetes de transporte TS, para ello la aplicación ofrece un modo avanzado de operación. En la Tabla 1 se detalla cada caso de uso y las actividades que debe realizar la aplicación.

#### 4.3 Ventanas del Generador de Flujos

Al iniciar el Generador de Flujos se presenta la ventana principal que se muestra en la Fig.9. Esta ventana permite seleccionar el archivo de video para su procesamiento y establecer el número de programaciones, el tipo de servicio (LD, SD, HD), la aplicación que se incluirá o si se desea establecer opciones avanzadas. En la ventana principal del Generador de Flujos se encuentran los siguientes elementos:

1. Botón buscar: despliega una ventana que permite seleccionar el directorio donde se guardará el resultado.
2. Directorio: espacio que muestra la ubicación completa del directorio seleccionado.
3. Nombre: en este espacio se ingresa el nombre que se desea dar al archivo que contendrá el flujo único de paquetes de transporte TS.
4. Programaciones: permite establecer el número de programaciones que serán multiplexadas.
5. Tipo de servicio: permite escoger el tipo de servicio que se quiere tener en cada una de las programaciones.
6. Directorios: muestran los directorios completos de los videos escogidos por el usuario.
7. Botones buscar: abren ventanas que permiten la selección de los archivos de video que van a ser multiplexados, estos archivos de preferencia deben tener formato .avi o .mp4.
8. Resolución: permite seleccionar resoluciones contempladas en la norma de acuerdo al tipo de servicio.
9. Aplicación: al seleccionar un servicio, se tiene la opción de incluir una aplicación interactiva al flujo único de paquetes de transporte TS.

Tabla 1. Casos de uso del Generador de Flujos

Caso de uso	Aplicación
Ingresar Datos	Habilitar funcionalidades
Iniciar proceso de generación	Guardar datos y realizar los procesos correspondientes. Comprobar los datos ingresados. Modificar los scripts en función de la información ingresada por el usuario. Ejecutar los scripts en un proceso. Informar al usuario sobre el proceso.
Acceder a la Ayuda	Presentar un manual de ayuda.
Cerrar aplicación	Limpiar, finalizar proceso y cerrar aplicación.

10. Buscar aplicación: abre una ventana que permite la selección del archivo principal .ncl de la aplicación a ser incluida. Se debe aclarar que para la generación del carrusel de objetos se empearán todos los archivos que estén en el mismo directorio que el archivo principal .ncl.
  11. Directorio aplicación: contiene la ubicación completa del archivo .ncl.
  12. Botón opciones avanzadas: abre la ventana secundaria que permite ingresar información técnica adicional sobre el flujo único de paquetes de transporte TS.
  13. Botón generar: al pulsar el botón generar empieza a procesar toda la información adquirida anteriormente, el usuario deberá esperar unos minutos para obtener su flujo único de paquetes de transporte TS final.
  14. Botón limpiar: permite limpiar todos los campos mostrados en la ventana principal en caso de alguna equivocación al ingresar los datos.
  15. Botón cerrar: permite salir de la aplicación.
- La aplicación Generador de Flujos contiene una ventana secundaria, la misma que permite a usuarios con más conocimientos, ingresar información adicional para la generación. Esta ventana se presenta en la Fig. 10. En la ventana secundaria del Generador de Flujos se encuentran los siguientes elementos:
1. Nombre del canal: en este campo el usuario puede ingresar el nombre que quiere darle al canal.
  2. Frecuencia central: en este campo el usuario debe ingresar la frecuencia central en MHz, correspondiente al canal en el que se quiere transmitir el flujo.
  3. Código de área: permite ingresar el código de área correspondiente al lugar de transmisión.
  4. Intervalo de guarda: permite seleccionar el intervalo de guarda que se utilizará para transmisión, este parámetro es importante para que no exista interferencia entre símbolos.
  5. Modo de transmisión: permite seleccionar el modo que va utilizar el flujo único de paquetes de transporte TS, este valor está relacionado con el número de portadoras OFDM.
  6. Nombre del proveedor: permite ingresar el nombre del proveedor del servicio, la fuente de donde se obtuvo el video.
  7. Nombre del servicio: permite establecer el nombre que el usuario le asignará a su servicio, de preferencia debería tener relación con el tipo de servicio.
  8. Número identificador de programa: este campo permite al usuario ingresar el número que identifica al programa que se está transmitiendo.
  9. PID de audio: el usuario debe ingresar el número identificador de los paquetes de audio, debe tomar en cuenta que este valor debe estar entre 16 y 8190.
  10. PID de video: el usuario debe ingresar el número identificador de los paquetes de video, debe tomar en cuenta que este valor debe estar entre 16 y 8190.
  11. Relación de aspecto: el usuario puede escoger de acuerdo al tipo de servicio, la relación de aspecto que requiera cada programación.

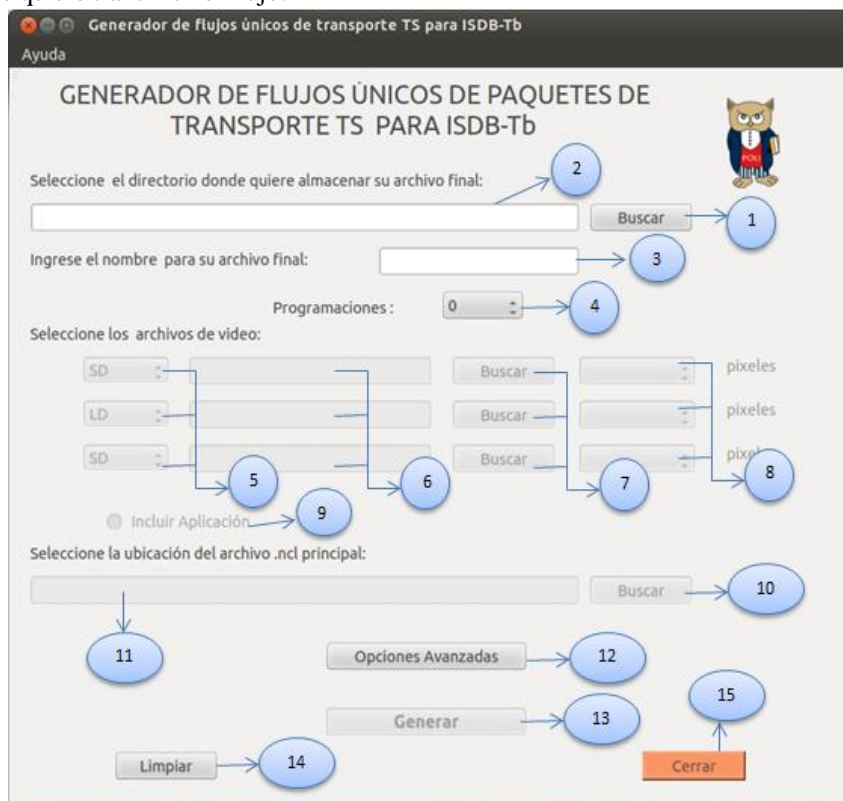


Figura 9. Ventana principal de la aplicación

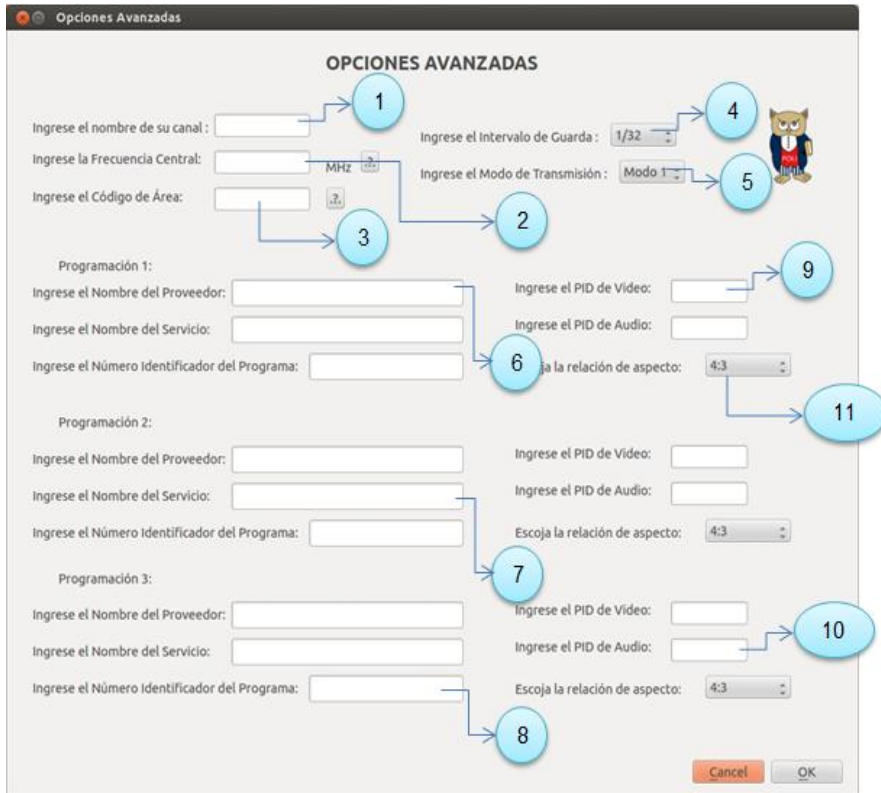


Figura 10. Ventana secundaria de opciones avanzadas

5. RESULTADOS

5.1 Escenario de pruebas

En la Fig. 11 se presenta los elementos empleados para realizar las pruebas con los flujos generados. Entre estos elementos están: PC, dispone del software StreamXpress del transmisor, y del archivo del flujo único de paquetes de transporte TS generado, sus características se resumen en la Tabla 2; transmisor, DEKTEC DTU-215-I-SP, que realiza la respectiva modulación y transmisión del flujo único de paquetes de transporte TS generado, una imagen del dispositivo real se presenta en la Fig. 12; STB: uno marca EiTVDDeveloper Box y uno marca CORADIR CDR1000D, una imagen de estos dispositivos se presenta en la Fig. 13.

Tabla 2. Características del PC utilizado

Tipo	Características
Sistema Operativo	Windows 7
Procesador	AMD Athlon (tm) II Dual-Core M300, 2GHz
Memoria RAM	3 GB
Espacio en Disco	60 GB
Pantalla	Resolución: 1024 x 768, colores de 32 bits

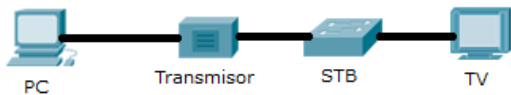


Figura 11. Escenario de pruebas

5.2 Resultados de las pruebas realizadas

Para comprobar el correcto funcionamiento de las aplicaciones, se realizaron muchas pruebas que están reportadas en [19]. Las pruebas incluyeron casos en los que se incluían una o varias programaciones sin utilizar las configuraciones avanzadas y otros casos en los que sí, además de integrar aplicaciones interactivas.



Figura 12. Transmisor DEKTEC DTU-215-I-SP [7]



Figura 13. Set-Top Box Coradir e EiTV[9]

La Fig. 14 indica las capturas de pantalla del software StreamXpress, con los parámetros para la transmisión de dos servicios y la visualización de lo recibido en el STB Coradir y presentado en un televisor. La Fig. 15 presenta los resultados de la recepción de la señal BTS en el STB y luego en el televisor, en este caso se visualizan tres imágenes correspondientes a cada uno de los servicios y una imagen que muestra la lista de programaciones. La Tabla 3 contiene información general del flujo generado e indica: el nombre del archivo, los tipos de servicios y el número de programaciones. La señal BTS generada y luego transmitida, cuenta con tres programaciones, cada una con audio y video sincronizados, la calidad de las tres programaciones es HD, respectivamente; no se visualizó problemas de imágenes pixeladas, ni imágenes congeladas, por lo que se comprobó la correcta generación del flujo con tres servicios.

Es importante mencionar, que debido a que OpenCaster está orientado a generar flujos para el estándar europeo DVB, a pesar de la modificación realizada por LIFIA, los flujos generados emplean la compresión MPEG-2 para el video y MPEG-1 para el audio, lo que no se ajusta a lo señalado en el estándar ISDB-Tb. Por tal motivo, se requiere realizar una transcodificación del video para obtener un flujo transmitido que emplee MPEG-4. El transmisor DEKTEC DTU-215-I-SP ofrece esta funcionalidad por lo que el sistema de pruebas básico presentado permite hacer las pruebas de los flujos incluidas las aplicaciones interactivas.

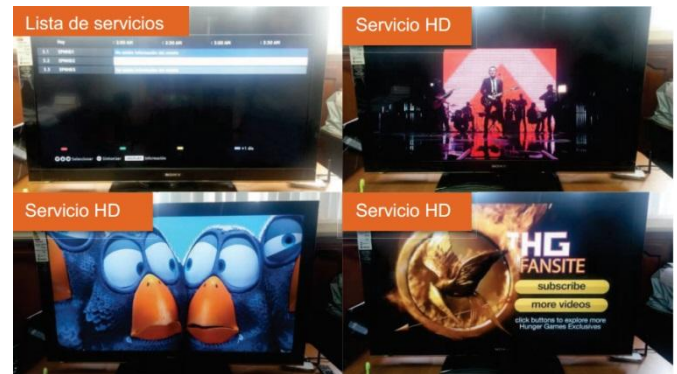


Figura 15. Servicios recibidos en el STB EITV y presentados en un televisor

Tabla 3. Información general del flujo generado

<b>Nombre del archivo final</b>	3serviciosHDHDHD.ts
<b>Tipo de Servicios</b>	HD-HD-HD
<b>Número de programaciones</b>	3

## 6. CONCLUSIONES

Para lograr la generación de los flujos únicos de paquetes de transporte TS mediante software, una opción es utilizar OpenCaster, que usa líneas de comando con varios argumentos, numerosos en varios casos, y cada uno con valores permisibles sobre los cuales no existe información suficiente, lo que constituye un problema al momento de la generación de estos flujos; problema que se solucionó mediante la consulta de documentos referentes al tema y, principalmente, mediante la realización de un amplio grupo de combinaciones, usando el método de ensayo y error, con lo que se consiguió los parámetros para la correcta generación. Para el desarrollo de la aplicación Generador de Flujos Únicos de Paquetes de Transporte TS, se utilizó Qt con C++, y un conjunto de librerías que facilita la implementación de interfaces gráficas en Linux.

A través del Generador de Flujos, el usuario ya no tiene la necesidad de emplear la línea de comandos, pues la aplicación es la que esconde esos detalles y realiza la comunicación con el terminal de Linux para dar las órdenes a OpenCaster y así realizar la generación.

En base a un gran número de pruebas con diferentes flujos conteniendo más de una aplicación interactiva, se comprobó que estas pruebas no fueron exitosas, por lo que se evidenció que OpenCaster no multiplexa de forma correcta más de una aplicación interactiva. La aplicación desarrollada considera esta limitación, permitiendo que solamente se pueda colocar una aplicación interactiva en un servicio.

El trabajo futuro incluye la tarea de una revisión más profunda para tratar de multiplexar en un mismo flujo varias aplicaciones interactivas asociadas a diferentes servicios, de ser posible.

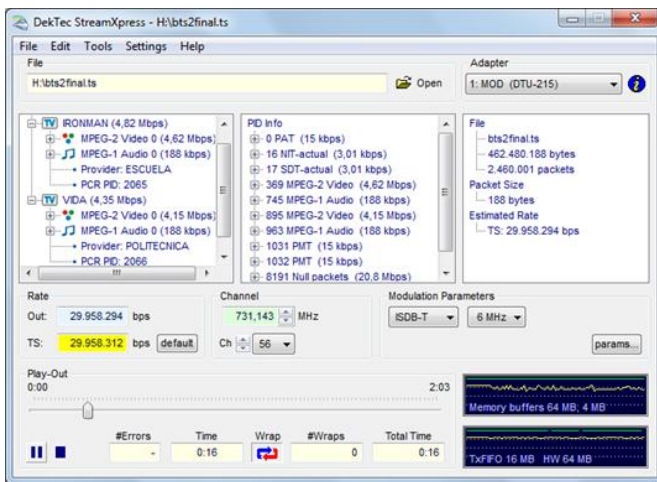


Figura 14. Parámetros de Transmisión empleados en StreamXpress2 para dos servicios y resultados visualizados con el STB Coradir



## REFERENCIAS

- [1] ABN NBR 15603-1 Televisión Digital Terrestre - Multiplexación y servicios de información (SI) Parte 1: SI del sistema de radiodifusión, Asociación Brasileira de Normas Técnicas, 2007. Disponible: [http://www.abnt.org.br/imagens/Normalizacao\\_TV\\_Digital/ABNTNB R15603-1\\_2007Vc\\_2008.pdf](http://www.abnt.org.br/imagens/Normalizacao_TV_Digital/ABNTNB R15603-1_2007Vc_2008.pdf).
- [2] ABN NBR 15603-2 Televisión Digital Terrestre - Multiplexación y servicios de información (SI) Parte 2: Estructura de datos y definiciones de la información básica de SI, Asociación Brasileira de Normas Técnicas, 2007. Disponible: [http://www.abnt.org.br/imagens/Normalizacao\\_TV\\_Digital/ABNTNB R15603-2\\_2007Vc\\_2008.pdf](http://www.abnt.org.br/imagens/Normalizacao_TV_Digital/ABNTNB R15603-2_2007Vc_2008.pdf).
- [3] Anónimo, "MPEG transport stream Pictures, MPEG transport stream Image, Computer Photo Gallery." Disponible: <http://withfriendship.com/user/mithunss/mpeg-transport-stream.php>.
- [4] Anónimo, "UML diagram software - create sequence diagrams, use case diagrams, and more with UML Diagrammer." Disponible: <http://www.pacestar.com/uml/>.
- [5] AVALPA; OpenCaster, Disponible: <http://www.avalpa.com/the-key-values/15-free-software/33-opencaster>.
- [6] D. Vargas, "Selección de contenidos OneSeg a través del Canal de Retorno", Perú, 2013.
- [7] "DekTec - DTU-215 - USB-2 VHF / UHF del modulador." [Online]. Disponible: <http://www.dektec.com/Products/USB/DTU-215/>.
- [8] EITV, <http://www.eitv.com.br/en/produtos/eitv-playout-professional>.
- [9] EITV, "EiTVDeveloper Box - Set-top box ISDB-T y IPTV de desarrollo de aplicativos Ginga (DTVi)." [Online]. Disponible: [http://www.eitv.com.br/devbox\\_es.php](http://www.eitv.com.br/devbox_es.php).
- [10] INTI, Instituto Nacional De Tecnología Industrial, "INTI Introducción a Televisión Digital. Estándar ISDB-T," Octubre 2011. Disponible: <http://www.inti.gob.ar/electronicaeinformatica/utc/pdf/ISDBT-2011.pdf>.
- [11] J. Valencia e I. Bernal, "Desarrollo de Aplicaciones Interactivas para TV Digital orientadas a formar a la Población en Desastres Naturales". Quito-Ecuador. Revista Politécnica, 2013.
- [12] L. Venegas, "Generación de una trama BroadcastTransportStream (BTS) usando el software libre OpenCaster", Perú, 2012.
- [13] LIFIA, Página oficial, Disponible: <http://www.avalpa.com/>
- [14] LIFIA, Parche para OpenCaster, Disponible: <ftp://tvd.lifia.info.unlp.edu.ar/OpenCaster2.4/>.
- [15] LIFIA, "OpenCaster para SATVD-T", Mayo de 2011.
- [16] M. Sebastini y B. How, "MPEG 101 - Transport Stream Demystification"; Puerto Rico; 2011.
- [17] R. Brice, "Newnes Guide to Digital TV". Elseiver, 2da edición, 2003.
- [18] R. de Bruin and J. Smits, Digital video broadcasting: technology, standards, and regulations. ArtechHouse, 1999.
- [19] T. Moncayo y M. Pozo; "Generación de un Flujo Único de Paquetes de Transporte de acuerdo a la norma ISDB-Tb y Desarrollo de una aplicación para su análisis"; EPN, Quito-Ecuador, 2014.

# Desarrollo de un Analizador de Flujos Únicos de Paquetes de Transporte TS Conformados de Acuerdo a la Norma de TV Digital ISDB-Tb

Pozo M.\*; Moncayo T.\*; Bernal I.\*; Mejía D.\*

\* Escuela Politécnica Nacional, Departamento de Electrónica, Telecomunicaciones y Redes de la Información (DETRI)  
Quito, Ecuador  
(e-mail: pozocaicedom@gmail.com, tatiana\_23.moncayo@hotmail.com, {ivan.bernal; david.mejia}@epn.edu.ec)

**Resumen:** Este artículo presenta una breve síntesis acerca de la estructura de los flujos únicos de paquetes de transporte TS, así como del desarrollo de la aplicación orientada al análisis de los mencionados flujos. La aplicación desarrollada permite el análisis de flujos únicos que contengan no solo múltiples flujos correspondientes a varias programaciones multiplexadas y de las tablas PSI/SI, sino también para flujos que contengan el código y los medios necesarios para que se difundan aplicaciones interactivas. Se presentan también los resultados obtenidos al emplear la aplicación desarrollada para el análisis de flujos generados por diferentes instituciones y empleando diferentes mecanismos.

**Palabras clave:** TS (Transport Stream), BTS (Broadcast Transport Stream), ISDB-Tb (Integrated Service Digital Broadcasting – Terrestrial con modificaciones brasileñas), Tablas PSI/SI (Program Information/Service Information).

**Abstract:** This article presents a short synthesis about the structure of single TS transport packet streams and the development of an application focused on analyzing the just mentioned type of streams. This new application allows analyzing not only single streams containing both multiples streams corresponding to several program signals all of them multiplexed with PSI/SI Tables but also unique flows that include the code and media necessary to broadcast interactive applications. The results obtained by employing this new application for analyzing streams generated by different institutions and using different mechanisms are also presented.

**Keywords:** TS (Transport Stream), BTS (Broadcast Transport Stream), ISDB-Tb (Integrated Service Digital Broadcasting – Terrestrial with Brazilian modifications), PSI/SI Tables (Program Information/Service Information).

## 1. INTRODUCCIÓN

El Ecuador adoptó el estándar ISDB-Tb para televisión digital en marzo de 2010, lo que ha iniciado un cambio tecnológico que afectará a la población ecuatoriana; en particular, este cambio demanda que se estudie y conozca en detalle el estándar en aspectos relacionados a la conformación de los flujos de las programaciones a transmitirse que incluirán audio, video, datos y aplicaciones multiplexados.

Se considera imperativo analizar la estructura de los flujos únicos de paquetes de transporte TS, para lo cual se debe considerar que el estándar ISDB-Tb utiliza para la multiplexación una parte del estándar MPEG-2, el esquema denominado *Transport Stream* (TS) [10] [11], usado para la

transmisión de información por satélite, cable y ondas terrestres. El TS contiene información de varios canales, por lo cual soporta diferentes bases de tiempo, utiliza paquetes pequeños, de tamaño fijo, y debido a la susceptibilidad del TS al ruido, incluye métodos para corrección y detección de errores (CRC, Reed-Solomon).

Se conoce que existen aplicaciones y equipos comerciales cuya función es el análisis de los TS (*Transport Stream*) de MPEG-2, empleados en ISDB-Tb, así por ejemplo: el software TSReader y el TS-7815 MPEG-2 TS *Portable Analyzer*, de la empresa Astro que se comercializan a un precio elevado.

Sin embargo, a la fecha de inicio del proyecto no se conocía de una aplicación de software libre que analice los flujos únicos de paquetes de transporte TS definidos por el estándar ISDB-Tb, por lo que el desarrollo de una nueva aplicación aportará en esta dirección y será de utilidad en la configuración de los transmisores que acepten estos flujos para transmitirlos.

Artículo recibido el 12 de diciembre de 2014. Este trabajo fue financiado por la Escuela Politécnica Nacional y con el soporte del MINTEL en el marco de las "Iniciativas sobre TV Digital" (<http://ginga.epn.edu.ec>) que se desarrollan en el DETRI bajo la dirección de David Mejía, MSc. e Iván Bernal, Ph.D. Información de contacto: Iván M. Bernal, e-mail: ivan.bernal@epn.edu.ec, Tel: 593-2-2507-144 ext.2338. Escuela Politécnica Nacional. Ladrón de Guevara E11 - 253. Quito, Ecuador.

Para poder desarrollar una aplicación que analice los flujos en mención, se debe a su vez analizar en detalle la estructura tanto del TS de MPEG-2 así como la del BTS (*Broadcast Transport Stream*), ambos empleados en el estándar ISDB-Tb, centrándose en los diferentes campos de control y sus funciones [9] [13].

El artículo está organizado de la siguiente manera: en la sección 2 se presenta una breve descripción de los TS, flujos únicos de paquetes de transporte TS, de los BTS, y de las tablas PSI/SI; en la sección 3 se presentan las herramientas utilizadas para la implementación de la aplicación para el análisis de los flujos únicos de paquetes de transporte TS y la idea fundamental seguida para su desarrollo. En la sección 4 se describe la interfaz gráfica de la aplicación y las tareas que un usuario puede realizar con la misma. En la sección 5 se presentan los resultados obtenidos con la aplicación desarrollada. Finalmente, en la sección 6 se presentan las conclusiones del trabajo.

2. TRANSPORT STREAM Y BTS

Como se presenta en la Fig. 1 [8], para el caso de una sola programación, para obtener un paquete TS, el audio y el video pasan por un proceso de codificación y compresión MPEG-4, formando cada uno de ellos un flujo elemental de información denominado ES (*Elementary Stream*). Un ES, sea de audio o video, pasa por un paquetizador, que convierte un ES en un PES (*Packetized Elementary Stream*), además el estándar MPEG soporta la paquetización de otro tipo de información adicional (datos).

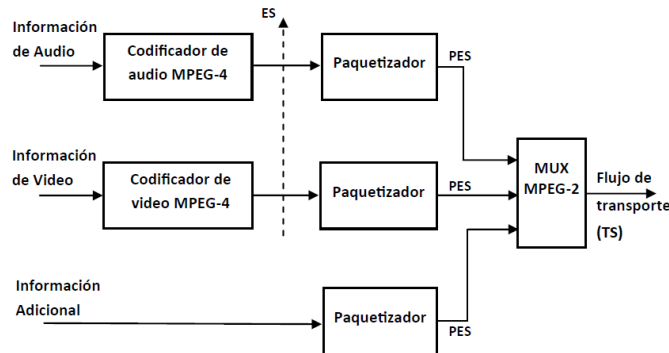


Figura 1. Conformación del Flujo de Transporte (*Transport Stream*)

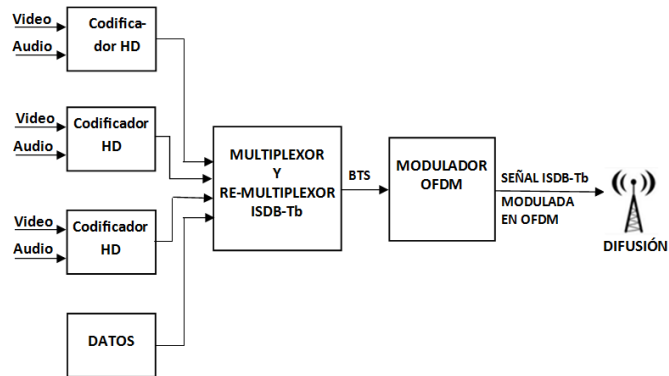


Figura 2. Conformación del BTS con varias programaciones

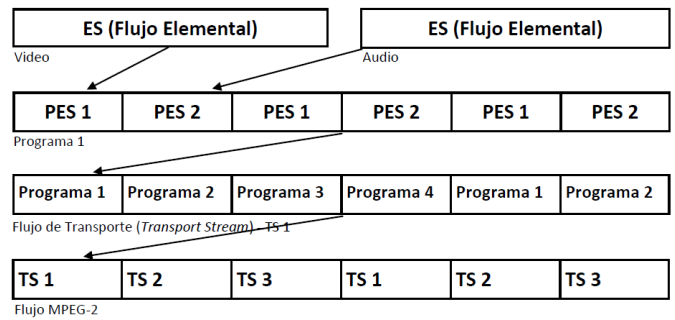


Figura 3. Conformación del TS con varias programaciones

Los paquetes PES contienen información de los ES y son de tamaño variable, con una longitud máxima de 64 Kbytes de carga útil y 6 bytes de cabecera [13]. Luego de tener los paquetes PES de audio, video y datos, se procede a su multiplexación para combinarlos en un solo flujo de paquetes de longitud constante (188 bytes) denominados paquetes TS.

En el estándar ISDB-Tb, para formar la trama *Broadcast Transport Stream* (BTS), varios programas pueden ser re-multiplexados (Fig. 2 y 3 [4]) junto con datos que pueden ser de aplicaciones interactivas a radiarse. El BTS tiene como unidad básica el TSP (*Transport Stream Packet*) que tiene un tamaño fijo de 204 bytes.

El flujo BTS (Fig. 2) incluye un proceso de codificación Reed Solomon realizado en el transmisor, por lo que se aclara que la aplicación desarrollada analiza el flujo previo a este proceso de codificación, que en el estándar se denomina "flujo único de paquetes de transporte TS".

De los 88 bytes del paquete TS, 4 son de cabecera y el resto corresponde a información, como se muestra en la Fig. 4 [7].

2.1 Cabecera del paquete TS

En la cabecera del paquete TS (Fig. 4) se tiene: un byte de sincronismo; luego, viene un conjunto de tres banderas para indicar cómo debe procesarse la carga útil: un bit de error de transporte, que si está en 1L indica la existencia de al menos un bit erróneo no corregido dentro del paquete; el bit indicador de inicio de paquete PES, que si está en 1L señala que la carga útil del paquete TS contiene el inicio de un paquete PES; y, el bit de prioridad de transporte, que si está en 1L indica que este paquete tiene mayor prioridad que otros con el mismo identificador de paquete.

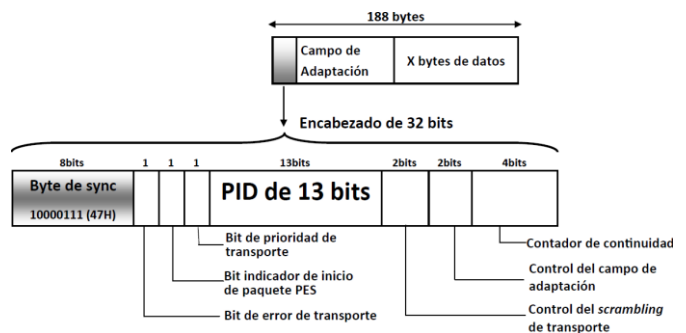


Figura 4. Estructura de un paquete TS

Luego de estas banderas, se tienen 13 bits del PID (*Packet Identifier*), que especifica el tipo de información que se encuentra en la carga útil. A continuación del PID se tienen dos bits para el control del *scrambling* de transporte, que indican el modo de *scrambling* de la carga útil del paquete TS, la cabecera y el campo de adaptación no deben tener *scrambling*; en caso de un paquete nulo, este campo debe tener el valor 00, las demás combinaciones son definidas por el usuario. Los siguientes dos bits de control indican si a continuación de la cabecera se tendrá un campo de adaptación y/o carga útil. Por último, el contador de continuidad se incrementa con cada paquete del mismo PID y no se incrementa cuando no existe información en el bloque de datos del paquete, es decir que el paquete solo tiene un campo de adaptación más no información o es un paquete a ser descartado.

De forma análoga a los PES, se tienen las denominadas Secciones que son paquetizadas y transportadas en los paquetes TS. Una Sección encapsula las tablas PSI/SI y carrusel de datos para organizar la transmisión de las aplicaciones interactivas y sus medios.

## 2.2. Tablas PSI/SI [9] [10]

Las tablas PSI/SI (*Program Specific Information/Service Information*), contienen datos con información del TS para que sea recibido correctamente en el decodificador, y así poder localizar tanto el video como el audio de cada programación; además, permiten la sintonización automática de los terminales, creación de la guía electrónica de programación (EPG), entre otros.

### Tablas PSI

Las tablas PSI están definidas en la norma MPEG-2, proveen información específica de uno o varios programas que fueron multiplexados y su función principal es ayudar en la demultiplexación y la presentación de la información en el decodificador. Las tablas que contribuyen con información específica del programa son:

- *Program Association Table* (PAT): proporciona la correspondencia entre el número de programa y los paquetes de audio, video y datos que lo componen.
- *Program Map Table* (PMT): define los PID que identifican los flujos individuales que constituyen un programa.
- *Conditional Access Table* (CAT): empleada para definir los accesos en servicios del tipo *pay-per-view*.

### Tablas SI

Las tablas SI funcionan como complemento de las tablas PSI, permiten el control del receptor y el envío de la EPG, aplicaciones interactivas, entre otros servicios. Por esta razón

se las llama tablas de servicios de información. Las tablas SI especificadas en la norma ABNT NBR 15603-1 son 15, las que brindan más información se citan a continuación, mientras que las restantes se las puede encontrar en [5] y [10].

- *Network Information Table* (NIT): ayuda en la sintonización de un nuevo canal.
- *Service Description Table* (SDT): describe los servicios contenidos en el TS, los nombres de proveedores, los nombres de los canales.
- *Application Information Table* (AIT): contiene información sobre la aplicación interactiva.

Una descripción detallada de los parámetros contenidos en cada una de las Tablas PSI/SI, incluyendo su semántica y utilidad, se puede encontrar en [9] [10] [11], y algunos de ellos se enumeran en varias figuras de la sección 5.

## 2.3 BTS (Broadcast Transport Stream)

En el estándar ISDB-Tb, audio, video y datos deben ser multiplexados formando el *Transport Stream* (TS) y todos los programas deben ser re-multiplexados para formar el flujo único de paquetes de transporte TS, el cual después de realizar un proceso de codificación a la salida del re-multiplexor pasa a formar parte de la señal *Broadcast Transport Stream* (BTS) (Fig. 5 [2]).

Mediante la re-multiplexación, el estándar ISDB-T consiguió adaptar el TS de MPEG-2 de tal manera que funcione para transmisión jerárquica y recepción parcial.

La señal BTS está formada por tramas multiplexadas que se transmiten a una tasa constante de 32,5079 Mbps, cuya unidad básica es el TSP (*Transport Stream Packet*) que tiene un tamaño de 204 bytes, como se observa en la Fig. 5.

Los flujos únicos de paquetes de transporte TS, antes de ser encaminados a su destino, pasan por un proceso de codificación, se agregan 16 bytes denominados “*dummy bytes*”, de los cuales los 8 primeros bytes son para identificar la información de la capa jerárquica, contador de TSP e información auxiliar, y los 8 restantes identifican la paridad que se obtiene del codificador Reed-Solomon RS(204,188), con una capacidad de corrección de error de hasta 4 bytes en un TSP.

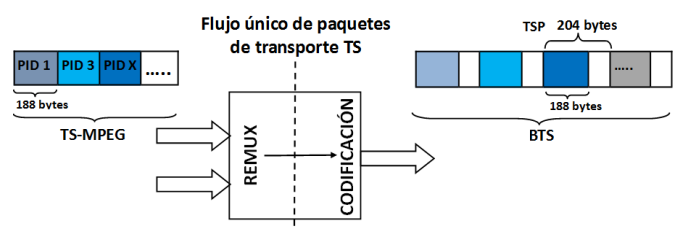


Figura 5. Re-multiplexación del Flujo de Transporte (*Transport Stream*)

**Tabla 1.** Características de la PC utilizada para desarrollo y pruebas

Tipo	Características
Sistema Operativo	Ubuntu 12.04
Procesador	Intel Core i7-3770 CPU 3.40 GHz de 4 núcleos.
Memoria RAM	4 GB
Espacio en Disco	88 GB
Pantalla	Resolución: 1920 x 1280, colores de 64 bits.

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 Materiales

##### 3.1.1 Plataforma de desarrollo y lenguaje de programación

El Analizador de Flujos Únicos de Paquetes de Transporte TS, en adelante denominado como “Analizador de Flujos”, fue desarrollado mediante Qt, software libre y multi-plataforma, que permite el diseño gráfico de la interfaz de usuario de una manera sencilla mediante Qt Designer. Qt utiliza C++ de forma nativa, su distribución está bajo los términos GNU LGPL 2.1 (*Lesser General Public License*). Si bien, por la naturaleza multi-plataforma de Qt, se la puede compilar y ejecutar Windows o en Linux, se ha utilizado Linux bajo las condiciones descritas en la Tabla 1.

La aplicación Analizador de Flujos requiere:

- Instalación previa de Qt Creator 4.8.4 (mínimo).
- Una carpeta con todos los archivos de la aplicación para su correcta compilación.

##### 3.1.2 Normas técnicas

Para realizar el presente trabajo se tomaron valores y recomendaciones especificadas en varias normas técnicas para TV, así:

- De Brasil, la ABNT (Asociación Brasileña de Normas Técnicas) ha sido la encargada de emitir las normas técnicas del estándar ISDB-Tb; nuestro trabajo se rige a la norma técnica ABNT NBR 15602 y 15603.
- El estándar MPEG -2.

#### 3.2 Métodos

Qt está basado en C++ y se puede aprovechar los paradigmas y metodologías asociadas a un lenguaje de programación orientada a objetos y la organización del código de la aplicación se basa en clases. La aplicación emplea dos hilos de ejecución, uno para manejar la interfaz de usuario y otro para realizar el procesamiento del archivo .ts.

Una vez abierto el archivo .ts, se lee la tabla PAT (188 bytes) y su contenido se guarda en un buffer, luego se extraen los bytes del buffer según su posición y se procede a clasificar esta información para ser presentada; de esta tabla se obtienen la información del número de servicios que contiene el flujo único de paquetes y los PID de las tablas PMT.

Finalmente, se llama a un método que procese todo lo restante. Este método lee todos los paquetes del archivo de la

siguiente forma: se lee los cuatro primeros bytes del encabezado y se discriminan; si son datos de las tablas PSI/SI se procede a la lectura completa de los bytes restantes (184 bytes) y se los guarda en un buffer para cada tabla PSI/SI (NIT, SDT, etc.), caso contrario se procede a la lectura del siguiente paquete, es decir, en el caso de que la carga útil sea audio o video no se lee la carga útil del paquete correspondiente; esto ayuda a que el proceso de lectura del archivo completo no tome mucho tiempo. Además, cada tabla contiene un contador que ayuda con el número total de tablas contenidas en el archivo .ts.

Finalmente, se procede a llamar a los diferentes métodos que dependiendo del número de servicios que contenga el archivo. Para cada caso, se debe verificar si el archivo .ts contiene o no una aplicación, se procede a extraer los datos del buffer en donde se almacenó lo leído, se clasifica y procesa la información según la estructura de la tabla PMT para luego ser presentada en la interfaz gráfica; de forma similar, se realiza el procesamiento para las tablas SDT y NIT.

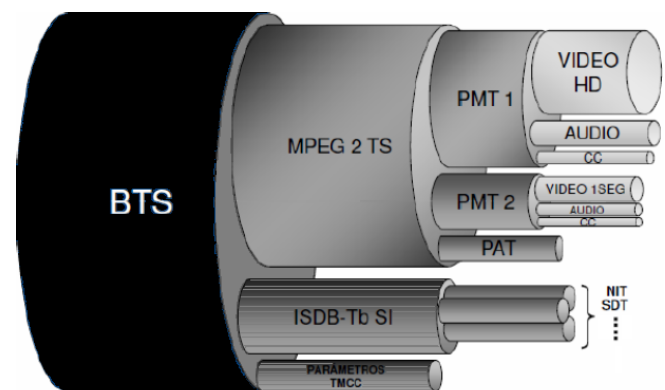
La Fig. 6 muestra una visión de la composición de la señal BTS, incluyendo los elementos encapsulados en la misma y que sirve como base para la conceptualización y el desarrollo del programa [1] [6].

### 4. APLICACIÓN ANALIZADOR DE FLUJOS ÚNICOS DE PAQUETES DE TRANSPORTE TS

La interfaz de la aplicación despliega en pantalla la información encontrada dentro de las tablas PSI/SI, que han sido multiplexadas para formar el flujo.

Los objetivos del Analizador de Flujos son:

- Utilizar software libre para el desarrollo de la aplicación.
- Desarrollar una interfaz gráfica que sea fácil de utilizar.



**PAT (Tabla de Asociación del Programa)**  
**PMT (Tabla de Mapeo del Programa)**  
**SDT (Tabla de Descriptores de Servicio)**  
**NIT (Tabla de Información de la Red)**  
**CC (Subtítulos)**  
**TMCC (Control de Configuración de la Multiplexación de la Transmisión)**

**Figura 6.** Encapsulamiento BTS

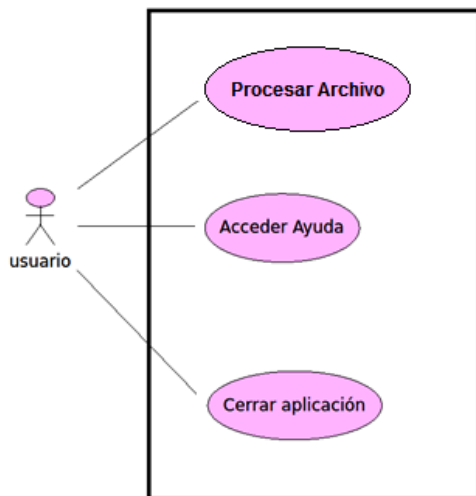


Figura 7. Diagrama de casos de uso para el Analizador de Flujos

- Brindar la información del flujo único de paquetes de transporte TS al usuario.
- Presentar información organizada de forma clara al usuario.
- Disponer de un manual de usuario en caso de necesitar información adicional sobre el programa.

Considerando los objetivos del Analizador de Flujos se lo puede modelar de acuerdo al diagrama UML de casos de uso (Fig. 7). El usuario puede ser cualquier persona que interactúe directamente con el Analizador de Flujos. En la Tabla 2 se detalla cada caso de uso y las actividades que debe realizar el sistema.

Tabla 2. Casos de uso del Analizador de Flujos

Caso de uso	Sistema
Procesar archivo	Abrir diálogo para cargar archivo a ser analizado. Abrir el archivo para dejarlo listo para su lectura. Leer el archivo hasta encontrar una tabla PAT y extraer información de ésta. Leer todo el archivo bit a bit guardando información de tablas en buffers. Ordenar y procesar la información de cada tabla para luego ser presentada. Presentar la información procesada en diferentes pestañas para que el usuario la pueda visualizar.
Acceder Ayuda	Presentar un manual de ayuda.
Cerrar Aplicación	Finalizar proceso y cerrar ventana principal.

4.1 Ventanas y diálogos

Al iniciar la aplicación, el Analizador de Flujos presenta la pantalla principal (Fig. 8) donde se encuentra diferentes campos que serán descritos a continuación:

1. Botón buscar: permite desplegar una ventana, en donde el usuario debe escoger el flujo único de paquetes de transporte TS a ser analizado, este archivo debe tener extensión (.ts).
2. Directorio: en este espacio se muestra el directorio completo del archivo .ts seleccionado.
3. Tamaño del archivo: se muestra el tamaño en bytes del archivo analizado.
4. Número de paquetes: en este campo se visualiza el número de paquetes TS encontrados.

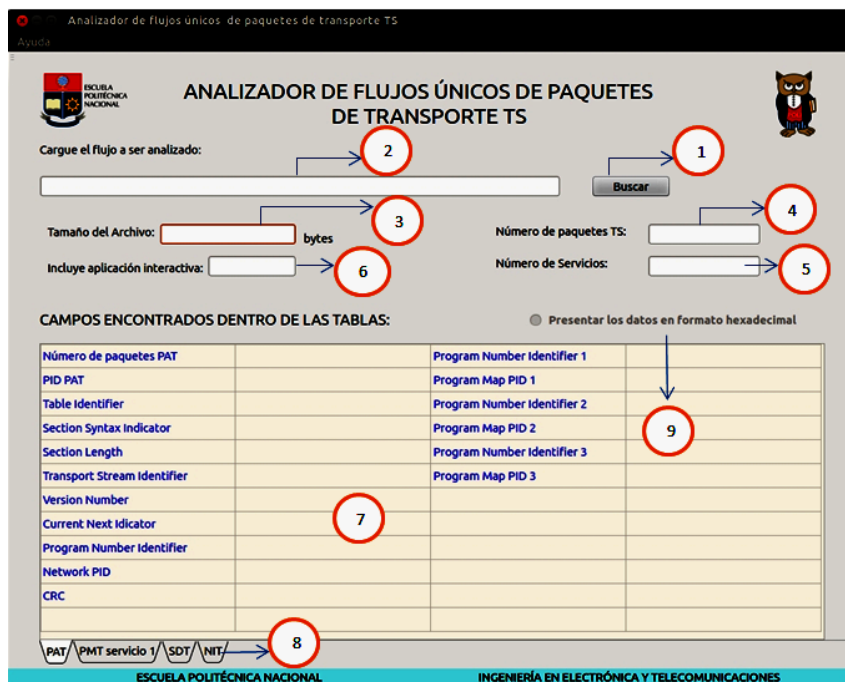


Figura 8. Ventana principal de la aplicación

5. Número de servicios: en este campo se muestra el número de servicios (programaciones) que tiene el archivo analizado.
6. Incluye aplicación interactiva: indica si el archivo analizado incluye o no una aplicación interactiva.
7. Muestra de datos: se presenta toda la información encontrada en las diferentes tablas tales como [5]:
  - PAT (*Program Association Table*)
  - PMT (*Program Map Table*)
  - SDT (*Service Descriptor Table*)
  - NIT (*Network Information Table*)
8. Pestañas que permiten con facilidad desplegar la información contenida en las tablas.
9. Formato hexadecimal: permite pasar la información desplegada en las tablas a formato hexadecimal.

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para comprobar el correcto funcionamiento de la aplicación, se realizaron varias pruebas usando flujos contenidos en archivos .ts obtenidos de diversas fuentes:

- Flujos obtenidos por software empleando la aplicación: “Generador de flujos únicos de paquetes de transporte TS” [12], escrita también por el grupo de trabajo de TV Digital de la Escuela Politécnica Nacional que desarrolló el Analizador de Flujos que se describe en este artículo. Esta aplicación provee una interfaz gráfica a un proceso de generación basado en ffmpeg y OpenCaster. Con la aplicación desarrollada se puede fácilmente generar flujos con un número variado de servicios o programaciones, y se puede incluir aplicaciones interactivas.

Los flujos obtenidos con el generador son comprimidos con MPEG-2 por lo que se requiere de una transcodificación a

MPEG-4 antes de ser transmitidos. Para tener la garantía de que estos flujos fueron adecuadamente generados, y contrastar con los resultados proporcionados por el Analizador de Flujos, se utilizó un transmisor para ISDB-Tb (DEKTEC DTU-215-I-SP), controlado desde una PC con el programa StreamXpress que permite modificar distintos parámetros para la transmisión. Al transmisor se conecta un decodificador o STB (Set Top Box), el cual a su vez entrega la señal decodificada a un televisor (Fig. 9).

- Otros flujos fueron obtenidos de grupos de investigación en TV Digital locales e internacionales. Así, flujos de la ESPE y del laboratorio LIFIA de Argentina, de tal manera de comprobar que la aplicación desarrollada los pueda procesar y presentar la información correctamente.

### 5.1 Pruebas de funcionamiento con el Analizador de Flujos

Las pruebas se realizaron empleando numerosos flujos con y sin aplicaciones interactivas incluidas, y conteniendo una o varias programaciones, las cuales estaban codificadas en definición baja, estándar y alta. A continuación se presentan un par de los resultados obtenidos.

La Fig. 10 indica información sobre la tabla PAT encontrada en un flujo único de paquetes generado con el “Generador de flujos”, que incluye tres servicios; además se puede visualizar las pestañas correspondientes a las tablas PMT de cada servicio, así como las pestañas de las tablas NIT y SDT.



Figura 9. Escenario de pruebas de los flujos únicos de paquetes de transporte TS generados

ANALIZADOR DE FLUJOS ÚNICOS DE PAQUETES DE TRANSPORTE TS

Cargue el flujo a ser analizado:

/home/tesis/Escritorio/1706/SDHDL/variostsdhd.fixed.ts

Tamaño del Archivo: 793360188 bytes

Número de paquetes TS: 4220001

Incluye aplicación interactiva: NO

Número de Servicios: 3

CAMPOS ENCONTRADOS DENTRO DE LAS TABLAS:

Presentar los datos en formato hexadecimal

Número de paquetes PAT	2119	Program Number Identifier 1	e760
PID PAT	0	Program Map PID 1	407
Table Identifier	0	Program Number Identifier 2	e761
Section Syntax Indicator	1	Program Map PID 2	408
Section Length	19	Program Number Identifier 3	e762
Transport Stream Identifier	73b	Program Map PID 3	409
Version Number	1		
Current Next Indicator	1		
Program Number Identifier	0		
Network PID	10		
CRC	5c98cf85		

PAT / PMT Servicio 1 / PMT Servicio 2 / PMT Servicio 3 / SDT / NIT

Figura 10. Prueba realizada a un flujo con tres servicios

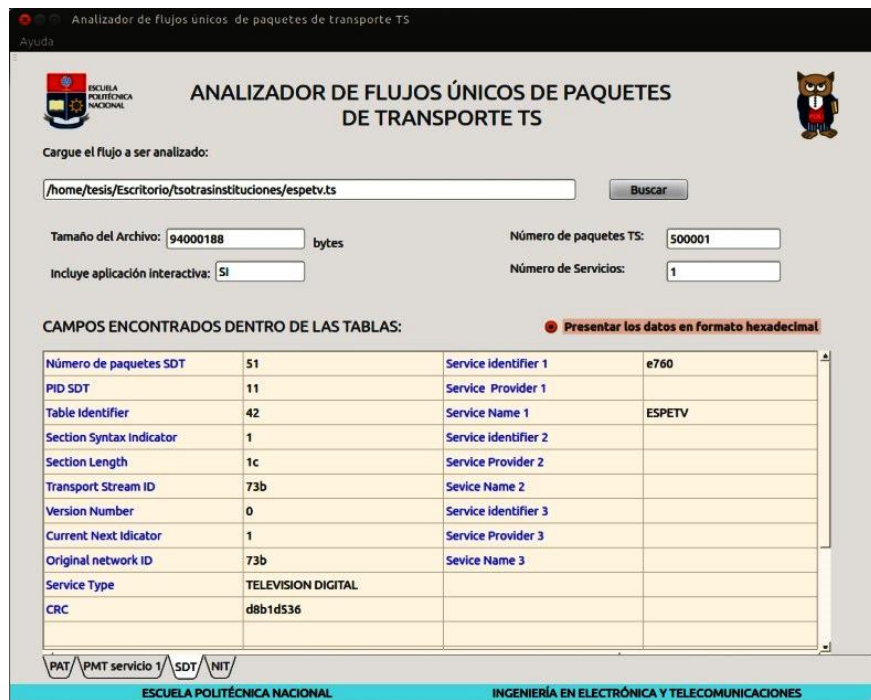


Figura 11. Prueba realizada a un flujo que incluye interactividad

La Fig. 11 presenta información sobre la tabla SDT encontrada dentro del flujo único de paquetes de transporte TS, que incluye una aplicación interactiva; cabe recalcar que este archivo .ts fue realizado por la ESPE y la Universidad SEK como parte de su trabajo en televisión digital, la información de las tablas PSI/SI restantes, se encuentra dentro de las distintas pestañas de la ventana principal.

**CAMPOS ENCONTRADOS DENTRO DE LAS TABLAS:**

Número de paquetes PAT	Program Number Identifier 1
PID PAT	Program Map PID 1
Table Identifier	Program Number Identifier 2
Section Syntax Indicator	Program Map PID 2
Section Length	Program Number Identifier 3
Transport Stream Identifier	Program Map PID 3
Version Number	
Current Next Indicator	
Program Number Identifier	
Network PID	
CRC	

PAT

Figura 12. Ventana principal con información de la tabla PAT

En las Fig. 12 a 15 se presentan los parámetros encontrados para un flujo de los utilizados para las pruebas para las tablas: PAT, PMT, SDT y NIT. Para tener una noción del conjunto de valores que se presentan en las figuras, se debe considerar el material introductorio de la sección 2 y algunos aspectos adicionales que se mencionan a continuación para revisar, como ejemplos, algunos de los valores presentados en cada tabla; detalles adicionales sobre los campos de las tablas pueden encontrarse en [5].

La Fig. 12 presenta valores correspondientes a la PAT; esta tabla contribuye con información específica de cada programa, relaciona el número de programa y los PID de la tabla PMT. Por ejemplo, uno de los valores corresponde al *Transport\_stream\_id*, que es un campo de 16 bits, cuya función principal es proveer un número de identificación a un TS, este valor debe ser definido por el usuario. Otro de los campos es el *Current\_next\_indicator* que es un indicador de 1 bit, que informa al sistema cuando una tabla PAT es válida o no; si este bit tiene el valor de 1L, el sistema toma la tabla PAT como válida, caso contrario, el sistema debe esperar obligatoriamente por la siguiente tabla PAT válida.

La Fig. 13 presenta los valores obtenidos para la PMT; esta tabla define los PID que identifican los flujos individuales de audio, video, y datos, así el receptor puede localizar y decodificar el contenido de los distintos programas. Entre los valores indicados en la Fig. 13, se indica que el campo *Stream\_type* corresponde uno a audio y otro a video y en cada caso se indica el valor del *Elementary PID* (2065 y 2075); este campo identifica el *elementary stream* asociado a la señal del programa, es decir identifica a los TS que llevan audio, video o datos.



CAMPOS ENCONTRADOS DENTRO DE LAS TABLAS:			
Número de paquetes PMT 1	4117	Program Information Length	0
PID PMT1	1031	Stream Type	Video conforme ITU H.262
Table Identifier	2	ES PID	2065
Section Syntax Indicator	1	ES Information Length	0
Section Length	23	Stream Type	Audio conforme ISO IEC 11172-3
Broadcasting Program ID	59232	ES PID	2075
Version Number	0	ES Information Length	0
Current Next Indicator	1	CRC	1254181081
PCR_PID	2064		

Figura13. Ventana principal con información de la tabla PMT

CAMPOS ENCONTRADOS DENTRO DE LAS TABLAS:			
Número de paquetes SDT	824	Service identifier 1	59232
PID SDT	17	Service Provider 1	
Table Identifier	66	Service Name 1	TMSD
Section Syntax Indicator	1	Service identifier 2	
Section Length	26	Service Provider 2	
Transport Stream ID	1851	Service Name 2	
Version Number	0	Service identifier 3	
Current Next Indicator	1	Service Provider 3	
Original network ID	1851	Service Name 3	
Service Type	TELEVISION DIGITAL		
CRC	3272253538		

Figura 14. Ventana principal con información de la tabla SDT

Los valores obtenidos para el flujo de prueba presentados en la Fig. 14 corresponden a los valores obtenidos para la SDT; estos valores de la tabla definen los servicios en una red de transmisión de la estación televisora y puede describir un servicio de la red actual o un servicio de otras redes. Como ejemplo, el campo *Original\_network\_id* es un campo de 16 bits que especifica la red de origen del TS, debe tener el mismo valor del campo *network\_id* de la Tabla NIT. Otro elemento presentado en la tabla de la Fig. 14 es el *service\_type* y especifica el tipo de servicio, por ejemplo, 0x01 indica que el tipo de servicio es de Televisión Digital.

Los valores de la NIT se proporcionan en la Fig. 15; estos valores brindan una visión de la organización física de los diferentes TS dentro de una misma red de transmisión de una estación televisora y sus características. Su función principal es la de ayudar en la sintonización de un nuevo canal. Entre los campos se tiene el *Network\_id* que contiene el valor único de identificador de la red, este número debe ser proporcionado por la entidad regulatoria del país. Otro campo, el *Transport\_stream\_id* es un campo que se utiliza como identificador de TS para diferenciarlo de cualquier otro dentro del sistema de transmisión. Con ayuda de descriptores se proporciona información adicional, por ejemplo,

*Area\_code* es un campo que indica el código del área de donde se transmite el servicio, este código debería ser proporcionado por la entidad reguladora del país.

## 6. CONCLUSIONES

Para el desarrollo de la aplicación “Analizador de Flujos Únicos de Paquetes de Transporte TS”, se utilizó Qt y se evidenció que esta herramienta facilitó el desarrollo de las interfaces gráficas de esta aplicación mediante Qt Designer, que realiza su tarea sin necesidad de líneas de comando.

Para cumplir con los objetivos de este proyecto se realizó un análisis exhaustivo de la estructura y organización de los datos dentro de un paquete de transporte TS, además de un estudio y posterior dominio de la estructura de las tablas PSI/SI y de los descriptores dentro de éstas, toda esta información fue indispensable para el desarrollo de la aplicación “Analizador de Flujos”.

Para la verificación del correcto funcionamiento de la aplicación “Analizador de flujos”, se utilizaron distintos flujos realizados con la aplicación “Generador de flujos únicos de paquetes de transporte TS” [12] y flujos generados por otras personas e incluso por otras instituciones, en todos los casos el analizador desplegó la información contenida dentro de los flujos de manera correcta, corroborando también de esta manera que está cumpliendo con su función.

Ante la necesidad de continuar en el camino hacia el apagón analógico y no quedarse solo a la espera del avance y experiencias de otros países, es imperativo el desarrollo de aplicaciones como la presentada en este artículo que requieren un dominio del estándar y tener un conocimiento más profundo sobre la temática de TV Digital para poder implementarlas pero que, finalmente, serán de mucha utilidad para la configuración de transmisores y pruebas de aplicaciones interactivas.

La aplicación desarrollada es parte de las herramientas fundamentales que se emplean en el Laboratorio de TV Digital que mantiene los autores en donde se manejan aspectos tanto de transmisión así como de interactividad.

CAMPOS ENCONTRADOS DENTRO DE LAS TABLAS:			
Número de paquetes NIT	824	Area Code	1341
PID NIT	16	Guard Interval	1/16
Table Identifier	64	Transmission Mode	Modo 3
Section Syntax Indicator	1	Channel	24
Section Length	59	Frecuency [MHz]	533.143
Network ID	1851	Remote Control Key ID	5
Version Number	0	TS Name	TMTV
Current Next Indicator	1	Service Number	1
Network name	LIFIATV	Service ID 1	59232
Transport Stream ID	1851	Service ID 2	
Original Network ID	1851	Service ID 3	
CRC	2912946106		

Figura 15. Ventana principal con información de la tabla NIT

## REFERENCIAS

- [1] G. Toledo and N. Ricardo, "Análisis del Transport Stream para el estándar de televisión digital ISDB-TB," Carrera de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones, ESPE, Sangolquí, Ecuador, 2011.
- [2] INTI - Instituto Nacional de Tecnología Industrial, "Introducción a la TV digital. Estándar ISDB-T," [Online]. Octubre 2011.  
Disponble:<http://www.inti.gob.ar/electronicaeinformatica/utc/pdf/ISDBT-2011.pdf>. Último acceso: 28 marzo 2015.
- [3] LIFIA, OpenCaster 2.4. [Online]. Disponible: <ftp://tvd.lifia.info.unlp.edu.ar/OpenCaster2.4/>. Último acceso: 28 marzo 2015.
- [4] LIFIA, "OpenCaster para SATVD-T," Facultad de Informática. UNLP Argentina, Mayo 2011. [Online]. Disponible: <http://profesores.elo.utfsm.cl/~agv/TVD/manuales/Gu%C3%ADa%20de%20OpenCaster%20Versi%C3%B3n%20Lifia.pdf>. Último acceso: 28 marzo 2015.
- [5] M. Pozo y T. Moncayo, "Generación del flujo único de paquetes de transporte TS de acuerdo a la norma ISDB-Tb y desarrollo de una aplicación para su análisis," Tesis, Dept. de Electrónica, Telecomunicaciones y Redes de Información, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2014.
- [6] O. Nunzio, "Fase de implementación Definitiva TV Pública," 2010. [Online]. Disponible: [http://www.encuentrosregionales.com/anteriores/14conferencias/encreg2010\\_seminario\\_tvdigital-canal7\\_nunzio\\_parte2.pdf](http://www.encuentrosregionales.com/anteriores/14conferencias/encreg2010_seminario_tvdigital-canal7_nunzio_parte2.pdf). Último acceso: 28 marzo 2015.
- [7] R. Brice, *Newnes Guide to Digital TV*. 2nd ed, Ed. Oxford: Newnes, 2003.
- [8] R. de Bruin and J. Smits, *Digital Video Broadcasting: Technology, Standards, and Regulations*. Ed. Artech House, 1999, pp. 153.
- [9] Televisión Digital Terrestre - Codificación de video, audio y multiplexación, Parte 3: Sistemas de multiplexación de señales, Asociación Brasileira de Normas Técnicas ABNT NBR 15602-3, 2007.
- [10] Televisión Digital Terrestre - Multiplexación y servicios de información (SI) Parte 1: SI del sistema de radiodifusión, Asociación Brasileira de Normas Técnicas ABN NBR 15603-1, 2007.
- [11] Televisión Digital Terrestre - Multiplexación y servicios de información (SI) Parte 2: Estructura de datos y definiciones de la información básica de SI, Asociación Brasileira de Normas Técnicas ABN NBR 15603-2, 2007.
- [12] T. Moncayo, M. Pozo, D. Mejía e I. Bernal, "Generador de Flujos Únicos de Paquetes de Transporte TS en base a la Norma ISDB-Tb," *Revista Politécnica*, vol. 35, no. 1, 2015.
- [13] VBRICK, "MPEG-2 Transport vs. Program Stream," 2009. [Online]. Disponible:[http://www.vbrick.com/docs/VB\\_WhitePaper\\_TransportStreamVSProgramStream\\_rd2.pdf](http://www.vbrick.com/docs/VB_WhitePaper_TransportStreamVSProgramStream_rd2.pdf). Último acceso: 28 marzo 2015.

# A Review on How ISPs do Traffic Engineering of P2P Applications

Rodríguez A.\*; Estrada-Jiménez J.\*; Tipantuña C.\*; Estrada J.\*\*

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

e-mail: {ana.rodriguez; jose.estrada; christian.tipantuna}@epn.edu.ec

\*\* Corporación Nacional de Telecomunicaciones, Quito, Ecuador

e-mail: jancoej@gmail.com

**Resumen:** Los sistemas P2P y los ISPs dependen entre sí para poder ofrecer la mejor experiencia de acceso a contenido al usuario final. Sin embargo, los sistemas P2P no poseen información sobre lo que está pasando en las redes subyacentes, de manera que estos sistemas tienen que cooperar con los ISPs para superar la ineficiencia inherente del enrutamiento P2P. Al parecer esta cooperación tiene que ver con un objetivo principal: localizar tráfico en las redes de los ISPs para aprovechar las características demográficas de distribución de contenido. Este trabajo trata de resumir algunos enfoques, aplicados a las redes P2P más populares, que intentan aprovechar los beneficios de las características demográficas del tráfico P2P, por medio de caching, modificaciones en los protocolos P2P, servicios intermedios gestionados por el ISP, e incluso acuerdos de peering entre ISPs locales.

**Palabras clave:** P2P; ISP; cooperación; enrutamiento; localidad BitTorrent; Gnutella

**Abstract:** P2P systems and ISPs depend on each other to give the best accessing content experience for the end user. However, P2P systems have not information about what is happening in the underlay networks, so these systems have to cooperate with ISPs in order to overcome the inherent inefficiency of P2P routing. It seems that this cooperation has to do with a main objective: localizing traffic within the ISPs networks to take advantage of content distribution demographic characteristics. This work summarizes some approaches, applied to the most popular P2P networks, which try to explode the benefits of demographic characteristics of P2P traffic, by means of caching, modifications on the P2P protocols, intermediate services managed by the ISP and even peering agreements between local ISPs.

**Keywords:** P2P; ISP; cooperation; routing; locality BitTorrent; Gnutella.

## 1. INTRODUCTION

P2P systems generate more than 50% of the Internet traffic [1], and it sometimes overloads ISPs' infrastructures. P2P traffic is inefficient [2], especially because of its independence on the (underlay) Internet routing. This creates a tension in which the ISP may try to block P2P traffic but P2P systems are able to look for mechanisms to evade this blockage. However, ISPs may have more revenues because of people upgrading their service to use P2P solutions [2] [3], and, if ISPs infrastructure collapses, P2P networks will do so.

It is evident that some kind of cooperation is needed, or any mechanism for the ISPs to be aware of the overlay traffic, or P2P systems to have some information about the underlay conditions, so they can manage traffic in an efficient way.

All the solutions analyzed in this paper take advantage of some kind of cooperation between entities involved in the process of managing P2P traffic. These approaches may be used by ISPs in order to do traffic engineering.

The first approach considers the great potential of locality that a P2P protocol as BitTorrent has, especially because of the

characteristics of demand demographics. The second analysis concentrates on optimizing the neighbor selection process of Gnutella, in order to explode locality characteristics of the content shared by P2P systems. The third approach refers to caching P2P traffic as a mechanism to reduce the intensity of P2P traffic on ISP access links. The fourth study is related to the effects of P2P traffic on peering links established between ISPs and the strategies to manage this traffic. The final approach abstracts some of the benefits of solutions intended to efficiently distribute P2P content. Finally some other related solutions and concluding remarks are done.

## 2. BIT TORRENT LOCALITY

BitTorrent is one of the most used P2P protocols to exchange files in Internet, and it is responsible for more than the 50% of the traffic [1]. Some characteristics of this traffic behavior may be exploited in obtaining efficiency for the distribution of content.

### 2.1 Locality

P2P traffic depends, basically, on two elements that ISPs may be able to modify or, at least, to study:

- Demographics of traffic (language, type of content, etc.)

- Access data rates of users

By taking into account demographics of P2P traffic, locality is the property of this traffic of being significantly concentrated within an ISP [4]. Taking advantage of this inherent characteristic may help to reduce the excessive traffic between Autonomous Systems (AS).

The objective, then, must be to bootstrap P2P users close together in order to maintain P2P traffic within ISPs.

### 2.2 BitTorrent random overlay

A Random selection of neighbors may not always localize traffic well, in particular because of the stratification effect in BitTorrent, which makes peers tend to communicate only with others with similar speeds.

In order to analyze this random strategy, different demographics can be considered where an ISP A may be in different modes regarding to a torrent T [4]:

*Sparse mode:* when speeds of nodes outside A, participating in T, are very dissimilar from the ones inside A. Because of stratification, internal nodes will communicate only with each other, and the condition for locality will be that a minimum number of nodes must be found as neighbors in the P2P network.

*Dense Mode:* An ISP is on dense mode when remote nodes have speeds similar to local ones', so stratification is not immediately the answer. A random selection could result in fewer local nodes participating in the P2P network than the ones in sparse mode.

*Locality:* If a mechanism to keep BitTorrent neighborhood local is applied, when possible, in sparse mode, the probability to localize peers well are higher; however, this locality method used instead of random gets more gains if applied in dense mode, since sparse mode concentrates by itself the traffic inside the ISP.

### 2.3 Demographics of BitTorrent

Due to the way in which BitTorrent works, a crawler can be used to obtain information about indexed torrents, trackers and clients IP addresses, in order to geographically identify the torrents being served. This identification can be done by country or by ISP.

From the study made in [4], most of the torrents are small and the largest torrent has some tens of thousands clients.

Moreover, bounds can be established independently of the peers access speed: an upper bound, considering ISPs on sparse mode (helping to localize traffic); and a lower bound, assuming all torrents are in dense mode. The lower bound, using a Random selection of peers, is almost 0, given that having a random selection of local neighbors in dense mode is a low probability event. In sparse mode, as locality is inherent, the bounds are higher. If a method for locality is considered, bounds get higher.

The effect of speed may be measured based on a metric called inherent localizability, which calculates the density of nodes being part of an ISP in the torrents that it shares with other ISPs that have similar speed. For a Random method of finding neighbors, this metric determines the ability to localize unchokes (a peer answering client requests) whereas on a

Locality method, the performance depends on the absolute number of local peers.

The differences in demand demographics of P2P systems are evident, especially taking into account different regions, languages and content development centers, which makes some ISPs the core of download requests, while others become just local centers.

Inside an ISP holding large proportions of content requested by users, inherent localizability is higher, as for example in Spain where searched contents tend to be local and not so global.

Inherent localizability only tends to be increased when local speed is incremented, for ISPs that maintain content locally.

In general, predicting the behavior of inherent localizability is possible by taking into account demographics and speed information.

Global torrents (globally accessed) are present for a wide range of speeds (this means that those are available for download for many different speeds), so increasing the speed inside an ISP will not make its nodes reachable for downloading this content.

However, local torrents are spread at specific ISPs and speeds, so those are as available as global ones. If an ISP increments its speed, reaching other ISPs speeds, some local unchokes may become remote because of the similar speeds. But, if this ISP increases speed further than the others, it will tend to maintain unchokes local.

### 2.4 BitTorrent traffic

Some other parameters like unchoking process, behavior of seeders and optimistic unchokes of leechers, should be considered for a more realistic approach [4].

Seeders normally share its bandwidth based on two criteria: uniform, where nodes of the neighborhood share the same upload rate; and proportional, where the seeder assigns an upload bandwidth proportional to the speed of each node.

Locality is now defined as a set of overlay construction algorithms whose operation is especially dependent on the maximum remote neighbors allowed in a neighborhood N.

Some models of the Locality are:

*Locality Only If Faster:* Unchokes are switched from remote to local only if local nodes are faster.

*Locality:* Local nodes are preferred independently of their speed. There is no constrain on the number of remote nodes.

*Strict:* All switches from remote to local nodes are performed.

### 2.5 Impact on ISPs and users

Implementing Locality may have some drawbacks over the users (i.e. deprivation of users to contact faster remote seeders) but there are bounds where advantages are the same for users and ISPs.

The metrics related to this impact may be: transit traffic reduction compared to random (of interest of the home ISP), and QoS reduction, which is of interest of the user.

When comparing ISPs, those ones hosting global torrents get better savings than those hosting local content, because the

first ones have lower inherent localizability. Also, the size of ISPs contributes to this level of saving because bigger ISPs have more possibilities to reach enough local peers.

### 3. AN ORACLE FOR COOPERATION BETWEEN ISPS AND P2P USERS

This approach concentrates in the neighbor selection process of Gnutella, which is arbitrary done by peers. This is not the best strategy since most of the traffic tends to concentrate in the same AS.

An oracle service implemented by the ISP could help peers to rank the best neighbors, based on its bandwidth, delay and proximity [5]. This rank can be effectively done by ISPs because they have the knowledge of their infrastructure.

The main advantages of using an oracle service are:

- P2P nodes do not have to measure the path performance themselves
- P2P nodes can take advantage of the knowledge of the ISP
- Bottlenecks can be avoided (improved throughput and delay)

After implementing the oracle service, the P2P graph properties are maintained but the ISP has the ability to influence the overlay topology and obtain a biased neighborhood selection. Besides, network performance and delay get improved.

#### 3.1 Evaluation Metrics

The metrics, on which the effect of the biased neighborhood selection depends, are:

- *Degree*: It is the number of outgoing connections. The more connections are the better.
- *Hop count diameter*: The maximum diameter between two peers in a directed overlay graph.
- *AS diameter*: It is the length of the shortest path between the most distanced nodes of a graph.
- *Flow Conductance*: It's a metric related to the failure resistance of the network.

#### 3.2 Overlay/Underlay Graph Properties

The biased neighborhood selection done by the oracle can be compared with an unbiased method where neighbors are chosen randomly. The oracle helps peers to chose neighbors from a list of ranked candidates. The consequences of a biased neighborhood selection are:

- The structural properties does not receive a negative impact since neighbors *remain well connected*, the average path length and the mean degree value do not considerably change
- Traffic is kept within the AS, even when a short candidate list is used.
- Connectivity within AS remains good

#### 3.3 Tests with Gnutella

Gnutella, a file distribution protocol, can be adapted to work with the oracle [5]. The idea consists on sending the Gnutella

Hostcache (a list of IP addresses, possible neighbors) to the oracle, before the neighboring is done. The oracle, then, selects its preferred address, based mainly on proximity, and sends it back to the peer. The node will then try to establish a neighbor relationship with the nearest peer.

This kind of neighbor selection does not demean the connectivity of the Gnutella network and the network structure of Gnutella gets unchanged. The result is that peerings are established within the ASs and the percentage of intra-AS P2P traffic gets significantly increased. The scalability of the system gets also increased, since there is much less negotiation messages traversing the network. The general result is that, by consulting the oracle also during the file-exchange stage, and not only for neighborhood selection, leads to a significant increase in locality of P2P traffic.

### 4. A CACHING SOLUTION USING HPTP

Caching P2P traffic is a more flexible solution, but its implementation is complicated. Some obstacles may be: the lack of standardization in P2P protocols and the economical and administrative cost that the maintenance of these infrastructures represents [6].

#### 4.1 Caching

A caching system intercepts a request from the client and determines if the answer to the request is already in cache (a hit) to directly be delivered. If it is not in cache (a miss), the request is forwarded to the destination. Commonly, the caching servers are located near the gateway of the customers. Besides, significant locality can be found in popular P2P networks like Kazaa and Gnutella, which means that cacheable content do exists.

HPTP has the advantage of using existing caching proxies, so there are no extra adoption costs for ISPs.

#### 4.2 HPTP

HTTP-based-Peer-to-Peer is a framework that has some elements which help to describe the method it uses to cache P2P traffic.

- *HTTPIfying tool*. This tool segments P2P streams in small chunks and transports them using HTTP, ensuring that these chunks are cacheable by existing web proxies.
- *Hping*. This tool does cache detection and usability tests. But, locating caching servers is not the only problem; it is also necessary to determine if they can cache HPTP traffic.

HPing starts by sending requests from a client to the server. Once the server receives this request, a local counter in the server is increased and a response is, then, sent to the client.

When the client sends an HPing message to the server, this server answers the client, identifying the source address the server sees in the request message. If the address is the same as the client address, there is not a caching proxy but, if the address is not the same, there is a cache.

The cache usability test, on the other hand, determines if HPTP traffic can be cached by a

specific web proxy system. To do this, HPing sends chained request messages. The destination answers these requests, including the value of a counter which is incremented for each response.

If the counter value is not increased when received at each response, there exists a cache between the nodes.

#### 4.3 Cache Aware Tree Construction (CATC)

The CATC Protocol achieves an explicit control on the selection of caching proxies. The algorithm followed by this protocol is described below:

- A cluster is formed by all peers with the source as its head
- All peers perform cache detection and usability tests against the head
- Peers locally record information about the head
- Peers report their results to a DHT (Dynamic Hash Table) node and they are clustered according to their detected caches
- The DHT nodes appoint the peer whose IP address is the closest one to the source as the new head and inform all peers in the cluster
- These steps are repeated until no new caches are found
- The tree is constructed starting from the best clusters, and within the clusters starting at the head

Handling peer dynamics with HPTP is easier because of the following reasons:

- If a peer leaves or fails, the system is not really affected because the content is already cached
- When a new peer joins, it first tries to find the best caching cluster

Due to the HPTP robustness, it is not necessary to invest on costly infrastructure or optimization, and the maintenance is very simple.

#### 4.4 Remarks on HPTP

The HPTP protocol allows a significant reduction of the backbone traffic since it achieves locality awareness and works better than a locality-aware protocol in the application level.

The number of detected-usable web caches has a linear impact on HPTP performance and the location of caches is especially important when the number of caches is small.

## 5. P2P TRAFFIC BETWEEN ISPS

Peering relationships between ISPs may cause a unfair distribution of P2P traffic. A relationship could permit an ISP to provide Internet access service to other ISP where an expense is involved for the latter. Free peering (peer-to-peer communication) is also possible between 2 ISPs on the same level, which helps to reduce the dependence on higher level providers. Given the selfishness of P2P applications when using resources to transport information, an ISP A can be affected by other ISP B whose peers use nodes from A to download P2P packets, without paying for the involved transit traffic [7]. Traffic parity between ISPs can be achieved

by controlling the links towards the provider and, especially, the free-peering capacity.

#### 5.1 Models of P2P traffic

Let's suppose having two contending local ISPs (1 and 2) providing Internet service by means of a higher level ISP. The link used to connect each local ISP to the Internet is called the private link. The link locally connecting each ISP together is called the peering link. Commonly, only local traffic is allowed through the peering link. Remote traffic (the one generated through the higher-level ISP) can be classified based on its type of demand: private or public (the one needed by the 2 ISPs). Routing of P2P applications in order to predict public demand may also be modeled.

*Public demand:* An ISP may download content by means of the private link it maintains with a higher level provider, or through a peering link, assuming the aforementioned content was previously downloaded through the private link of the other ISP.

*The routing solution:* The routing model predicts the aggregated behavior of the routing in the application layer for different traffic intensities, and ISP peering and provisioning agreements.

In the process of optimizing P2P traffic, the following scenarios are possible:

- If cooperation exists between ISPs, a global optimal result is possible if capacities get adjusted
- Having an unlimited peering link capacity, all public demand could be served through only one private link
- If there is no peering, no traffic traverses the peering link
- ISPs cannot efficiently share the public demand because of a peering link without enough capacity

*Methodology for ISP economic analysis:* The economic analysis of a peering-link strategy can be done by assuming that each ISP has to pay a cost dependent on the intensity of the traffic required to serve all the subscribers. In order to have profits, each ISP will charge its subscribers with a fixed price for a flat rate. Assuming a net income of 0, this fixed price is calculated, and it is called the ISP's break-even price. The benefits of peering strategy will be detected if the break-even price decreases when peering is applied.

## 5.2 Peering between 2 ISPs

*No peering:* If there is no local peering, there is economy of scale. ISPs with the highest market share (more caching) are more efficient in using its private link to serve its subscribers. If there is only application routed traffic (P2P public demand), local peering allows ISPs to be as efficient or more efficient than before applying local peering. These benefits may appear in different proportions, even being unfair for some ISPs.

*Unlimited-capacity peering:* This leads to a complete sharing of P2P downloaded objects between ISPs. Local networks at ISPs tend to behave as one network. Three possible outcomes can be derived from unlimited peering:

- A dominant ISP maintains a lower break-even price and gets even more benefits from peering than the other ISP
- A dominant ISP maintains a lower break-even price but the other one gets more benefits from peering
- A dominant ISP gets less benefits from peering and has a higher break-even price

This scenario may allow an ISP to take more advantage from the peering link by decreasing its private capacity or its traffic towards the other ISP, through the peering link. Obviously, one solution is reducing the peer link traffic in order to limit the usage of the private link from other ISPs.

*Limited Capacity Peering:* Large ISPs are interested in limiting the capacity of the peering link because it is easier for providers with higher market share to maintain economic advantages. However, this option prevents ISPs depend on the private capacity of other ISPs.

## 6. IMPACT OF PEER-ASSISTED CONTENT DISTRIBUTION ON ISPS

As it is deeply analyzed in [8], the emergence of P2P applications has helped to provide scalability to content distribution systems. ISPs, however, have received the impact of the increasing traffic generated by peer-assisted solutions. This impact can be analyzed from the perspective of the content provider, the ISPs and the end users. A cache solution, such as the one discussed in a previous section, can alleviate this effect, but its implementation is complex, since it has to be compatible with P2P protocols. In the other hand, peer-assisted distribution algorithms can be adapted to mimic caching systems so they can offer locality-aware solutions that considerably reduce the load on ISPs

Some cooperation is indeed involved in the way that P2P systems work. However, this cooperation does not have to see with ISPs but with the relation among peers. BitTorrent is a classic example of peering-assisted systems where a tit-for-tat policy is implemented by the choke/unchoke mechanism, encouraging cooperation between peers but also banning free-riders. Additionally, potential savings and file availability are inherent characteristics of the demand demographics of these systems. Potential of locality-aware strategies in BitTorrent may be identified by calculating the frequency of users downloading the same content.

Peer overlapping (simultaneous active users) may also provoke a locality effect if at least two peers are downloading the same file. Studies made on BitTorrent protocol showed that approximately 60% of the users could cooperate in the distribution of content as they are overlapping in time. User overlapping is present approximately for 50% of the files, where locality could be applied.

Potential savings of bandwidth can be calculated by determining the bytes unnecessarily downloaded. The experience says that a minimal portion of bytes are downloaded locally. If caching is applied, at least 40% of the content could be downloaded locally.

### 6.1 Performance for the user

From the user point of view, some aspects can be mentioned about the impact of P2P systems [8]. At least a tenth of the files shared through P2P applications are downloaded more than once within an ISP in a day. These files are short-lived. One third of the users could cooperate for locality and at least 40% of the downloaded content exists locally in active and non-active users.

### 6.2 Impact of Peer-Assisted content distribution on ISPs

The impact of P2P traffic can be measured in an environment where a big file is downloaded through the BitTorrent network. A locality mechanism within an ISP helps to group IP addresses in order to first look for content inside the ISP. An evaluation done in terms of traffic volume finds that the downloaded traffic can be saved in a factor of two if a peer-assisted locality aware system is used compared with a client-server solution. Also, the uploaded traffic could be reduced by a factor of 6 if locality is applied, because traffic is maintained inside the ISP. And, as it is expected, benefits of locality-aware P2P systems get higher if the size of the ISP is higher.

### 6.3 Other solutions with locality algorithms

Some other solutions are being studied in order to optimize P2P traffic and maintain it local.

Caching done by an ISP is an interesting option, however, the implementation needs to be compatible with the variety of P2P applications. Besides, a locality-aware solution generates less overhead. Some proxy trackers may also be deployed by ISPs in the network edges, in order to redirect P2P requests to local active users. Other solutions with no extra infrastructure could be implemented by modifying Bit torrent trackers.

Locality solutions based on DNS are not as efficient as a proxy tracker solution located at ISP edges (clients in the same domain span multiple ASs). Matching users by grouping them within a prefix behaves slightly worse than DNS based solutions. A hierarchical-prefix matching algorithm shows the best performance because it dynamically accommodates ISPs of different sizes.

## 7. OTHER SOLUTIONS

New systems like ONO[9] and P4P [10] have emerged trying to implement locality, by applying changes not only on the

client but also cooperatively with the ISP. Previous studies do not take into account the demand demographics or the quantity of peers. P4P is a new paradigm which proposes proactive communications among network providers to basically improve their network resources performance. ONO is a service that supports P2P clients to localize neighboring peers so that traffic among ISPs can be reduced and concentrated locally. As can be seen, there exist solutions which are already trying to modify the current P2P architecture or posing new foundations in order to reduce the impact of applications on the traffic transported by ISPs. There is also work related to theoretic-games analysis to study economic principles and technical architectures, deriving strategies for ISP to compete inside a local market. Some other studies conclude that uncoordinated overlay and not-overlay traffic would degrade both. Some studies do not take into account the fact that cooperation exists only if two users are active and sharing the same file, as it happens in BitTorrent.

## 8. CONCLUSIONS

BitTorrent is a P2P protocol which is massively used to exchange big files in Internet. It improves, for example, the downloading experience by distributing the access to the files along a swarm of servers. Although it implements some mechanisms to locally concentrate the P2P interactions, more effort is needed to reduce the traffic that P2P applications generate over inter-ISP links due to P2P applications. Since P2P systems are agnostic of the underlay infrastructure of ISPs and vice versa, cooperation is needed. One of the biggest problems to implement caching is compatibility of different solutions with all the P2P applications. Peering relationships between ISPs should be strictly limited in order to be fair. There are, however, more benefits of locality if the ISP has more users. The benefits of locality may be maintained longer if the selfish behavior of P2P users changes. Locality of P2P traffic influenced by the ISP restores ISP capability of doing traffic engineering.

## REFERENCES

- [1] Karagiannis, T., Broido, A., Brownlee, N., Claffy, K., & Faloutsos, M. (2004, November). Is p2p dying or just hiding? [p2p traffic measurement]. In Global Telecommunications Conference, 2004. GLOBECOM'04. IEEE (Vol. 3, pp. 1532-1538). IEEE.

- [2] Halme, A. (2005). Peer-to-peer traffic: impact on isps and evaluation of traffic management tools. In HUT T-110.551 seminar on internetworking.
- [3] Seibert, J., Torres, R., Mellia, M., Munafo, M. M., Nita-Rotaru, C., & Rao, S. (2012). The internet-wide impact of p2p traffic localization on isp profitability. *Networking, IEEE/ACM Transactions on*, 20(6), 1910-1923.
- [4] Rumin, R. C., Laoutaris, N., Yang, X., Siganos, G., & Rodriguez, P. (2011, April). Deep diving into bittorrent locality. In *INFOCOM, 2011 Proceedings IEEE* (pp. 963-971). IEEE.
- [5] Aggarwal, V., Feldmann, A., & Scheideler, C. (2007). Can ISPs and P2P users cooperate for improved performance?. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 37(3), 29-40.
- [6] Shen, G., Wang, Y., Xiong, Y., Zhao, B. Y., & Zhang, Z. L. (2007, February). HPTP: Relieving the Tension between ISPs and P2P. In *IPTPS*.
- [7] Hui Wang, J., Chiu, D. M., & Lui, J. C. (2006). Modeling the peering and routing tussle between isps and p2p applications. In *Quality of Service, 2006. IWQoS 2006. 14th IEEE International Workshop on* (pp. 51-59). IEEE.
- [8] Karagiannis, T., Rodriguez, P., & Papagiannaki, K. (2005, October). Should internet service providers fear peer-assisted content distribution?. In *Proceedings of the 5th ACM SIGCOMM conference on Internet Measurement* (pp. 6-6). USENIX Association.
- [9] Choffnes, D. R., & Bustamante, F. E. (2008). Taming the torrent: a practical approach to reducing cross-isp traffic in peer-to-peer systems. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 38(4), 363-374.
- [10] Xie, H., Yang, Y. R., Krishnamurthy, A., Liu, Y. G., & Silberschatz, A. (2008, August). P4P: Provider portal for applications. In *ACM SIGCOMM Computer Communication Review* (Vol. 38, No. 4, pp. 351-362). ACM.



# Sistema para el Monitoreo y Cuantificación de Flujos de Lodo Basado en una Red Inalámbrica de Sensores

Marcillo P.\*; Bernal I.\*\*; Macías C.\*\*\*

\* Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Facultad de Ingeniería, Quito, Ecuador  
e-mail: pablomarcillolara@gmail.com

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

\*\*\* Escuela Politécnica Nacional, Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador  
e-mail: cmacias@igepn.edu.ec

**Resumen:** Este artículo presenta el diseño e implementación de una red inalámbrica de sensores (RIS) que permitirá el monitoreo y cuantificación de flujos de lodo producidos por erupciones volcánicas. Esta red se integra en un sistema de Monitoreo y Cuantificación de Flujos. El sistema ha sido concebido como un conjunto de dispositivos como módulos inalámbricos basados en IEEE 802.15.4, sensores de alta precisión, cámaras de video de alta resolución e iluminadores infrarrojos; infraestructura de comunicaciones; y, módulos de software que permitan visualizar los datos recolectados por los sensores. Se presentan también los resultados obtenidos al emplear la RIS implementada en pruebas en un ambiente de laboratorio.

**Palabras clave:** Flujos de lodo, escombros, inalámbrico, instrumentación, monitoreo, WSN, RIS, sensores.

**Abstract:** This paper presents the design and implementation of a wireless sensor network (WSN) that allows for the monitoring and quantification of mudflows produced by volcanic eruptions. This network is integrated into a Monitoring and Quantification of flows System. This system is designed as a set of devices such as wireless modules based on IEEE 802.15.4, high-precision sensors, high resolution video cameras and infrared illuminators; communications infrastructure; and software modules that allow visualizing the data collected by the sensors. The results obtained by using the implemented WSN in tests in a laboratory environment are also presented.

**Keywords:** Mudflows, debris, wireless, instrumentation, monitoring, WSN, sensors.

## 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el mercado orientado a las WSN (Wireless Sensor Networks) o RIS (Redes Inalámbricas de Sensores) es tan diverso y amplio que es posible encontrar un gran número de plataformas inalámbricas, sistemas operativos, lenguajes de programación, simuladores, ambientes de desarrollo e inclusive soluciones completas listas para ser usadas.

El uso que se le ha dado a esta tecnología es tan variado, que es posible encontrar aplicaciones orientadas a la agricultura, a la domótica, al monitoreo ambiental, de estructuras civiles, de tráfico vehicular y al control industrial; incluso aplicaciones orientadas a la exploración espacial, como la propuesta en [2].

De acuerdo a lo señalado en [6], las WSN tienen el potencial de beneficiar de forma sustantiva los estudios de actividad volcánica. Los vulcanólogos frecuentemente utilizan arreglos de sensores interconectados con cable. Las WSN tienen bajos requerimientos de energía, integrando una modesta cantidad

de memoria, CPU y comunicaciones inalámbricas pueden desempeñar un importante rol en el monitoreo volcánico. Además este tipo de redes son más fáciles de desplegar y pueden integrar un mayor número de sensores y una mayor área de cobertura.

El monitoreo, detección y cuantificación de flujos de lodo y escombros es una tarea que puede también beneficiarse de las WSN. Esta tarea bien puede ser parte de un Sistema de Alerta Temprana (SAT), el cual está basado en el conocimiento y comprensión del riesgo, el monitoreo del fenómeno, la difusión de alertas a los involucrados y en la preparación que tengan éstos para actuar [8].

Un SAT debe proveer información veraz e instantánea, de manera que la toma de una u otra decisión sea ágil y a tiempo para así evitar pérdidas humanas y en lo posible pérdidas materiales.

En el contexto Ecuatoriano, el Instituto Geofísico (IG) de la Escuela Politécnica Nacional es el encargado de proveer información técnica y especializada del estado de un fenómeno. La Fig. 1 presenta el procedimiento del SAT usado por el IG para la ocurrencia de flujos de lodo y escombros en el volcán Tungurahua, junto con los tiempos de respuesta que se esperan.

Artículo recibido el 15 de diciembre de 2014. Este trabajo fue realizado con el apoyo del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional. Información de contacto: Pablo Marcillo, e-mail: pablomarcillolara@gmail.com.



Figura 1. Proceso de un SAT [4]

En este artículo se presenta el diseño e implementación de los nodos de una WSN con sensores especializados orientados al monitoreo y cuantificación de flujos de lodo, así como de la WSN propiamente dicha. Así mismo se presenta el módulo de software desarrollado para integrarse en el sistema SAMI (Sistema de Adquisición y Monitoreo Integrado) del IG, lo que permite visualizar las lecturas de los sensores. Los resultados que se presentan son los correspondientes a las pruebas realizadas en un ambiente controlado. En una siguiente etapa, el IG realizaría el despliegue de la WSN en una ubicación y escenario que requiera de este tipo de monitoreo y se integraría la red de sensores a la infraestructura de comunicaciones del IG para que los datos que se obtengan puedan transmitirse a una estación que pueda procesarlos.

El artículo está organizado de la siguiente manera: en la sección 2 se presenta el sistema completo que brindaría la capacidad de monitorear y cuantificar flujos de lodo, integrando la WSN a la red de microondas del IG. En la sección 3 se presentan la plataforma inalámbrica a emplearse así como los dispositivos, sensores y el software que permitirán implementar la red. La sección 4 se centra en la implementación de los módulos base, de sensores, de visualización y sísmico. Las primitivas de comunicación de los módulos son definidas en la sección 5, mientras que el software para la visualización de los datos capturados por los sensores es descrito en la sección 6. En la sección 7 se presentan los resultados obtenidos de las pruebas de laboratorio. Finalmente, en la sección 8 se presentan las conclusiones del trabajo y se delimitan actividades futuras.

## 2. SISTEMA DE MONITOREO Y CUANTIFICACIÓN DE FLUJOS

El sistema propuesto en este trabajo se lo ha denominado SMYCF (Sistema de Monitoreo Y Cuantificación de Flujos) e incluye el conjunto de dispositivos, la infraestructura de comunicaciones y las herramientas de software que permiten cumplir con el objetivo de monitorear y cuantificar flujos de lodo y escombros.

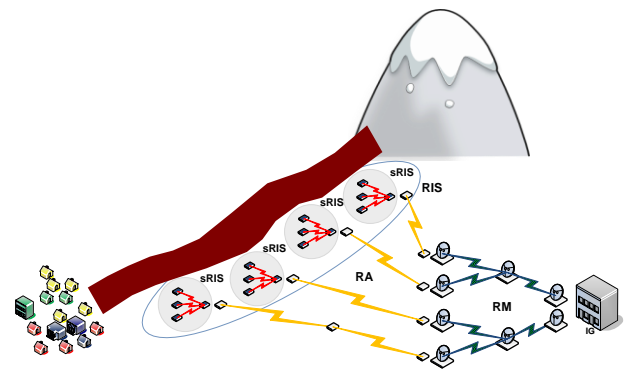


Figura 2. Redes involucradas en el SMYCF

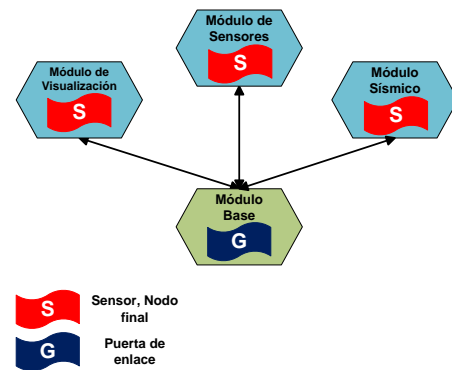


Figura 3. Topología tipo estrella adoptada por la sRIS

SMYCF hace uso de una red de acceso (RA) y de la red actual de microondas (RM) del IG para transportar la información generada por la WSN hacia el Centro de Datos del IG. La Fig. 2 presenta un diagrama de las distintas redes involucradas en el SMYCF.

La sRIS (Fig. 2) fue ideada como una pequeña (*small*) red estructurada por un módulo base y varios módulos finales. El módulo base se encarga de tareas tales como: sincronización de tiempo, recepción, procesamiento y envío de información generada por la sRIS hacia la RA. Los módulos finales se encargan de tareas mínimas como hacer lecturas periódicas de los sensores. La topología que mejor se adapta a esta concepción es la estrella (Fig. 3), en la cual un módulo base actúa como coordinador del resto de módulos, y a su vez como puerta de enlace entre la sRIS y la RA.

## 3. MATERIALES

### 3.1 Plataforma inalámbrica

La sRIS está basada en la plataforma inalámbrica imote2, desarrollada y distribuida inicialmente por Crossbow Technology Inc. que luego pasó a ser parte de la línea de productos adquirida por Memsic Inc., en el 2010. La plataforma fue seleccionada por las características de su hardware que superan en gran medida las de otras plataformas como motesky, mica2, micaz, waspmote y otras, así como por su disponibilidad para trabajar con distintos

sistemas operativos como: TinyOS, .NET Micro Framework, Linux y SOS.

Memsic provee tarjetas de expansión para la plataforma imote2 y es posible la integración de tarjetas desarrolladas por terceros con funcionalidades muy específicas.

La tarjeta de procesamiento IPR2400, integra un procesador escalable Intel PXA271; la escalabilidad se refiere a que el procesador puede operar a diferentes frecuencias.

La tarjeta de sensores ITS400, integra varios sensores tales como un acelerómetro triaxial de 12 bits, un sensor de alta precisión de temperatura de 14 bits, uno de humedad de 12 bits, uno de luz de dos canales de 16 bits para medir luz visible e infrarroja y un conversor analógico digital de 4 canales de 12 bits.

La IIB2400 es una tarjeta de alimentación, que permite energizar todas las tarjetas apiladas. Su diseño permite conectar 3 baterías AAA NiMH (Níquel Metal Hidruro). Posee un interruptor manual en un extremo para interrumpir el paso de corriente y un circuito de protección contra sobrecargas.

La IIB2400 es una tarjeta de interfaces, la cual provee 2 puertos USB a Serial y una interface JTAG para depuración de código y la reprogramación de la memoria de la IPR2400. La IEF100 fue diseñada por el Departamento de Instrumentación del IG, lleva embebido un circuito integrado MAX3232 que permite transformar niveles de voltaje de señales TTL en señales RS232 y viceversa.

### 3.2 Sensores y dispositivos

- Radar Reflex VG7 del fabricante HYCONTROL.
- El geófono modelo L-10AR del fabricante Sercel, con una frecuencia de respuesta de 10 a 300 Hz. Dispositivo que transforma la velocidad del movimiento del suelo en una señal eléctrica.
- Cámara de video de alta resolución NetCam SC del fabricante StarDot. Esta cámara tiene embebida a) una versión de uCLinux con lo que se puede ejecutar scripts, y b) un servidor web que permite la configuración del dispositivo.
- Iluminador infrarrojo
- GPS 18x LVC del fabricante GARMIN. Este modelo maneja niveles de voltaje TTL e incluye la especificación NMEA (National Marine Electronics Association) 0183 para comunicación entre dispositivos marítimos.
- Sensor de Temperatura
- Sensor de Humedad

### 3.3 SAMI

El Sistema de Adquisición y Monitoreo Integrado (SAMI) es software de código abierto y libre distribución [7] y actualmente es usado por el IG como herramienta de adquisición de estaciones inclinométricas y pluviométricas. SAMI está basado en Java y estructurado modularmente, está conformado por: a) el módulo de adquisición, encargado de

procesar la información recibida por los puertos de comunicación; b) el módulo de visualización, encargado de presentar la información en pantallas; y, c) el módulo de gestión, encargado de gestionar redes, estaciones, usuarios, dispositivos y puertos de comunicación.

## 4. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LOS MÓDULOS INALÁMBRICOS

### 4.1 Módulo Base

El Módulo Base está integrado por la tarjeta de procesamiento IPR2400 y la de interfaces IEF100, la cual cumple los requerimientos del Módulo Base, como la disponibilidad de dos de los tres puertos UART del IPR2400. La IEF100 incluye un par de conectores tipo hembra para adherirse a los conectores macho de la tarjeta IPR2400. Para este prototipo se usó 2 de los 3 canales disponibles en el MAX3232, uno para convertir señales RS232 de un receptor GPS en señales TTL, mientras que el otro es usado para convertir señales TTL en señales RS232.

Enimote2 se establecen prefijos para los diferentes UARTs: ST (Standard), FF (Full Function) y BT (Bluetooth). En el Módulo Base, en la IPR2400, se usa la línea de transmisión del STUART como puerto de comunicaciones; mientras que las líneas de recepción y transmisión del puerto FFUART se usan como puertos de sincronización y depuración, respectivamente. La Fig. 4 presenta los puertos de alta velocidad que provee la tarjeta IPR2400 y sus funciones dentro del Módulo Base.

Para la sincronización de tiempo del Módulo Base, se usó un el GPS 18x LVC. El Módulo Base ha sido programado de manera que el proceso de sincronización de tiempo sea automático y hace uso de las sentencias GPGGA y GPRMC. Con GPGGA se obtienen los parámetros: tiempo, longitud, latitud, y el número de satélites; y con GPRMC el parámetro fecha. Cada cierto tiempo, el Módulo Base se engancha al GPS solo para sincronizarse.

Para el mantenimiento y verificación del estado de la red, el Módulo Base implementa un puerto de depuración. Por otro lado, el puerto de comunicación es usado para transmitir información de la red inalámbrica hacia un radio modem.

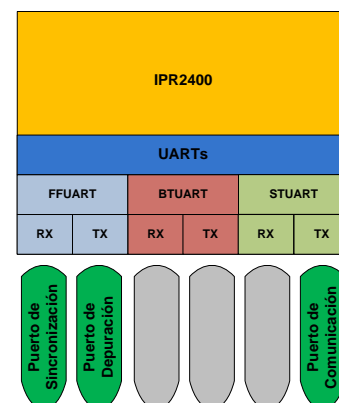


Figura 4. UART de la tarjeta IPR2400 y sus usos en el Módulo Base

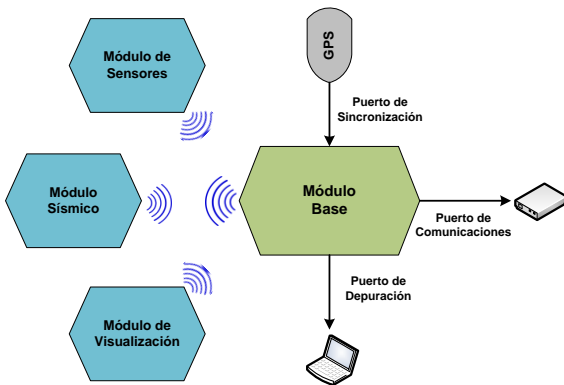


Figura 5. Funcionalidades del Módulo Base



Figura 6. Módulo Base

La Fig. 5 presenta un diagrama que ejemplifica el comportamiento del Módulo Base y sus funcionalidades y la Fig. 6 presenta la versión final del Módulo Base implementado.

#### 4.2 Módulo de Sensores

El Módulo de Sensores emplea las tarjetas de procesamiento IPR2400 y la de sensores ITS400, y un radar Reflex VG7. El radar se emplea para medir la distancia (altura) entre su antena y la superficie del flujo de lodo y escombros. Con este módulo se mide: temperatura, humedad y altura, sin embargo, es posible incluir también, si fuera el caso, parámetros como aceleración e intensidad lumínica. En vista de que el radar opera a 24 V, fue necesario el diseño y construcción de un pequeño circuito electrónico que incluye un convertor de corriente continua que transforma 12 a 24V. La Fig. 7 presenta la implementación final del Módulo de Sensores.

#### 4.3 Módulo Sísmico

El Módulo Sísmico emplea la tarjeta IPR2400 y uno de los puertos del convertor analógico digital (ADC) de la tarjeta ITS400. Con un ADC de 12 bits se pueden manejar 4096 niveles o "cuentas". En este módulo se emplea el geófono L-10AR.



Figura 7. Módulo de Sensores



Figura 8. Módulo Sísmico

Se implementaron 3 filtros digitales tipo FIR (Finite Impulse Response), para establecer las 3 bandas de frecuencia de la señal analógica proveniente del geófono: un filtro para la banda de 10-300Hz, uno para la banda de 10-100Hz y uno para la banda de 100-300 Hz[1][5]. La frecuencia de muestreo mínima, considerando el Teorema de Nyquist del muestreo y que la frecuencia máxima a muestrear es 300 Hz, se estableció en 600 Hz. El *timer*, que permite establecer la tasa de muestreo, provee una resolución en milisegundos, por lo que la tasa de muestreo se estableció en 1 KHz. La Fig. 8 presenta el Módulo Sísmico implementado.

#### 4.4 Módulo de Visualización

Este módulo hace uso de la IPR2400 y de la IEF101, una variante de la IEF100, sus tareas son: esperar mensajes de alerta enviados por el Módulo Base e interactuar con una cámara de video de alta resolución y un iluminador infrarrojo a través de uno de los puertos de entrada/salida de uno de los conectores que posee la IEF101.

Los módulos finales de la sRIS envían alertas al Módulo Base, el cual las gestiona y, dependiendo del caso, son retransmitidas hacia el Módulo de Visualización. El Módulo de Visualización, dependiendo del estado de la alerta, envía

una señal eléctrica hacia la cámara, que comanda la ejecución de un script que verifica el estado del puerto y activa o desactiva un relé para que un pequeño circuito electrónico encienda o apague el iluminador infrarrojo. El estado del puerto determina que la cámara mantenga o no la frecuencia por defecto con la que se transmite las imágenes capturadas. La Fig.9 presenta el Módulo de Visualización implementado.

## 5. PRIMITIVAS DE COMUNICACIONES DEFINIDAS

Para enviar información desde los módulos finales hacia el Módulo Base y desde el Módulo Base hacia la RA, se definieron estructuras de datos: las manejadas dentro de la sRIS se denominan *mensajes* y las manejadas fuera de la sRIS se denominan *paquetes*. Para discriminarlos mensajes de los paquetes se usaron los sufijos *Msg* y *Pck*. La Fig.10 incluye los mensajes y paquetes manejados por el Módulo Base.

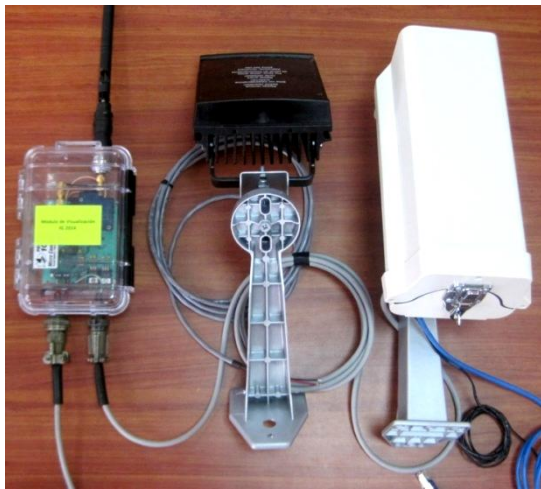


Figura 9. Módulo de Visualización

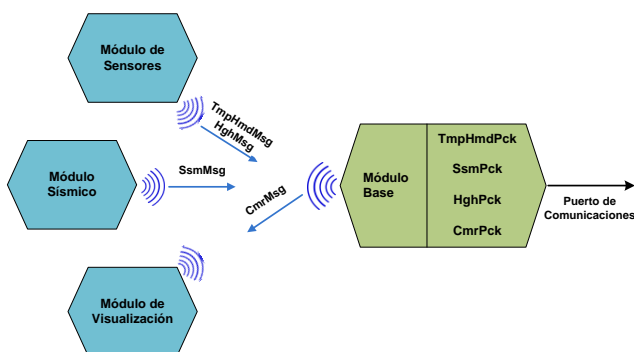


Figura 10. Mensajes y paquetes manejados por el Módulo Base

```
typedef nx_struct message_t {
    nx_uint8_t header[sizeof(message_header_t)];
    nx_uint8_t data[TOSH_DATA_LENGTH];
    nx_uint8_t footer[sizeof(message_footer_t)];
    nx_uint8_t metadata[sizeof(message_metadata_t)];
} message_t;
```

Figura 11. Estructura del message\_t definida por TinyOS 2.x[9]

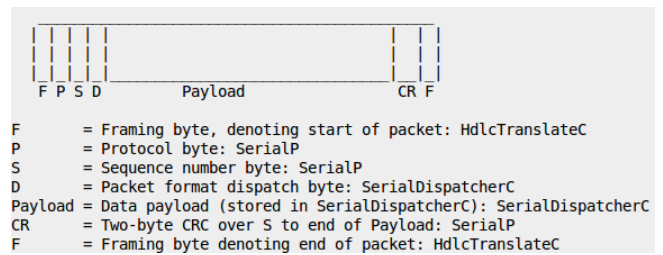


Figura 12. Formato para comunicación serial provista por TinyOS 2.x, usada para el envío de paquetes[9]

TinyOS provee una estructura de información para mensajes de radio denominada *message\_t* (Fig.11). Las estructuras de datos definidas como *mensajes* se encapsulan dentro del campo *data* de *message\_t*.

TinyOS establece también un formato para comunicación serial (Fig.12). Las estructuras de datos definidas como *paquetes* se encapsulan en el campo *payload*.

## 6. MÓDULO DE SOFTWARE PARA LA SRIS

Este módulo hace uso de la implementación para Java de TinyOS la que provee un conjunto de clases que permiten discriminar y validar paquetes de datos enviados a través del puerto serial.

Primeramente se hizo el mapeo de las estructuras de datos (paquetes y mensajes) a clases Java. TinyOS cuenta con *mig*, un generador de mensajes para el lenguaje de programación NesC, que permite realizar este mapeo con solo especificar las estructuras en un archivo de cabecera (.h).

La clase *MoteIF*, provista en el paquete *net.tinyos.message*, del API de TinyOS, se encarga de registrar oyentes (*listeners*) para cada uno de los objetos. Tales oyentes son invocados cuando lleguen mensajes, lo que a su vez provoca que se invoque el método *message Received* para procesar los mensajes recibidos y poder visualizarlos.

La visualización de la información generada por la sRIS y recibida se hace por medio de una interfaz (Fig. 13) que integra gráficas que indican los valores de altura, temperatura y humedad, y una tabla para presentar información adicional como hora, fecha y número de satélites del receptor GPS.



Figura 13. Interfaz gráfica en Linux del módulo desarrollado para SAMI

Se establecieron rangos y unidades para el eje vertical para cada una de las gráficas, así para la gráfica relacionada a los componentes full, low y high del geófono (AMF, AcousticFlow Monitor), el rango va de 0 a 1000 cuentas; la del radar de 0 a 40 m; la de temperatura de -25 a 75 °C; y, finalmente, la humedad de 0 a 100%. Con respecto al eje horizontal, las gráficas presentan intervalos de tiempo de 10 min.

En el módulo de software se deben realizar ciertas conversiones para obtener el valor real de algunos parámetros. Algunas de estas conversiones ya se encuentran definidas; por ejemplo, para el sensor de temperatura y humedad se usaron las conversiones provistas en [3].

Por lo tanto, para el parámetro temperatura se usó:

$$\text{temperatura}(\text{°C}) = \text{cuentas} * 0.01 - 39.6 \quad (1)$$

Para el parámetro humedad:

$$\text{humedad}(\%) = -0.0000028 * \text{cuentas}^2 + 0.04 * \text{cuentas} - 4 \quad (2)$$

Y finalmente, para el parámetro altura, la conversión fue determinada a partir de los datos obtenidos de las pruebas de laboratorio, de la siguiente manera:

$$\text{altura}(m) = \frac{4298.3 - \text{cuentas}}{171.64} \quad (3)$$

## 7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El funcionamiento del sistema requirió de pruebas realizadas a cada uno de los módulos que integran la sRIS y de pruebas en conjunto. Se establecieron valores por defecto o valores experimentales para los programas que fueron cargados en cada uno de los módulos que, en su momento, deberán ser analizados y modificados por los científicos y técnicos a cargo. De la misma manera se establecieron parámetros para la cámara de video que integra el Módulo de Visualización. Estos parámetros fueron configurados en los scripts bash creados para cambiar la frecuencia de transmisión de imágenes. Se podría citar, por ejemplo, los valores umbrales establecidos para los parámetros de temperatura, humedad y altura; de estos valores umbrales dependerá la generación de alertas en el sistema.

Las pruebas con el Módulo de Sensores, específicamente con el sensor de altura, requirieron el uso de un obstáculo móvil de la misma manera que se lo había hecho anteriormente para efectuar las mediciones usadas en la etapa de diseño. La superficie del obstáculo móvil intentó simular la superficie de un flujo de lodo y escombros. Tales pruebas consistieron en tomar medidas de voltaje y número de cuentas al módulo, mientras el obstáculo móvil era deslizado por el suelo. Las medidas fueron tomadas sucesivamente a intervalos de 1 metro, hasta cubrir una distancia de 13 metros. Con respecto a los sensores de temperatura y humedad, las pruebas no conllevan mayor desafío y simplemente se verificó su respuesta ante cambios de temperatura. La Fig. 14 presenta la manera en que el sensor de altura fue probado, mientras que la Fig. 15 presenta el comportamiento de los sensores de

altura, temperatura y humedad ante los diferentes cambios realizados durante la ejecución de las pruebas.



Figura 14. Técnica usada para realizar mediciones con el sensor de altura

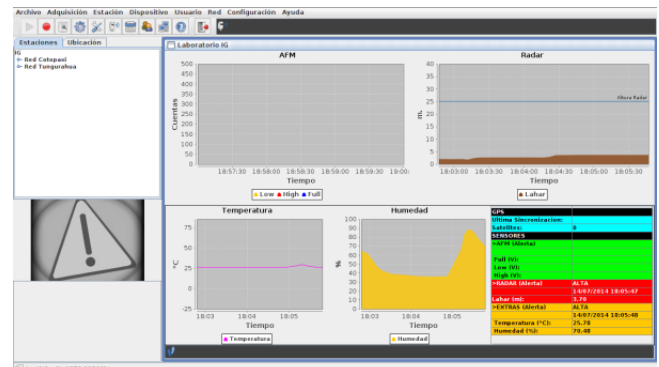
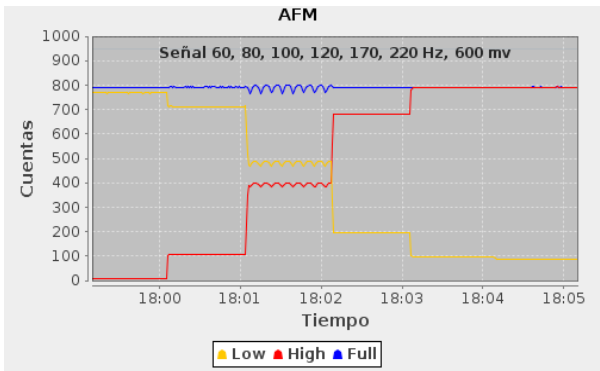


Figura 15. Comportamiento del sensor de altura durante la ejecución de las pruebas

Las pruebas al Módulo Sísmico consistieron en reemplazar el geófono por un generador de funciones, y así generar señales sinusoidales de diferente frecuencia y amplitud. Las pruebas conllevan la generación de señales sinusoidales de 60, 80, 100, 120, 170 y 220 Hz con variaciones de amplitud de 300 y 600 mV. De acuerdo a lo establecido en el fase de diseño, la componente *Low* presenta cambios significativos ante señales de 60, 80 y 100 Hz; mientras que la componente *High* presenta cambios significativos ante señales de 120, 170 y 220 Hz. Este comportamiento demuestra el correcto funcionamiento de los filtros digitales, que en el caso del filtro pasa bajo (*Low*) deja pasar señales que se hallan en el rango de 10 a 100 Hz y descarta señales en el rango de 100 a 300 Hz; a diferencia del pasa alto (*High*), el cual descarta señales que se hallan en el rango de 10 a 100 Hz y deja pasar señales en el rango de 100 a 300 Hz. Por otro lado, el comportamiento de la componente *Full* refleja cambios ante todas las señales generadas, lo cual demuestra el correcto funcionamiento del filtro pasa banda completa (*Full*), al dejar pasar señales que se hallan en los rangos de 10 a 100 Hz (*Low*) y de 100 a 300 Hz (*High*). La Fig. 16 presenta el comportamiento de cada una de las componentes del AFM

ante señales de alta y baja frecuencia y distinto nivel de amplitud.



**Figura16.** Comportamiento de las componentes del AFM ante señales de baja y alta frecuencia y distinto nivel de amplitud

Las pruebas al Módulo de Visualización consistieron en generar alertas por medio del Módulo de Sensores. Los mensajes de alerta fueron retransmitidos hacia el Módulo de Visualización y se generaron los pulsos esperados que por un lado encendieron y apagaron el iluminador infrarrojo y por otro permitieron el cambio de la frecuencia de transmisión de imágenes. Teniendo en cuenta la dificultad de comprobar el encendido y apagado del iluminador infrarrojo durante el día debido al hecho de que el iluminador en cuestión no posee un indicador o *led* de encendido y apagado, se usó un multímetro para comprobar efectivamente la subida y caída de voltaje durante la ejecución de las pruebas. En lo que respecta a las imágenes transmitidas durante el estado de alerta, se usó el servidor FTP del IG para almacenarlas. La Fig. 17 presenta una imagen del Módulo de Visualización y del Módulo de Sensores durante la fase de pruebas.

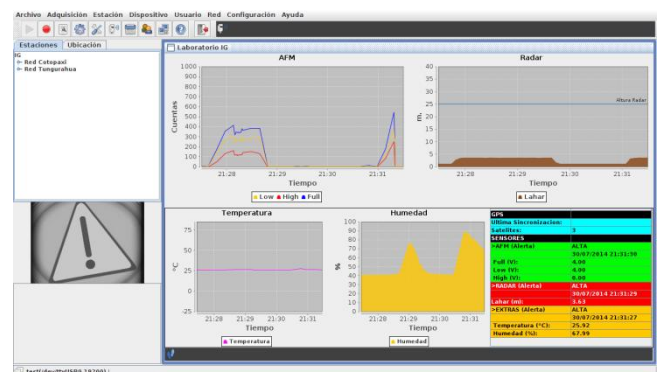
Por último, se realizó una prueba de funcionamiento en conjunto en la que intervinieron cada uno de los módulos que integran la sRIS. La prueba fue enfocada especialmente al funcionamiento del Módulo Base y su interacción con los demás módulos.



**Figura 17.** Módulo de Visualización durante la fase de pruebas

```
[INFO] 22:38:07 Sending SSM Packet!!!
[INFO] 22:38:10 Sending HGH Packet!!!
[INFO] 22:38:17 Sending SSM Packet!!!
[INFO] 22:38:18 Sending TMPHMD Packet!!!
[INFO] 22:38:19 Reading GPS!!!
[INFO] 22:38:21 Shutting GPS Down!!!
[INFO] 22:38:28 Sending SSM Packet!!!
[INFO] 22:38:31 Sending HGH Packet!!!
[INFO] 22:38:38 Sending SSM Packet!!!
[INFO] 22:38:39 Sending TMPHMD Packet!!!
[INFO] 22:38:48 Sending SSM Packet!!!
[INFO] 22:38:51 Sending HGH Packet!!!
[INFO] 22:38:58 Sending SSM Packet!!!
[INFO] 22:38:59 Sending TMPHMD Packet!!!
[INFO] 22:39:08 Sending SSM Packet!!!
[INFO] 22:39:11 Sending HGH Packet!!!
[INFO] 22:39:18 Sending SSM Packet!!!
[INFO] 22:39:19 Sending TMPHMD Packet!!!
[INFO] 22:39:28 Sending SSM Packet!!!
[INFO] 22:39:31 Sending HGH Packet!!!
[INFO] 22:39:38 Sending SSM Packet!!!
[INFO] 22:39:39 Sending TMPHMD Packet!!!
CTRL-A Z for help | 4800 8N1 | NOR | Minicom 2.6.1 | VT102 |
```

**Figura 18.** Muestra de la información generada por el puerto de depuración



**Figura19.** Comportamiento de todos los sensores que integran la sRIS

En una primera instancia, se comprobó el correcto funcionamiento del puerto de depuración tal como se presenta en la Fig. 18; el puerto de depuración arrojó

información relacionada al arribo de mensajes de los distintos módulos e información de los procesos de enganche y desenganche del GPS y de lectura del mismo.

Una segunda instancia comprobó el correcto funcionamiento del puerto de comunicaciones del Módulo Base, que puede ser apreciado en la Fig. 19; además, para comprobar otras funcionalidades del Módulo Base, se simuló un escenario en que todos los sensores que integran la sRIS generaron alertas en el mismo periodo de tiempo. Esto determinó también el correcto funcionamiento del Módulo Base gestionando las alertas del resto de módulos.

## 8. CONCLUSIONES

Existen limitaciones en la sRIS en cuanto a seguridad. Tales limitaciones se deben al hecho de que el diseño de las RIS está basado en el estándar de comunicaciones IEEE 802.15.4 y no en especificaciones como por ejemplo ZigBee, que ofrece servicios como ruteo, encriptación, asociación y autenticación, y otros servicios disponibles en su Capa de Aplicaciones.

La información generada por el SMYCF constituirá un parámetro de calibración del modelo matemático que deberá ser implementado por la institución interesada y que permitirá la cuantificación de flujos de lodo; mientras que la topografía del terreno, la geometría de las quebradas, los hidrogramas de entrada y los parámetros reológicos constituirán los parámetros de entrada que alimentarán tal modelo.

Un mayor número de coeficientes para un filtro digital implica mayor carga de procesamiento para el microprocesador, pero por otro lado mejora la calidad del mismo. El escenario ideal sería trabajar con filtros digitales de calidad aceptable que no provoquen carga de procesamiento excesiva.

La principal dirección del trabajo futuro es el desplegar los módulos desarrollados y recolecta datos para que puedan ser procesados por los expertos, además de expandir el número de sensores y distribuirlos en un área de cobertura significativa.

## RECONOCIMIENTO

A las principales autoridades del Instituto Geofísico por su apertura e interés en el presente trabajo de investigación. Al personal del Departamento de Instrumentación del IG por su colaboración en el desarrollo del mismo.

## REFERENCIAS

- [1] C. Macías. (2012, Agosto) Diseño de un sistema digital de monitoreo de lahares.
- [2] C. Rossi and et al., "Wireless Sensor Networks for Planetary Exploration: Experimental Assessment of Communication and Deployment," *Advances in Space Research*, 2013.
- [3] Crossbow. (2007, Septiembre) Imote2 Buidier Kit Manual.
- [4] D. Andrade et al. (2006) Lahar early warning systems based on acoustic flow monitors in Ecuador.
- [5] D. Andrade, P. Ramón, and et al. (2005) Sistemas de Detección de Lahares y Alertas Tempranas: Aplicaciones y Resultados en los volcanes del Ecuador.
- [6] G. Werner-Allen, J. Johnson, M. Ruiz, J. Lees y M. Welsh, Monitoring volcanic eruptions with a wireless sensor network. EWSN 2005.
- [7] P. Marcillo. (2006, Abril) Sistema Informático para Adquisición, Almacenamiento y Análisis de datos de deformaciones volcánicas. [Online]. <http://repositorio.puce.edu.ec/handle/22000/1048>
- [8] SciDevNet. [Online]. <http://www.scidev.net/america-latina/comunicacion/especial/alerta-temprana-contra-desastres-hechos-y-cifras.html>
- [9] TinyOS. (2013, Enero) [Online]. <http://www.tinyos.net/tinyos-2.1.0/doc/>



# Revisión de Herramientas de Apoyo en el Proceso de Enseñanza-Aprendizaje de Programación

Guerrero M.; Guamán D. S.; Caiza J. C.

Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Quito, Ecuador  
e-mail: monicaguerrero120@gmail.com; {danny.guaman;julio.caiza}@epn.edu.ec

**Resumen:** El aprendizaje de programación es un tema de gran interés en investigación académica. Varias investigaciones se han centrado en la creación y uso de herramientas de calificación automática; sin embargo, existen otras de diferente tipo que también pueden ser muy útiles. Este artículo toma un enfoque amplio y hace una revisión de un conjunto extenso de herramientas. Se establece una tipología de ellas, y se provee de información relevante considerando una evolución temporal y organizándolas por cada tipo establecido. Se presenta una discusión en la cual se establecen los parámetros relevantes que se deberían considerar para comparar y seleccionar una herramienta determinada. Este artículo pretende ayudar a docentes e investigadores que están interesados en realizar nuevos proyectos para mejorar el proceso de enseñanza-aprendizaje de programación.

**Palabras clave:** revisión; programación; aprendizaje; herramientas de apoyo; calificación automática.

**Abstract:** Programming learning is a hot topic in academic research. Although there have been much work focused in building and using automatic grading tools; there are other useful kinds of them. This paper takes a broad focus to give a review of a large set of tools. The main paper's contribution is the proposal of a typology for the reported tools. Considering that and adopting a time evolution perspective, a set of relevant information about the tools is presented. Additionally, it is presented a discussion to define the relevant parameters to be considered to select a tool for implementations. This paper aims to help teachers and researchers who are interested in projects oriented to improve the programming teaching-learning process.

**Keywords:** review; programming, learning, support tools, automatic grading.

## 1. INTRODUCCIÓN

El aprendizaje de programación es un requisito fundamental dentro de la mayoría de ingenierías técnicas, y por ende es muy importante en la formación de un gran número de estudiantes. Adquiere aún más importancia debido a que es un proceso difícil, especialmente para aquellos que se enfrentan al aprendizaje de esta asignatura por primera vez. Además, dado que es un proceso de enseñanza-aprendizaje, también se vuelve un tema relevante para los profesores. El alto grado de dificultad que tiene el aprendizaje de la misma se ve reflejado en una alta tasa de fallos de los estudiantes en las asignaturas orientadas a la enseñanza de programación. Varios trabajos han afirmado que el incremento en la cantidad de ejercicios que el estudiante realiza, y una rápida retroalimentación, colaboran en su proceso de aprendizaje [1]. También se debe tener en cuenta que el incremento de la cantidad de ejercicios, acompañado del gran número de

estudiantes de ingeniería, hacen inviable un proceso de calificación manual. Es por esto que muchos trabajos se han orientado al uso de herramientas de calificación automática [2][3][4][5].

Se debe tener en cuenta que adicionalmente a las herramientas de calificación automática, hay otras reportadas y que se han usado de manera exitosa; así en [6] se reporta el uso screencasts y cuestionarios de autoevaluación, y en [7] se reporta el uso de Scratch. Es por ello que se hace necesario revisar y considerar el resto de herramientas existentes, en conjunto con las de calificación automática, para consolidar un conjunto más amplio y poder escoger aquellas que se puedan acoplar a los casos de las instituciones interesadas en mejorar el proceso enseñanza-aprendizaje de programación.

El resto del artículo está organizado como sigue: en la sección 2 se revisan los trabajos relacionados. En la sección 3 se realiza una revisión de las herramientas usadas en el proceso de enseñanza-aprendizaje estableciendo una tipología y señalando su evolución. Una discusión considerando diferentes parámetros dependiendo de la tipología establecida es realizada en la sección 4. Finalmente, en la sección 5 se mencionan las conclusiones y posible trabajo futuro.

Artículo recibido el 15 de diciembre de 2014; revisado XX XX de 20XX.

Esta obra ha sido realizada como parte del proyecto de investigación semilla "Propuesta y despliegue de una solución basada en Herramientas Telemáticas (multimedia, herramientas web 2.0, servicios telemáticos) para reducir la tasa de estudiantes reprobados en la asignatura de programación en la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica.", con código PIS - 14 - 27 en la Escuela Politécnica Nacional.

Autor para correspondencia: julio.caiza@epn.edu.ec, Cel. 0984718532, Ext. 2350.

## 2. TRABAJO RELACIONADO

El apoyo en el proceso enseñanza-aprendizaje de varias asignaturas de las carreras de ingeniería utilizan como soporte un amplio conjunto de herramientas de software. En [8] se presenta una revisión de herramientas informáticas licenciadas bajo el paradigma desoftware libre muy populares y útiles dentro de las carreras de Ingeniería. La asignatura de programación, debido a su vital importancia dentro de las carreras de ingeniería sigue siendo la motivación de varios proyectos de investigación, razón por la cual es abordada en el presente artículo. Varias herramientas, sobresaliendo aquellas orientadas a la calificación automática de ejercicios, han sido y están siendo utilizadas en varias instituciones alrededor del mundo.

Debido a la gran cantidad de herramientas existentes, algunos autores han realizado una revisión de herramientas y su evolución en el tiempo.

En [9] se adopta una perspectiva de evolución temporal y revisan los trabajos hasta el 2005, clasificando las herramientas reportadas en tres generaciones. La primera generación, se refería a programas de calificación realizados a medida, y que iban desde aquellos que calificaban tarjetas perforadas hasta aquellos que necesitaban integrarse con los compiladores o con el sistema operativo. La segunda generación se refería a aquellos sistemas desarrollados a partir de otras herramientas que venían dentro de los sistemas operativos; este tipo de sistemas podían ser llamados desde consola o a través de una interfaz gráfica. La tercera generación usaba tecnologías web, y se aprovechaba de sus inherentes ventajas, para el envío, administración, procesado, etc.

En [10] se cubrieron los trabajos desarrollados desde el 2005 al 2010. En este caso se puede notar las mejoras obtenidas desde tres perspectivas. Tecnológicamente, se reportó el uso de espacios seguros ante posibles ataques y la integración con LMSs (Sistemas de Administración de Aprendizaje). Pedagógicamente, se reportó el uso de análisis estático y dinámico para establecer calificaciones, y la existencia de herramientas con detectores de plagio. Respecto de la adopción de los sistemas construidos, se reportó proyectos de código abierto que hicieron que la aceptación de las herramientas mejore.

En [5] se hizo una revisión de un conjunto de herramientas que incluían aquellas que ya tenían años de investigación y por lo tanto tenían un esquema consolidado y varias funcionalidades, y aquellas recientes, con nuevas características, que se habían reportado entre 2010 y 2013. La perspectiva adoptada para su análisis les llevo a determinar los diferentes criterios de calificación usados en las herramientas, y se propuso una caracterización de los mismos.

Se debe mencionar que para conseguir mejoras en el proceso enseñanza-aprendizaje de programación no solo las herramientas de calificación automática son de utilidad, sino que hay varios tipos de herramientas que pueden ayudar y por lo tanto su estudio es necesario.

## 3. HERRAMIENTAS USADAS EN EL PROCESO ENSEÑANZA-APRENDIZAJE DE PROGRAMACIÓN

Hay una gran cantidad de herramientas usadas como ayuda en el proceso enseñanza-aprendizaje de programación, por consiguiente se requiere el establecimiento de una tipología que permita organizarlas y estudiarlas adecuadamente.

### 3.1 Establecimiento de una Tipología

Aunque las diferentes herramientas reportadas persiguen un objetivo similar, que es ayudar en el proceso de enseñanza-aprendizaje de programación; estas presentan una gran diversidad en torno a su naturaleza.

Para establecer una tipología de las herramientas, se procedió a revisar el conjunto de características y se definieron las más notables. Se abstraieron aquellas que son comunes en un grupo de herramientas y se las estableció como un tipo. Adicionalmente, en los casos en los cuales hubo más de una característica común, se escogió la que resultaba más representativa a la herramienta.

Los tipos determinados son:

- Herramientas de calificación automática.- Son aquellas herramientas orientadas a la automatización del proceso de calificación de ejercicios de programación. Ayudan a que el estudiante pueda realizar una mayor cantidad de ejercicios y pueda recibir una rápida retroalimentación, y también a que el profesor no se vea agobiado por un excesivo número de tareas a calificar.
- Herramientas multimedia.- Son herramientas que ayudan en el proceso de aprendizaje a través del uso de recursos como textos, imágenes, videos, entre otros. Además, se puede dar una integración de herramientas multimedia para dar lugar a los Objetos Digitales Educativos, los mismos que siguen una arquitectura modular de jerarquía creciente [11]. El nivel jerárquico se define en función de las características de estructura, funcionalidad y cobertura curricular. En nuestro estudio se distinguen los dos primeros niveles correspondientes a los Objetos Básicos (OB), y a los Objetos de Aprendizaje (OA).
- Sistemas inteligentes de tutoría.- Son herramientas complejas y orientadas al soporte de los estudiantes durante la escritura de sus programas. Incluyen mecanismos por medio de los cuales el estudiante resuelve el ejercicio en base a su nivel de conocimiento.
- Herramientas de aprendizaje visual.- Son herramientas orientadas a representar gráficamente un programa. Se puede observar a través de componentes gráficos el algoritmo del programa y la ejecución del mismo. Son herramientas que permiten un alto grado de interacción con el estudiante.

Adicionalmente, los IDEs (Entornos de Desarrollo Integrado) por sus características como el coloreado de sintaxis, la compilación, la depuración, la ayuda contextual, entre otras, ayudan al proceso de aprendizaje dependiendo de las técnicas de uso.

### 3.2 Herramientas de Calificación Automática

Este tipo de herramientas evalúan de forma automática las tareas de programación, y se centran en calificar el código desarrollado por el alumno. La mayoría de herramientas usa como criterio de calificación únicamente la funcionalidad [5], es decir, luego de la ejecución del código se comprueba si la salida es correcta.

El apareamiento de este tipo de herramientas ha surgido a la par de los lenguajes de programación [9]. Su importancia dentro del ámbito educativo ha permitido su constante desarrollo. Basándonos en el esquema adoptado en [9] se mencionan:

- Las herramientas de calificación automática que nacieron a partir del uso de código máquina y lenguaje ensamblador. El primer ejemplo de este tipo de sistemas fue dado en [12] usando tarjetas perforadas.
- Las herramientas a modo de scripts, llamadas a través de línea de comandos o incluso a través de interfaces gráficas de usuario, fueron creadas basándose en utilidades o herramientas provistas por el sistema operativo. Estas herramientas comenzaron a incorporar mecanismos para el análisis y evaluación de código, y que permitían a los docentes asignar pesos a las pruebas. Entre estos trabajos se pueden mencionar Ceilidh [13], y BOSS [14].
- Herramientas de calificación automática basadas en tecnologías Web, muchas de las cuales proporcionan algún grado de administración de contenido. A este grupo de herramientas pertenecen CourseMarker [15], Web-CAT [16], BOSS2 [17] y SAC [18].
- Adicionalmente, se puede mencionar nuevas herramientas que permiten una evaluación granular aplicando métodos de regresión y patrones, así tenemos Automata [19], y eGrader [20]. Aquellas que mejoran en aspectos de seguridad como Pythia [21], CAP [22] Y AUTOLEP [19]. Otras que consiguen una integración con LMSs como Virtual ProgrammingLab (VPL) [3], YAP3 + APAC [23], IT VBE [24] y PETCHA [1].

### 3.3 Herramientas Multimedia

Las herramientas multimedia (incluyendo texto, imágenes, audio, animación, video, entre otros) pretenden enriquecer los contenidos y favorecer al aprendizaje de los estudiantes, estimulando su percepción.

En [6] se hace uso de este tipo de herramientas dentro del LMS Moodle para explicar conceptos referentes a programación y el uso de aplicaciones de software. Usan

screencasts y cuestionarios autoevaluados como medio de apoyo en cursos introductorios de programación, persiguiendo como objetivo el aumentar la motivación y el dinamismo en los estudiantes.

Othman et al. [25], Sharp et al. [26] y Fenwick et al. [27] reportan el uso de videos y screencast para ayudar a mejorar la comprensión de los estudiantes en la resolución de problemas de programación.

Naz et al. [28] reporta el uso de imágenes diseñadas de tal forma que permitan mostrar paso a paso la ejecución de un programa, ayudando a la comprensión de la lógica y el flujo de programa. Alhazbi [29] reporta el uso de un diario incorporado en el LMS Blackboard para que el alumno escriba durante la semana sobre su proceso de estudio para su clase de programación. Esta metodología tenía por objetivo el reforzar en los alumnos habilidades tales como la reflexión, análisis y autoevaluación.

En [30] y en el programa de apoyo a estudiantes en materias de programación LTI 2012-B de la Universidad de Guadalajara [31] hacen uso de OBs constituidos por wikis. Este tipo de herramientas promueven el aprendizaje colaborativo, ya que su principal ventaja es la comunicación e interacción entre los alumnos para la consulta y resolución de problemas.

En [32], [33] y [34] se reporta el uso de OAs para la enseñanza de programación. Estas herramientas se han diseñado para que se ajusten a las necesidades de los estudiantes, lo que les permite desarrollar sus habilidades mediante la interacción con ellas, y también para que les proporcionen actividades de evaluación.

### 3.4 Sistemas Inteligentes de Tutoría

Una herramienta de este estilo utiliza técnicas procedentes de la IA (Inteligencia Artificial) y está diseñado para brindar una enseñanza personalizada.

Su aparición se dio en los años setenta en paralelo con el desarrollo de los sistemas EAO (Enseñanza Asistida por Ordenador) y apoyados con el uso de técnicas de inteligencia artificial. Este tipo de herramientas tenía como objetivo lograr la interacción con el alumno, incorporando un componente que simula a un tutor. Los primeros STI que aparecieron fueron LispTutor [35], PROUST [36] y MENO II [37] cuyas características fueron: su orientación a la enseñanza introductoria de programación, empleando los lenguajes Lisp y Pascal, su entorno de trabajo fue el de una aplicación independiente que sea simple de usar centrados en el manejo de bugs y errores que se generan en la escritura de código.

Los progresos en la IA, la psicología cognitiva y los paradigmas de programación dieron origen a la evolución de los STI hacia sistemas adaptables a los alumnos y que querían proporcionar un entorno de enseñanza altamente personalizable [38]. Sistemas que pertenecen a esta generación son ELM-PE [39], ELM-ART [40].

Los STI evolucionaron a los Sistemas Adaptativos Inteligentes basados en la web para la enseñanza, que precisamente tomaban ventaja de los beneficios de las

tecnologías web. A este tipo de sistemas pertenecen M-PLAT [41], CPP-Tutor [42], y C++ STL [43] y Altuna J. y Guibert L [44].

Es necesario mencionar herramientas como Prog-Tool [45] que hacen uso de agentes como soporte a las actividades a desarrollarse en la misma.

### 3.5 Herramientas de Aprendizaje Visual

Las herramientas para aprendizaje visual pretenden ayudar en el proceso de aprendizaje de programación a través de representaciones gráficas de los algoritmos de solución y/o de la ejecución de un programa.

Durante la época de 1960 se desarrollaron las primeras herramientas en esta área. Una de estas herramientas fue Logo [46] que surgió en el año de 1967 y utilizaba el lenguaje de programación Lisp. Uno de los ambientes consistía en una tortuga que yace en el piso y cuyos movimientos eran dirigidos a través de los comandos escritos por los alumnos; permitía implementar operaciones de E/S, iteración, estructuras de datos, y algoritmos.

El Robot Karel20 [47], desarrollado en la Universidad Carnegie Mellon se enfocaba en enseñar los conceptos de programación estructurada. El estudiante escribía pequeños programas que resultaban en una serie de acciones que le permitían al robot desplazarse en un simulador que contiene calles y avenidas. Su estructura fue cambiada dando lugar al apareamiento de JKarel Robot [48].

En [49] se reporta Turingal, que se componía de una máquina de Turing y una cinta magnética. El estudiante escribía instrucciones usando un lenguaje basado en la sintaxis de Pascal, que le permitía a la máquina de Turing escribir y leer símbolos a través de la cinta magnética.

El Media Lab. del MIT (2003-2007) en convenio con la Universidad de California Los Ángeles desarrollaron la herramienta Scratch[7], que es entorno 2D que apoya el aprendizaje a través de la creación de animaciones, juegos, e historias interactivas. Su entorno presenta funcionalidades *drag and drop*, y permite usar objetos llamados sprites y bloques que definen una operación lógica a realizar. Permite mejorar el aprendizaje de conceptos tales como: variables, operadores relaciones y lógicos, y tipo de datos.

También Greenfoot[50] está considerado dentro de este tipo y se presenta como un mundo virtual 2D. Requiere de la introducción de código Java a un nivel básico y permite el aprendizaje de los conceptos fundamentales tales como herencia, abstracción, polimorfismo a un mayor nivel que lo introducido en otros entornos como Scratch o Alice.

La Universidad Carnegie Mellon desarrolló Alice, misma que trabaja en un entorno de animación de un mundo virtual en 3D. Cuenta con protagonista virtual llamado Alice que ejecuta las acciones programadas por los alumnos. Las instrucciones se definen usando un editor gráfico, especificando las acciones a realizar con la ayuda de una paleta de herramientas y arrastrando y soltando los componentes. Alice aporta al aprendizaje de los fundamentos de programación orientada a objetos [51][52].

Existen herramientas derivadas de las anteriores generaciones y que mejoran su interactividad. Así se tiene PLM [53] que permite visualizar la ejecución de código paso a paso para diferentes lenguajes de programación.

También se reporta el uso combinado de herramientas de aprendizaje visual en Londoño S. y Orozco A. [54] donde se emplea simultáneamente Alice y el Robot Scribbler para fomentar la capacidad de análisis algorítmico y mejorar las habilidades para resolver problemas en los estudiantes. Jonas[55] expone el uso de Greenfoot [50] en combinación con el uso de estrategias de juegos de mesa, y a través del flujo del programa se pretende reforzar la comprensión de las diferencias entre clases y objetos variables, bucles, etc.

## 4. DISCUSIÓN

### 4.1 Parámetros Relevantes

Todas las herramientas tienen un conjunto amplio de características, y por ende se hace necesario definir cuáles de ellas tienen mayor importancia y se convierten en parámetros relevantes a considerar antes de su posible uso. Se tienen:

- Lenguajes/paradigma de programación soportado.- Es importante debido a que cada interesado podría usar diferentes lenguajes de programación dentro de su curso.
- Modo de trabajo.- Se refiere a la manera en la cual la herramienta se implementa para su funcionamiento, resulta ser importante especialmente si se va a integrar con otros sistemas.
- Método de evaluación de código.- Indica las métricas o mecanismos usados para evaluar el código.
- Retroalimentación.- Hace referencia a la forma en la cual el estudiante recibe comentarios u observaciones sobre su trabajo.
- Tecnologías usadas.- Se refiere a las tecnologías usadas y sobre las cuales trabaja la herramienta, importante en integración de sistemas.
- Interactividad.- Hace referencia a la forma en la cual la herramienta interactúa con el estudiante.
- Tipo de recurso multimedia.- Indica el tipo de elemento multimedia usado o el tipo de información que representa.
- Colaboración.- Indica si la herramienta permite la comunicación o cooperación entre alumnos.
- Licencia de Software.- Parámetro que proporciona información acerca del tipo de licenciamiento de la herramienta.

Los parámetros a considerar variarán dependiendo del tipo de herramienta usada. Esto se verá en la siguiente sección.

### 4.2 Herramientas de Calificación Automática

Este tipo de herramientas automatizan el proceso de evaluación y pueden ayudar a establecer una calificación, por lo que es necesario conocer el dominio de lo que evalúan (lenguajes), y como lo hacen (criterios usados). Así mismo, la

calidad y cantidad de retroalimentación que ofrezcan ayudarán en mayor o menor grado al estudiante, por lo que también es un parámetro fundamental a considerar.

Además, una institución, docente, o investigador interesado en utilizar la herramienta necesitará información respecto a su modo de trabajo y la tecnología sobre la que se soporta la herramienta debido a que necesitará instalar la misma, esto adquirirá más importancia cuando se requiera integración con otros sistemas. Finalmente, características como la forma en la cual interactúa el estudiante con la herramienta y el acceso

al código fuente de la aplicación son relevantes. En el primer caso porque se busca una interacción que facilite el envío de tareas, o que anime al estudiante a seguir usando la herramienta; y en el segundo por políticas organizacionales, o porque podrán acceder al código de la herramienta para modificarlo según sus necesidades. El conjunto de herramientas estudiadas puede verse en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Herramientas de Calificación Automática

Herramienta	Lenguajes de programación soportados	Modo de Trabajo	Métodos de Evaluación de Código	Retroalimentación	Tecnologías usadas
Ceilidh	C, Pascal, C++	Aplicación de escritorio	Test dinámicos Tipografía Uso adecuado de estructuras	Información y notas acerca de donde se ocasiona la pérdida de puntuación Lecturas sobre resolución de ejercicios	Programas de sistema .act
BOSS	C	Software Package	Comparación carácter a carácter	Mensajes de error	Java
Course Marker	Java, C++	Standalone	Tipografía Uso adecuado de estructuras y objetos	Comentarios de explicación del código	Java Java RMI DATsys
Web-CAT	Java C++ y Pascal	Aplicación Web	Análisis estático	Salida de casos de prueba	Java
BOSS2	Pascal y Java	Aplicación Web	Análisis Dinámico Detección de plagio, JUnit	Salida de casos de prueba	Java Java RMI
SAC	Java	Aplicación web	Análisis dinámico	Salida de casos de prueba Estadísticas acerca del desempeño	Java, JSP, Apache Tomcat 5.5 y PostgreSQL
Automata	Probada usando Lenguaje C	Aplicación Online	Rúbricas basadas en Modelos de Regresión	Reportes detallados de las características recogidas de los programas	-
eGrader	Java	Aplicación Gráfica	Análisis Estático y Análisis Dinámico	Reportes basados en los errores cometidos	JUnit, Software Engineering Metrics (SEM)
Pythia	Soporta varios lenguajes de Programación/Probada usando Phyton	Aplicación Web	Métodos de evaluación usando scripts	Gráficos usando google chart tools que muestran, el número de accesos a los métodos.	XML Sandbox Linux
CAP	Java	Aplicación Web	Análisis Estático y Análisis Dinámico	Lista de errores del programa evaluado. Código de solución y estadísticas sobre los trabajos presentados	Applet Java
VPL	Varios paradigmas de programación	Plugin para Moodle	Detección de Plagio	Comentarios, lista de test fallidos y casos de prueba	Java Applet PHP
AUTOLEP	C	Aplicación Distribuida	Análisis estático y testeo dinámico	Mensajes de advertencia ante error de semántica o estructura.	-
YAP3 + APAC	Soporta varios lenguajes de programación como C, C++, Java, PHP	Módulo de Moodle Aplicación con Servlets	Pruebas de entrada/salida	Salida de casos de prueba. Lista de resultados de la ejecución del programa.	Java EE 7, API REST, Servlets
IT VBE	Pascal y C++	Plugin	Análisis Dinámico con Pruebas de Caja Blanca	Devuelve las correcciones del programa evaluado	-
PETCHA	Lenguajes soportados por Eclipse y Visual	Web	Mooshak	Salida de casos de prueba. Patrones de error	PEXIL, IMS, bLTI LMS, JAWS

Tabla 2. Herramientas Multimedia

Herramienta	Lenguajes/Paradigma de programación soportado	Retroalimentación	Interactividad	Modo de trabajo	Proyecto referido
Screencast	Lenguajes soportados por Eclipse	Explicación de la resolución de un programa.	Medio de recuperación de la información	Integrado en Moodle	[6]
Diario	Programación Estructurada/C++	Escritura y lectura de los conceptos aprendidos en clase.	Medio de recuperación de la información	Integrado en Blackboard	[29]
Wiki	Estructurada, Funcional e Imperativa	Soluciones a los programas posteados.	Herramienta Colaborativa	Aplicación Web	[30]
Wiki	Programación Estructurada, POO y Desarrollo de Software	Escritura y lectura de los conceptos aprendidos en clase.	Herramienta Colaborativa	Aplicación Web	[31]
Imágenes	Algoritmos	Diagramas de flujo y Cuestionarios.	Medio de recuperación de la información	Integrado en Moodle y Claroline	[32]
Cuestionarios	C	Errores de compilación Revisión de conceptos.	Herramienta constructiva	Aplicación Web	[33]
Juegos, Texto Animaciones Imágenes	Python, C y Java	Salida de los casos de prueba Errores de compilación.	Herramienta constructiva	Aplicación Web	[34]
Video, Simulaciones y Animaciones	C, Matlab, Java	Explicación de la resolución de un programa.	Medio de recuperación de la información	Puede ser integrado en sistemas e-learning	[26]
Video	C#	Explicación de la resolución de un programa.	Medio de recuperación de la información	Online	[27]
eBook	Prolog	Explicación de conceptos de programación	Medio de recuperación de la información	Se integra con CMS y Sistemas de Calificación Automática	[28]
Imágenes	C/C++	Explicación paso a paso de la ejecución de un programa.	Medio de recuperación de la información	App Gráfica	[29]

### 4.3 Herramientas Multimedia

Debido a que hay una variedad de herramientas multimedia, es necesario establecer una comparativa definida por los tipos de herramientas existentes y que han sido usados para ayudar el proceso de aprendizaje de programación. Aunque el tipo de recurso referido tendrá ventajas inherentes a su naturaleza, denotando la interactividad, también es necesario considerar elementos útiles como la retroalimentación, el paradigma de programación soportado y el modo de trabajo. Los dos primeros pueden ser de mucha utilidad para definir un plan de trabajo dependiendo del lenguaje de programación que se usa en un curso.

El modo de trabajo con el cual se lo ha usado permitiría saber si es compatible con nuestro esquema de trabajo para obtener resultados exitosos. El resumen de las características de las herramientas se puede ver en la Tabla 2, cuya última columna muestra los proyectos de investigación reportados que han hecho uso de este tipo de herramientas.

### 4.4 Sistemas de Tutoría Inteligentes

En este tipo de herramientas la resolución de ejercicios planteados retroalimentan al sistema y al alumno. La finalidad de estos sistemas es ayudar al estudiante en el desarrollo de programas a través de un tutor virtual que es el

núcleo del sistema. Esta característica hace que varios de los parámetros relevantes aplicados en las herramientas de calificación automática, también sean aplicables aquí; así se mencionan: los criterios o métodos de evaluación, la forma de retroalimentación, el paradigma o los lenguajes de programación soportados, y las tecnologías usadas. La Tabla 3, muestra las herramientas de este tipo.

### 4.5 Herramientas de Aprendizaje Visual

Las herramientas de aprendizaje visual permiten asimilar, a través de una representación gráfica, conceptos de programación. Durante la creación de este tipo de sistemas se ha tenido claramente definido el tipo de lenguaje o paradigma sobre el cual se brindaría la ayuda, por lo que es un parámetro relevante a considerar.

Aunque la mayoría de este tipo de herramientas se ha desarrollado para trabajar como una aplicación independiente, hay casos en los que trabajan a través de interfaces web; por lo tanto su modo de trabajo es un parámetro relevante.

Debido a que la mayoría de ellas son aplicaciones instalables, es necesario conocer también la licencia de uso.

Finalmente, la visualización de retroalimentación es a través de animaciones y todas se han pensado para cursos introductorios de programación. El resumen de características relevantes se observan en la Tabla 4.

Tabla 3. Sistemas de Tutorías Inteligentes (página 1 de 2)

Herramienta	Lenguaje/Paradigma de Programación	Modo de Trabajo	Métodos de Evaluación	Retroalimentación	Tecnologías usadas
LispTutor	Lisp	Aplicación Independiente	Reglas de Resolución de Problemas	Mensajes de diagnóstico por pieza de código.	-
PROUST	Pascal	Aplicación Independiente	Emplea métodos de análisis de bugs.	Mensajes de explicación acerca de bugs encontrado en el código	-
MENO II	Pascal	Aplicación Independiente	Componentes de la solución del programa a través de PDL	Sugerencias sobre el código erróneo generado por el estudiante	-
ELM-PE	Lisp OOP	Aplicación Independiente	Análisis dinámico	Explicación de los errores en el código	-
ELM-ART	Lisp OOP	Web	Casos de prueba	Lecturas Mensajes enviados por los tutores	Common Lisp WWW CL-HTTP
M-PLAT	OOP	Web	Análisis Dinámico	Explicación de los errores en el código	Web-Service, Java, SOAP, C#, UDDI, WSDL, XML
CPP-TUTOR	C++, Programación Estructurada	Web	Algoritmo de Programación dinámica	Proporciona retroalimentación inteligente apoyada en la compilación del código, el enunciado del programa, el código desarrollado, entre otros	Web-services
C++ STL	Usada frecuentemente para Programación Estructurada	Web	Casos de prueba	Explicación de soluciones a los problemas planteados	Java, Mysql
Generación de pistas durante el aprendizaje de la programación para concursos usando el análisis estático y dinámico de las soluciones.	Programación Orientada a Objetos	Web	Análisis estático y dinámico	Proporciona soluciones y comentarios dados por el profesor. Información suministrada acerca de los errores cometidos.	Java EE JavaServerPages Apache Tomcat
Prog-Tool	Programación Orientada a Objetos	Aplicación Multi-Agente	Cumplimiento de criterios de evaluación.	Mensajes que indican si la opción seleccionada es correcta o incorrecta	Java Tilab Jade

Tabla 4. Herramientas de Aprendizaje Visual

Herramienta	Paradigma de Programación	Modo de Trabajo	Licencia
Logo	Lisp OOP	App. Independiente	Software Libre
Karel20	Estructurada	App. Independiente	Software Libre
JKarel Robot	Estructurada	App. Independiente	Software Libre
Turingal P	Imperativa	App. Independiente	Software Libre
Scratch	POO	App. Independiente Aplicación web.	Propietario
Greenfoot	POO	App. Independiente	GNU
Alice	POO	App. Independiente	BSD
PLM	Java, Python y Scala	App. Independiente	Software Libre

## 5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Se ha realizado una revisión de un amplio conjunto de herramientas de apoyo en el proceso enseñanza-aprendizaje de programación, con la intención de adoptar un enfoque más amplio que permita considerar muchos tipos de herramientas reportadas, y no limitarse únicamente a aquellas que se han orientado a la calificación automática de tareas.

Debido a la gran cantidad de herramientas reportadas y a su distinta naturaleza, se ha propuesto una tipología de clasificación, la misma que tiene como objetivo el ayudar a acceder de manera más ordenada y rápida a la información.

Considerando cada uno de los tipos establecidos, se ha realizado una revisión de las distintas herramientas considerando una perspectiva temporal; esto ha permitido

estudiar la problemática y avances encontrados en los trabajos que reportan las herramientas.

Dentro de cada tipo establecido, se ha definido un conjunto de parámetros relevantes y que se deberían tener en cuenta ante posibles desarrollos o implementaciones de soluciones futuras. Esta información se la ha sintetizado a través de tablas comparativas.

El presente trabajo pretende ayudar a los docentes e investigadores a través de un acceso rápido a información de las herramientas desarrolladas, mismas que han sido clasificadas dentro de tipos establecidos. Esto les permitirá colocarse rápidamente en el contexto de este ámbito de investigación.

Se pretende que esta tipología sea usada por los docentes e investigadores para que definan soluciones o planes de trabajo que usen las herramientas reportadas para su aplicación sobre el proceso de enseñanza-aprendizaje de programación.

Debido a la gran cantidad de herramientas y de diverso tipo, se puede pensar en definir arquitecturas que integren las mismas, en lugar de seguir construyendo nuevas.

## REFERENCIAS

- [1] R. A. P. Queirós and J. P. Leal, "PETCHA: A programming exercises teaching assistant," in *Proceedings of the 17th ACM Annual Conference on Innovation and Technology in Computer Science Education*, 2012, pp. 192-197.
- [2] S. Gupta and S. K. Dubey, "Automatic assessment of programming assignment," *Computer Science & Engineering: An International Journal (CSEIJ)*, vol. 2, 2012.
- [3] J. C. Rodríguez-del-Pino, E. Rubio-Royo and Z. J. Hernández-Figueroa, "A virtual programming lab for moodle with automatic assessment and anti-plagiarism features," in *Proceedings of the 2012 International Conference on e-Learning, e-Business, Enterprise Information Systems, & e-Government*, 2012.
- [4] J. López Reguera, C. Hernández Rivas and Y. Farran Leiva, "Una plataforma de evaluación automática con una metodología efectiva para la enseñanza/aprendizaje en programación de computadores," *Ingeniare Revista Chilena De Ingeniería*, vol. 19, pp. 265-277, 2011.
- [5] J. C. Caiza and J. M. del Alamo, "Programming assignments automatic grading: Review of tools and implementations," in *ICERI2013 Proceedings [Ref\_]*, Valencia, Spain, 2013.
- [6] B. San Miguel, S. Aguirre, J. del Alamo and M. Cortés, "A proposal for enhancing the motivation in students of computer programming," *ICERI2012 Proceedings*, pp. 1157-1164, 2012.
- [7] D. J. Malan and H. H. Leitner, "Scratch for budding computer scientists," in *ACM SIGCSE Bulletin*, 2007, pp. 223-227.
- [8] R. Herrera, "Herramientas de Software Libre para Aplicaciones en Ciencias e Ingeniería," in *Revista Politécnica*, vol. 32, 2013, pp. 1-8.
- [9] C. Douce, D. Livingstone and J. Orwell, "Automatic test-based assessment of programming: A review," *Journal on Educational Resources in Computing (JERIC)*, vol. 5, pp. 4, 2005.
- [10] P. Ihtantola, T. Ahoniemi, V. Karavirta and O. Seppälä, "Review of recent systems for automatic assessment of programming assignments," in *Proceedings of the 10th Koli Calling International Conference on Computing Education Research*, 2010, pp. 86-93.
- [11] *Objetos educativos digitales*. Available: [http://cefire.edu.gva.es/file.php/1/Comunicacion\\_y\\_apertura/B4\\_Recur sosEducativos/5objetos\\_educativos\\_digitales.html](http://cefire.edu.gva.es/file.php/1/Comunicacion_y_apertura/B4_Recur sosEducativos/5objetos_educativos_digitales.html).
- [12] J. Hollingsworth, "Automatic graders for programming classes," *Commun ACM*, vol. 3, pp. 528-529, 1960.
- [13] S. Benford, E. Burke, E. Foxley, N. Gutteridge and A. M. Zin, "Ceilidh as a course management support system," *J. Educ. Technol. Syst.*, vol. 22, pp. 235-250, 1993.
- [14] M. Joy and M. Luck, "Effective electronic marking for on-line assessment," in *ACM SIGCSE Bulletin*, 1998, pp. 134-138.
- [15] C. Higgins, T. Hegazy, P. Symeonidis and A. Tsintsifas, "The coursemarkerba system: Improvements over ceilidh," *Education and Information Technologies*, vol. 8, pp. 287-304, 2003.
- [16] S. H. Edwards and M. A. Perez-Quinones, "Web-CAT: Automatically grading programming assignments," in *ACM SIGCSE Bulletin*, 2008, pp. 328-328.
- [17] M. Joy, N. Griffiths and R. Boyatt, "The boss online submission and assessment system," *Journal on Educational Resources in Computing (JERIC)*, vol. 5, pp. 2, 2005.
- [18] B. Auffarth, M. López-Sánchez, J. Campos i Miralles and A. Puig, "System for automated assistance in correction of programming exercises (SAC)," in *Proceedings of CIDUI 2008*, 2008, pp. 104-113.
- [19] S. Srikant and V. Aggarwal, "A system to grade computer programming skills using machine learning," in *Proceedings of the 20th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 2014, pp. 1887-1896.
- [20] F. Al Shamsi and A. Elnagar, "An Intelligent Assessment Tool for Students' Java Submissions in Introductory Programming Courses," *Journal of Intelligent Learning Systems and Applications*, vol. 4, pp. 59, 2012.
- [21] S. Combéfis and V. de Saint-Marcq, "Teaching programming and algorithm design with pythia, a web-based learning platform," *Olympiads in Informatics*, vol. 6, pp. 31-43, 2012.
- [22] Ó. Sapena, M. Galiano, N. Prieto and M. Llorens, "Aprender, enseñar y evaluar con CAP, un Corrector Automático de tareas de Programación," *XIX Jornadas De Enseñanza Universitaria De La Informática (JENUI 2013)*, Castellón, 2013.
- [23] D. Pohuba, T. Dulik and P. Janku, "Automatic evaluation of correctness and originality of source codes," in *Microelectronics Education (EWME), 10th European Workshop on*, 2014, pp. 49-52.
- [24] B. Skūpas, A. Čaplinskis, J. Augutis, E. Bareiša, G. Kulvietis, V. Marcinkevičius, D. Dzemydienė and R. Šeinauskas, "A Method for Semi-Automatic Evaluation and Testing of Programming Assignments," *A Method for Semi-Automatic Evaluation and Testing of Programming Assignments*, 2013.
- [25] A. Othman, C. Pislaru and A. Impes, "Improving the Quality of Technology-Enhanced Learning for Computer Programming Courses," *International Journal of Information and Education Technology*, vol. 4, pp. 83-88, 2014.
- [26] J. H. Sharp and L. A. Schultz, "An exploratory study of the use of video as an instructional tool in an introductory C# programming course," *Information Systems Education Journal*, vol. 11, pp. 33, 2013.
- [27] J. B. Fenwick Jr, B. L. Kurtz, P. Meznar, R. Phillips and A. Weidner, "Developing a highly interactive ebook for CS instruction," in *Proceeding of the 44th ACM Technical Symposium on Computer Science Education*, 2013, pp. 135-140.



- [28] S. Naz, S. H. Shirazi, T. Iqbal, D. Irfan, M. Junaid and Y. Naseer, "Learning Programming through Multimedia and Dry-run," 2014.
- [29] S. Alhazbi, "Using e-journaling to improve self-regulated learning in introductory computer programming course," in *Global Engineering Education Conference (EDUCON), 2014 IEEE*, 2014, pp. 352-356.
- [30] R. A. Lotufo, R. C. Machado, A. Körbes and R. G. Ramos, "Adessowiki on-line collaborative scientific programming platform," in *Proceedings of the 5th International Symposium on Wikis and Open Collaboration*, 2009, pp. 10.
- [31] Universidad de Guadalajara, "Programa de apoyo a estudiantes en materias de programación LTI 2012-B,"
- [32] K. Olmos, C. Morales, T. Rojas and L. Fernández, "Objetos de aprendizaje enfocados a la resolución de problemas para facilitar la enseñanza de la programación,"
- [33] V. J. Carrasco, J. H. Guevara J, "Implementación de un conjunto de objetos de aprendizaje y una aplicación web de cuestionarios dinámicos integrados en una herramienta de soporte para el autoaprendizaje de los conceptos de programación básica dirigido a estudiantes de la Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación", Proyecto Fin de Carrera, ESPOL, Guayaquil, 2009. Disponible en: [http://www.cib.espol.edu.ec/Digipath/D\\_Tesis\\_PDF/D-39238.pdf](http://www.cib.espol.edu.ec/Digipath/D_Tesis_PDF/D-39238.pdf).
- [34] J. A. Villalobos, N. A. Calderon and C. H. Jiménez, "Developing programming skills by using interactive learning objects," *ACM SIGCSE Bulletin*, vol. 41, pp. 151-155, 2009.
- [35] R. Anderson and B. J. Reiser, "The LISP tutor," *Byte*, vol. 10, pp. 159-175, 1985.
- [36] W. L. Johnson and E. Soloway, "PROUST: Knowledge-based program understanding," *Software Engineering, IEEE Transactions on*, pp. 267-275, 1985.
- [37] E. M. Soloway, B. Woolf, E. Rubin and P. Barth, "Meno-ii: An intelligent tutoring system for novice programmers," in *Proceedings of the 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence-Volume 2*, 1981, pp. 975-977.
- [38] *Sistemas Tutores Inteligentes*. Available: <http://prezi.com/l13zneraut/copy-of-sistemas-tutores-inteligentes-inteligencia-artificial/>.
- [39] G. Weber and A. Mollenberg, "ELM-PE: A Knowledge-based Programming Environment for Learning LISP." 1994.
- [40] G. Weber and P. Brusilovsky, "ELM-ART: An adaptive versatile system for Web-based instruction," *International Journal of Artificial Intelligence in Education (IJAIED)*, vol. 12, pp. 351-384, 2001.
- [41] A. Nuez, J. Fernández, J. D. Garcia, L. Prada and J. Carretero, "M-PLAT: Multi-programming language adaptive tutor," in *Advanced Learning Technologies, 2008. ICALT'08. Eighth IEEE International Conference on*, 2008, pp. 649-651.
- [42] S. S. A. Naser, "Developing an intelligent tutoring system for students learning to program in C," *Information Technology Journal*, vol. 7, pp. 1055-1060, 2008.
- [43] C. Lee and M. S. Baba, "The Intelligent Web-Based Tutoring System using the C Standard Template Library," *Malaysian Online Journal of Instructional Technology (MOJIT)*, vol. 2, pp. 34-42, 2005.
- [44] E. J. Altuna Castillo and L. Guibert Estrada, "Generación de pistas durante el aprendizaje de la programación para concursos usando el análisis estático y dinámico de las soluciones," *Ingeniare.Revista Chilena De Ingeniería*, vol. 21, pp. 205-217, 2013.
- [45] M. Goyal, "Development of agent-based intelligent tutoring system for teaching object-oriented programming concepts," in *Proceedings of the 9th International Conference on Education and Information Systems, Technologies and Applications (EISTA 2011)*, 2011, pp. 17-22.
- [46] S. Papert, *Mindstorms: Children, Computers, and Powerful Ideas*. Basic Books, Inc., 1980.
- [47] R. M. Leeman and D. H. Glass, "Teaching Java with robots and artificial life," *Innovation in Teaching and Learning in Information and Computer Sciences*, vol. 6, pp. 23-34, 2007.
- [48] D. Buck and D. J. Stucki, "JKarelRobot: a case study in supporting levels of cognitive development in the computer science curriculum," *ACM SIGCSE Bulletin*, vol. 33, pp. 16-20, 2001.
- [49] P. Brusilovsky, "Turingal-the language for teaching the principles of programming," in *Proceedings of Third European Logo Conference 1991*, 1991.
- [50] M. Kölling, "The greenfoot programming environment," *ACM Transactions on Computing Education (TOCE)*, vol. 10, pp. 14, 2010.
- [51] S. Cooper, W. Dann and R. Pausch, "Alice: A 3-D tool for introductory programming concepts," in *Journal of Computing Sciences in Colleges*, 2000, pp. 107-116.
- [52] S. Cooper, W. Dann and R. Pausch, "Teaching objects-first in introductory computer science," *ACM SIGCSE Bulletin*, vol. 35, pp. 191-195, 2003.
- [53] M. Quinson and G. Oster, "The Programmer's Learning Machine: A Teaching System To Learn Programming," 2014.
- [54] S. L. Salcedo and A. M. O. Idrobo, "New tools and methodologies for programming languages learning using the scribbler robot and alice," in *Frontiers in Education Conference (FIE)*, 2011, 2011, pp. F4G-1-F4G-6.
- [55] M. Jonas, "Teaching introductory programming using multiplayer board game strategies in Greenfoot," *Journal of Computing Sciences in Colleges*, vol. 28, pp. 19-25, 2013.

# Determinación de Invariantes en Grandes Centros de Datos Basados en Topología Fat-Tree

Ortiz J.\*; Londono J.\*\*; Novillo F.\*\*\*; Ampuno A.\*; Chávez M.\*

\*Universidad Politécnica Salesiana, Facultad de Ingenierías, Guayaquil, Ecuador  
jortiz@ups.edu.ec; {aampuno; mchavezc}@est.ups.edu.ec

\*\* Universidad Pontificia Bolivariana, Facultad de Ingeniería en Tecnologías de la Información y la Comunicación, Medellín, Colombia  
jorge.londono@upb.edu.co

\*\*\* Escuela Superior Politécnica del Litoral, CIDIS-Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación, Guayaquil, Ecuador  
fnovillo@espol.edu.ec

**Resumen:** Durante los últimos años ha existido un fuerte incremento en el acceso a internet, causando que los centros de datos (*DC*) deban adaptar dinámicamente su infraestructura de red de cara a enfrentar posibles problemas de congestión, la cual no siempre se da de forma oportuna. Ante esto, nuevas topologías de red se han propuesto en los últimos años, como una forma de brindar mejores condiciones para el manejo de tráfico interno, sin embargo es común que para el estudio de estas mejoras, se necesite recrear el comportamiento de un verdadero *DC* en modelos de simulación/emulación. Por lo tanto se vuelve esencial validar dichos modelos, de cara a obtener resultados coherentes con la realidad. Esta validación es posible por medio de la identificación de ciertas propiedades que se deducen a partir de las variables y los parámetros que describen la red, y que se mantienen en las topologías de *DC* para diversos escenarios y/o configuraciones. Estas propiedades, conocidas como invariantes, son una expresión del funcionamiento de la red en ambientes reales, como por ejemplo la ruta más larga entre dos nodos o el número de enlaces mínimo que deben fallar antes de una pérdida de conectividad en alguno de los nodos de la red. En el presente trabajo se realiza la identificación, formulación y comprobación de dos invariantes para la topología Fat-Tree, utilizando como software emulador a mininet. Las conclusiones muestran resultados concordantes entre lo analítico y lo práctico.

**Palabras clave:** Invariantes de red, topologías, Fat-tree, simulación, emulación.

**Abstract:** In recent years there has been a sharp increase in access to internet, causing data centers (*DC*) should dynamically adapt its network infrastructure to face possible problems of congestion, which is not always given in a timely manner. Given this, new network topologies have been proposed in recent years as a way to provide better conditions for handling internal traffic, however it is common for the study of these improvements the need to recreate the behavior of a real *DC* in models of simulation/emulation. Therefore it becomes essential to validate these models, in order to obtain consistent results with reality. Such validation is possible through the identification of certain properties which are derived from the variables and parameters that describe the network and are maintained in the *DC* topologies for different scenarios and/or configurations. These properties, known as invariant, are an expression of the operation of the network in real environments, such as the longest path between two nodes or the minimum number of links that must fail before a loss of connectivity on one of the nodes of the network. In this paper, the identification, formulation and testing of two invariants for the Fat-Tree topology is performed, using MiniNet as the software emulator. The conclusions show good agreement between the analytical and the practical.

**Keywords:** Network invariants, topologies, Fat-tree, simulation, emulation.

## 1. INTRODUCCION

Durante los últimos años ha existido un fuerte incremento en el acceso a internet provocado en gran parte por la extensa variedad de servicios que se ofrecen [8]. Este hecho ha causado que los *DC* se vean obligados a adaptar

dinámicamente su infraestructura de red para soportar el incremento de tráfico generado; de otra manera se podrían provocar problemas de congestión, bajo rendimiento de las aplicaciones, alta tasa de errores y pérdida de paquetes, entre otros [20] [11] [19] [13]. Tal adaptación no siempre se da de forma oportuna y depende en muchos casos de nuevas inversiones en equipos de comunicación y/o enlaces, lo que

supone también un incremento en la complejidad de la red, desde el punto de vista de gestión y configuración.

De cara a resolver estos problemas, en los últimos años nuevas topologías de red para los *DC* se han presentado [3], de manera que se brinden mejores condiciones para el manejo del tráfico interno, mediante la aplicación de mecanismos que incluyen la posibilidad de enrutamiento a través de rutas paralelas, acortamiento de distancias entre nodos y el aumento de tolerancia ante fallos, entre otros. Por ejemplo VL2 [9] evita el tráfico broadcast ARP y DHCP mediante el uso de servidores de directorio para la resolución de direcciones. Con PortLand [16] se propone un mecanismo de enrutamiento en capa 2 empleando las propiedades de la topología. Bcube [10] soporta varias aplicaciones que requieran de ancho de banda intensivo mediante múltiples caminos paralelos cortos entre cada par de hosts.

Sin embargo previo a despliegues de infraestructura de *DC*, es importante validar dichos escenarios en un ambiente lo más real posible. En este contexto, recrear el comportamiento de los *DC*, mediante modelos de simulación/emulación [7], permite predecir algunos aspectos cruciales de la operatividad de la red. Debido a esto, se vuelve esencial validar dichos modelos con el fin de que exista coherencia entre los resultados que se obtienen de la simulación/emulación y los resultados que se obtendrían de un *DC* real. Una técnica que permite validar estos modelos se basa en la determinación de invariantes, la cual consiste en identificar ciertas propiedades de la red, que se deducen a partir de las variables y/o parámetros que la describen, y que se mantienen en las topologías de los *DC*, para diversos escenarios y/o configuraciones.

Un invariante, así por ejemplo, es la ruta más larga entre dos nodos, el número de enlaces óptimo o el mínimo número de enlaces que deben fallar antes de que un nodo pierda conectividad. Debido a esto, los invariantes se convierten en una muy buena referencia del funcionamiento real de un *DC*, para los ambientes de simulación/emulación.

Una metodología para la obtención de invariantes implica hacer una revisión analítica de la topología, considerando ambientes con y sin tráfico, con pocos y muchos hosts y dispositivos de red. Finalmente considerar la interacción con los protocolos utilizados en la red, por ejemplo para acceso al medio, enrutamiento y transporte. De esta revisión se obtienen los invariantes candidatos.

En la comunidad científica se han realizado algunos trabajos al respecto, así por ejemplo en [14] se proponen diez invariantes para servidores web de internet, los cuales permiten caracterizar el tráfico HTTP y facilitar el estudio de mejoras en el rendimiento del servidor. La problemática de realizar simulaciones en la red Internet se expone ampliamente en [20] formulando dentro de sus soluciones, la búsqueda de invariantes, y en la que se proponen siete alternativas: una de ellas relacionada a la topología. El tráfico generado por juegos de red en Internet es analizado en [1], determinando tres invariantes para el tiempo entre paquetes (IPT). Una metodología para el diseño de arquitecturas de red tomando en cuenta a los invariantes se propone en [4]; en este caso se los considera puntos fijos que limitan la evolución de las arquitecturas.

Por lo tanto, en el presente trabajo se propone identificar, formular y comprobar, dos invariantes de red para grandes centros de datos, considerando una de las topologías más utilizadas en el análisis del comportamiento del tráfico en *DC*, como lo es Fat-Tree. En particular esta topología será emulada utilizando software ampliamente aceptado en la comunidad científica, como lo es mininet [6], y mediante el uso de una herramienta de generación de tráfico, se modelará un escenario que permite recrear casos reales de tráfico en un *DC*. Esto permitirá comprobar el cumplimiento de los invariantes formulados, sobre un escenario emulado. El resto del documento está organizado como se explica a continuación. En la sección II se describirá el escenario de la topología sobre la cual se va a trabajar. En la sección III, dos invariantes serán propuestos de forma analítica. En la sección IV los invariantes serán comprobados experimentalmente, y comparados con los obtenidos analíticamente. Finalmente las conclusiones del artículo son presentadas.

## 2. MODELADO DEL SISTEMA

### 2.1 Descripción del escenario

El escenario bajo estudio considera un *DC* con topología Fat-Tree de Al-Fares [15], una instancia de la topología Clos [21]. Esto debido a que en los últimos años, se ha referenciado su uso en varias propuestas de la comunidad científica.

Fat-Tree está compuesta fundamentalmente por switches de iguales características y que se encuentran organizados jerárquicamente en  $n$  capas denominadas de núcleo, de agregación y de frontera. Adicionalmente entre estas dos últimas se forman agrupaciones entre switches denominados Pods ( $P$ ). Al interior de los  $P$ , los switches compuestos por  $k$  puertos, utilizan  $k/2$  puertos para hacer uplink y  $k/2$  puertos para hacer downlink. En la Fig. 1 se puede apreciar una topología Fat-Tree con  $n=3$ . La capa de núcleo está compuesta por un conjunto de  $k$  switches ( $CSW$ ) con  $k$  puertos activos que permiten el tráfico hacia y desde redes externas con el resto del *DC*, así como tráfico interno entre  $P$ . A partir de aquí los hosts ( $h$ ) se conectarán a los  $P_k$ , utilizando los  $k/2$  puertos disponibles de los switches de la capa de frontera ( $ESW$ ). El número máximo de hosts  $h_{MAX}$  es igual a  $K_3/4$ .

Debido a que este trabajo se centra en analizar sólo el tráfico interno de la topología, tres sentidos son posibles para los flujos del *DC*: entre hosts de un mismo switch, entre hosts de diferente switch pero que pertenecen a un mismo  $P$ , y entre hosts de diferente  $P$ . El tráfico es de tipo unicast, para todos los pares de hosts que son seleccionados de forma aleatoria, pero basados en una distribución de probabilidad uniforme, pues se asume la comunicación con servicios internos como bases de datos o repositorios de archivos. Por otro lado, los flujos del tráfico son UDP y la distribución de probabilidad de los tiempos entre transmisiones es exponencial; distribución que ha sido validada en la literatura para el caso de un *DC* [5]. En la Fig. 1 se puede apreciar el flujo  $f_{i,j}$  entre  $h_5$  y  $h_{(MAX-1)}$ .

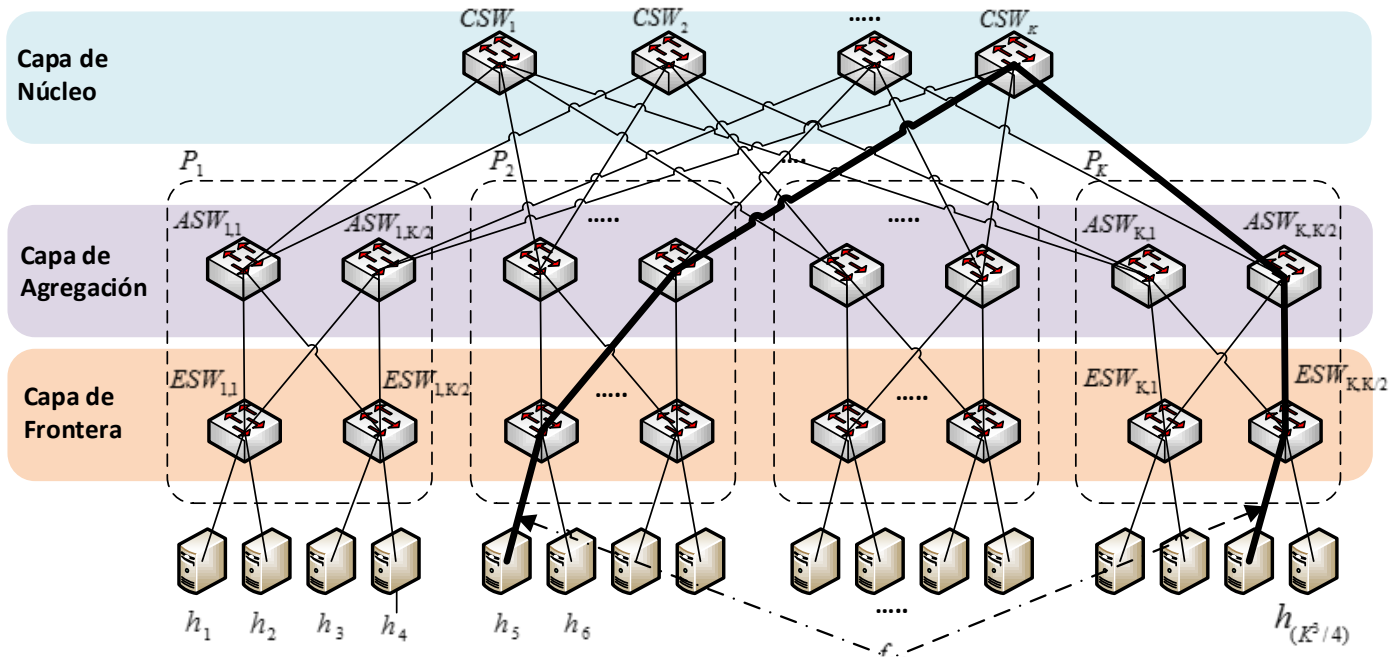


Figura 1. Topología Fat-Tree.

### 3. FORMULACIÓN DE LOS INVARIANTES

Para formular adecuadamente los invariantes primero es necesario conocer cómo funciona la topología y luego identificar características de la red que puedan ser debidamente cuantificadas y representadas en expresiones matemáticas, ya que en ambientes experimentales, los invariantes validarán la simulación/emulación. Los siguientes invariantes se proponen para un DC con Fat-Tree, sin embargo se fundamentan en conceptos que pueden ser aplicables a otras topologías. Estos invariantes se relacionan con algunos de los parámetros característicos de las topologías [12], y son los siguientes:

#### 3.1 Diámetro de la red

Un invariante conocido es la longitud máxima del camino más corto entre todo par de  $h$  de la red, o diámetro de la misma. La utilidad de este invariante radica en conocer el esfuerzo que tienen que hacer los paquetes de un flujo para viajar de extremo a extremo.

En una topología Fat-Tree, la mayor distancia se da cuando se comunican dos  $h$  que se encuentran en diferentes  $P$ , debido a que se necesita llegar hasta la capa más alta para dar paso al tráfico entre  $P$ . De la Fig. 1, para un  $f_{5,15}$ , el número de saltos requeridos en el tramo ascendente es igual a  $n-1$  (no se considera al enlace entre  $h_5$  y  $ESW_{2,1}$  como salto), mientras que el número de saltos requeridos en el tramo descendente es igual a  $n-1$ . Por lo tanto el tramo total para  $f_{5,15}$  necesitará de un número total de saltos igual a  $2n-1$ . Entonces  $D_{NET}$  queda definido de la siguiente forma:

$$D_{NET} = 2n - 1 \tag{1}$$

Por otro lado, este invariante no considera que ante un mayor flujo de información, la probabilidad de saturación de los enlaces también aumentará, obligando al mecanismo gestor de la red, seleccionar rutas alternas que faciliten la libre circulación de los datos. Muchas veces el tomar estas rutas alternas, implica enviar los paquetes por un tramo más largo de extremo a extremo, por lo que el número de saltos para un  $f_{i,j}$  también aumenta. En la Fig. 2 se puede apreciar un caso extremo para  $f_{5,15}$  en donde todos los posibles caminos redundantes se han saturado, dejando como única alternativa para el encaminamiento de los paquetes, a la señalada en la Fig. 2.

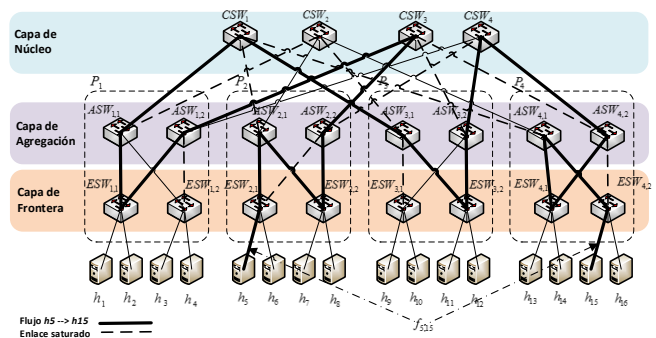


Figura 2. Topología Fat-Tree con enlaces saturados.

Es en este caso que se puede determinar un  $D'_{NET}$  que sí considere la saturación de los enlaces. En la Fig. 3 se muestra otra perspectiva de la red, con los ascensos y descensos entre capas que realiza  $f_{5,15}$  en su recorrido de extremo a extremo. Los tramos ascendentes o descendentes que atraviesan una capa, tienen un número de saltos igual a  $n-2$ , mientras que los

tramos ascendentes o descendentes que atraviesan dos capas, tienen un número de saltos igual a  $n-1$ . A esto hay que adicionar un salto correspondiente a la llegada al  $h_{15}$ .

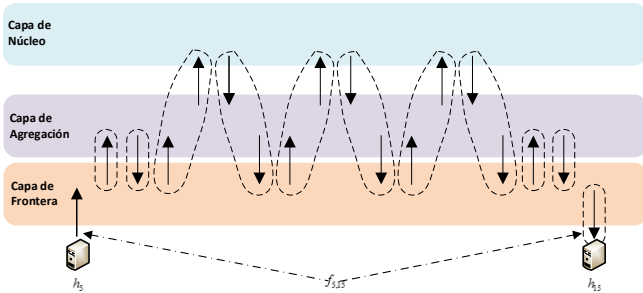


Figura 3. Resumen de saltos entre capas para  $f_{5,15}$ .

Por lo tanto el invariante  $D'_{NET}$  se define de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} D'_{NET} &= 2(n-2) + 6(n-1) + 2(n-2) + 1 \\ D'_{NET} &= 10n - 13 \end{aligned} \quad (2)$$

### 3.2 Longitud de ruta promedio

Otro invariante de utilidad es la longitud de ruta promedio  $L_{AV}$ , el cual permite dimensionar el esfuerzo promedio que realizan todos los paquetes durante el desarrollo normal del tráfico de red.

Si se consideran todos los caminos más cortos entre cada uno de los hosts, y se los promedia sobre el número total de caminos, se obtiene la longitud de la ruta promedio  $L_{AV}$  de la topología, y cuya expresión matemática se define de la siguiente manera:

$$L_{AV} = \frac{\sum_{h_i=1}^{h_{MAX}-1} \left[ \sum_{h_j=h_i+1}^{h_{MAX}} L(h_i, h_j) \right]}{\sum_{n=1}^{n-1} n} \quad (3)$$

Donde  $L(h_i, h_j)$ , es la longitud mínima o número de saltos mínimo entre dos hosts  $h_i$  y  $h_j$ . En esta expresión se garantiza que no existan pares de  $h$  repetidos. Para el Fat-Tree de la Fig. 1 con  $k=4$ , el número de saltos mínimo solo puede tomar tres valores: 0 cuando los hosts pertenecen a un mismo switch, 3 cuando los hosts pertenecen a diferentes switches de un mismo  $P$ , y 5 cuando los hosts pertenecen a diferentes  $P$ .

## 4. COMPROBACIÓN DE LOS INVARIANTES

En esta sección se describe la forma en como el escenario fue emulado, y luego como se contrastan los resultados experimentales con los analíticos.

### 4.1 Configuración de la emulación

Para recrear el escenario propuesto se utilizaron varias herramientas; así para emular la topología Fat-Tree se escogió al software mininet [6], pues con la llegada de las redes definidas por software (SDN), es uno de los programas comúnmente utilizados para emular topologías de DC en los últimos años [17]. Para gestionar el enrutamiento, se utiliza el controlador SDN OpenDaylight [18] por la facilidad que brinda en la creación y selección de caminos redundantes por sobre otros controladores. El generador de tráfico D-ITG [2], permitió emular los múltiples flujos de información característica de un DC y mediante el analizador de paquetes Wireshark [22] se capturó el tráfico para la recopilación de resultados. Cada uno de los enlaces fueron ajustados a 5 Mbps y los flujos con paquetes de tamaño constante e igual a 512 Bytes; esto con el fin de que la saturación de los enlaces llegue a ser posible en algún instante.

Para la determinación del DNET experimental, se procedió a generar un flujo con un mayor tamaño de paquete, para facilitar la identificación entre los demás flujos del DC. Para obtener el  $L_{AV}$  se generaron flujos entre cada uno de los pares de  $h$  hasta completar un número de muestras representativo.

### 4.2 Análisis de resultados

Luego de que estos invariantes fueron calculados de forma experimental, se obtuvieron los resultados abajo descritos.

#### Diámetro de la red

Para calcular  $D_{NET}$  experimental, se tomaron 100 pares de host al azar y de acuerdo a la traza generada por el  $f_{i,j}$ , se obtuvieron como máximo número de saltos, los valores de 0, 3 y 5. En la Fig. 4 y en la Fig. 5 se puede apreciar la traza generada por los 10 primeros valores y la estadística del número máximo de saltos para todas las muestras, respectivamente.

C	TRAZA	D
A		N
S		E
O		T
1	$h_1 \rightarrow ESW_{1,1} \rightarrow ASW_{1,2} \rightarrow CSW_3 \rightarrow ASW_{2,2} \rightarrow ESW_{2,1} \rightarrow h_5$	5
2	$h_2 \rightarrow ESW_{1,1} \rightarrow ASW_{1,2} \rightarrow CSW_3 \rightarrow ASW_{3,2} \rightarrow ESW_{3,1} \rightarrow h_{10}$	5
3	$h_4 \rightarrow ESW_{1,2} \rightarrow ASW_{1,1} \rightarrow CSW_2 \rightarrow ASW_{4,1} \rightarrow ESW_{4,1} \rightarrow h_{13}$	5
4	$h_8 \rightarrow ESW_{2,2} \rightarrow ASW_{2,1} \rightarrow CSW_2 \rightarrow ASW_{4,1} \rightarrow ESW_{4,2} \rightarrow h_{15}$	5
5	$h_2 \rightarrow ESW_{1,1} \rightarrow ASW_{1,1} \rightarrow ESW_{1,2} \rightarrow h_4$	3
6	$h_{11} \rightarrow ESW_{3,2} \rightarrow ASW_{3,1} \rightarrow CSW_4 \rightarrow ASW_{4,1} \rightarrow ESW_{4,1} \rightarrow h_{14}$	5
7	$h_{16} \rightarrow ESW_{4,2} \rightarrow ASW_{4,1} \rightarrow CSW_2 \rightarrow ASW_{2,1} \rightarrow ESW_{2,2} \rightarrow h_7$	5
8	$h_5 \rightarrow ESW_{2,1} \rightarrow ASW_{2,1} \rightarrow CSW_1 \rightarrow ASW_{3,1} \rightarrow ESW_{3,1} \rightarrow h_9$	5
9	$h_{10} \rightarrow ESW_{3,1} \rightarrow ASW_{3,1} \rightarrow ESW_{3,2} \rightarrow h_{11}$	3
10	$h_{13} \rightarrow ESW_{4,1} \rightarrow ASW_{4,1} \rightarrow ESW_{4,2} \rightarrow h_{16}$	3

Figura 4. Trazas parciales para  $D_{NET}$ .

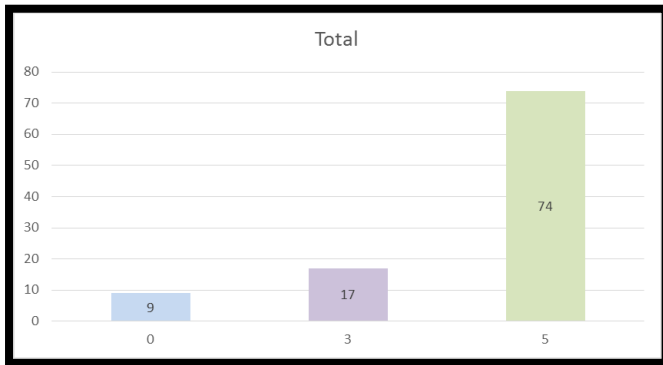


Figura 5. Estadística del máximo número de saltos.

Siendo 5 el valor más alto dentro del número de saltos generados en la topología, el  $D_{NET}$  experimental es igual a 5.

Por otro lado para el cálculo del  $D_{NET}$  analítico, si se considera la ecuación (1) en la topología emulada con  $n=3$ , el valor para  $D_{NET}$  es igual a:

$$D_{NET} = 2(3) - 1 = 5 \tag{4}$$

Con lo cual el invariante  $D_{NET}$  queda comprobado. Cabe indicar que a pesar de que se ha manejado un gran volumen de tráfico, este no ha sido suficiente para saturar los enlaces y llegar a valores mayores y cercanos a un  $D'_{NET}$  experimental.

*Longitud de ruta promedio*

El cálculo del  $L_{AV}$  experimental se realizó sobre las 100 muestras anteriormente tomadas. La suma total del número de saltos que utilizaron todos los pares de hosts es igual a 421, cantidad que al dividirla para el número total de muestras (100), resulta en un  $L_{AV}$  experimental de 4,21. La interpretación de esto es que en promedio se requieren de 4 saltos para llegar a comunicar un par de hosts cualquiera de la topología.

En cambio, para determinar el  $L_{AV}$  analítico en la topología emulada, la ecuación (3) indica que primero se deben sumar el número de saltos de cada uno de los pares de hosts (no repetidos) que componen la topología. Esta suma es igual a 528 y se puede apreciar en la Fig. 6.

HOSTS	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10	H11	H12	H13	H14	H15	H16	Σ
H1	0	3	3	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	66
H2		3	3	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	66
H3			0	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	60
H4				5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	60
H5					0	3	3	5	5	5	5	5	5	5	5	5	46
H6						3	3	5	5	5	5	5	5	5	5	5	46
H7							0	5	5	5	5	5	5	5	5	5	40
H8								5	5	5	5	5	5	5	5	5	40
H9									0	3	3	5	5	5	5	5	26
H10										3	3	5	5	5	5	5	26
H11											0	5	5	5	5	5	20
H12												5	5	5	5	5	20
H13													0	3	3	6	6
H14														3	3	6	6
H15															0	0	0
H16																0	0
																	528

Figura 6. Número de saltos por cada par de hosts.

Luego este resultado debe ser dividido para el número total de pares considerados en este cálculo, el cual es igual a 120. Por lo tanto el valor analítico para  $L_{AV}$  es igual a:

$$L_{AV} = 528 / 120 = 4.4 \tag{5}$$

Lo que implica, al igual que en el valor experimental, de que en promedio también se requiere de 4 saltos para que un par de hosts cualquiera se comuniquen.

5. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha propuesto el uso de invariantes como método de verificación de modelos concebidos en ambientes simulación/emulación, pues al ser los invariantes una expresión de una red real, permiten establecer la fidelidad del modelo desarrollado para topologías de DC. Se han propuesto dos invariantes, los cuales han sido demostrados analíticamente, y luego comparados mediante un emulador en condiciones de red similares al de un DC real, dando como resultado respuestas con un buen grado de aproximación.

Este trabajo se ha limitado a utilizar como escenario de un DC, la topología Fat-Tree, sin embargo se puede realizar las mismas verificaciones sobre otras topologías igualmente relevantes, como Bcube, VL2, Dcell, Portland, entre otras. Así mismo se pueden manejar otras distribuciones de probabilidad para la generación del tráfico, así como el uso de tráfico multicast o broadcast, propio de determinados servicios de red.

Es importante como un requisito previo para la determinación de invariantes, el conocimiento profundo de la topología a estudiar, pues de lo contrario los invariantes podrían deducirse incorrectamente.

REFERENCIAS

[1] Alberto Dainotti, Alessio Botta, Antonio Pescapé, and Giorgio Ventre. 2006. Searching for invariants in network games traffic. In Proceedings

- of the 2006 ACM CoNEXT conference (CoNEXT '06). ACM, New York, NY, USA., Article 43 , 2 pages, 1989.
- [2] Avallone, S., Guadagno, S., Emma, D., Pescapè, A., & Ventre, G. (2004, September). D-ITG distributed internet traffic generator. In Quantitative Evaluation of Systems, 2004. QEST 2004. Proceedings. First International Conference on the (pp. 316-317). IEEE.
- [3] Bari, M.F.; Boutaba, R.; Esteves, R.; Granville, L.Z.; Podlesny, M.; Rabbani, M.G.; Qi Zhang; Zhani, M.F., "Data Center Network Virtualization: A Survey," Communications Surveys & Tutorials, IEEE , vol.15, no.2, pp.909,928, Second Quarter 2013
- [4] Bengt Ahlgren, Marcus Brunner, Lars Eggert, Robert Hancock, and Stefan Schmid. 2004. Invariants: a new design methodology for network architectures. In Proceedings of the ACM SIGCOMM workshop on Future directions in network architecture (FDNA '04). ACM, New York, NY, USA, 65-70.
- [5] Benson, T., Akella, A., & Maltz, D. A. (2010, November). Network traffic characteristics of data centers in the wild. In Proceedings of the 10th ACM SIGCOMM conference on Internet measurement (pp. 267-280). ACM.
- [6] Bob Lantz, Brandon Heller, and Nick McKeown. 2010. A network in a laptop: rapid prototyping for software-defined networks. In Proceedings of the 9th ACM SIGCOMM Workshop on Hot Topics in Networks (Hotnets-IX). ACM, New York, NY, USA, , Article 19 , 6 pages.
- [7] Breslau, L., Estrin, D., Fall, K., Floyd, S., Heidemann, J., Helmy, A., ... & Yu, H. (2000). Advances in network simulation. *Computer*, 33(5), 59-67.
- [8] Chen, Z., Peng, L., Zhao, S., Zhang, L., & Jing, S. (2014). Feature Selection Toward Optimizing Internet Traffic Behavior Identification. In *Algorithms and Architectures for Parallel Processing* (pp. 631-644). Springer International Publishing.
- [9] Greenberg, A., Hamilton, J. R., Jain, N., Kandula, S., Kim, C., Lahiri, P., ... & Sengupta, S. (2009, August). VL2: a scalable and flexible data center network. In ACM SIGCOMM Computer Communication Review (Vol. 39, No. 4, pp. 51-62). ACM.
- [10] Guo, C., Lu, G., Li, D., Wu, H., Zhang, X., Shi, Y., ... & Lu, S. (2009). BCube: a high performance, server-centric network architecture for modular data centers. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 39(4), 63-74.
- [11] Kurup, P. M., & Preethi, J. (2014). Packet Reordering To Improve Data Center Network Using Near Optimal Traffic Engineering.
- [12] Lee, David S., and Jeffrey L. Kalb. "Network Topology Analysis."
- [13] Luan, G. (2014). Buffer Stopping Time Analysis in Data Center Networks.
- [14] Martin F. Arlitt and Carey L. Williamson. 1996. Web server workload characterization: the search for invariants. In Proceedings of the 1996 ACM SIGMETRICS international conference on Measurement and modeling of computer systems (SIGMETRICS '96), Blaine D. Gaither (Ed.). ACM, New York, NY, USA, 126-137
- [15] Mohammad Al-Fares, Alexander Loukissas, and Amin Vahdat. 2008. A scalable, commodity data center network architecture. In Proceedings of the ACM SIGCOMM 2008 conference on Data communication (SIGCOMM '08). ACM, New York, NY, USA, 63-74.
- [16] Niranjan Mysore, R., Pamboris, A., Farrington, N., Huang, N., Miri, P., Radhakrishnan, S., ... & Vahdat, A. (2009, August). Portland: a scalable fault-tolerant layer 2 data center network fabric. In *ACM SIGCOMM Computer Communication Review* (Vol. 39, No. 4, pp. 39-50). ACM.
- [17] Nunes, B., Mendonca, M., Nguyen, X., Obraczka, K., & Turetli, T. (2014). A survey of software-defined networking: Past, present, and future of programmable networks.
- [18] Orebaugh, A., Ramirez, G., & Beale, J. (2006). Wireshark & Ethereal network protocol analyzer toolkit. Syngress.
- [19] Park, H. W., Yeo, I. Y., Lee, J. R., & Jang, H. (2014). Study on network architecture of big data center for the efficient control of huge data traffic. *Computer Science and Information Systems*, (00), 67-67.
- [20] Sally Floyd and Vern Paxson. 2001. Difficulties in simulating the internet. *IEEE/ACM Trans. Netw.* 9, 4 (August 2001), 392-403.
- [21] W. Dally and B. Towles, Principles and Practices of Interconnection Networks. Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2004.
- [22] WRIGHT, C., MESTERY, K., SHAIKH, A., & BAUCKE, S. OpenDaylight: An Open Source SDN for Your OpenStack Cloud. OpenStack Summit Presentations.

# Impacto de las Redes de Comunicaciones en los Sistemas Robóticos de Control

Paillacho D.\*; Novillo F.\*\*; Agila W.\*\*; Huilcapi V.\*\*\*

<sup>1</sup>Universitat Politècnica de Catalunya, Institute of Industrial and Control Engineering, Barcelona, España

dennys.paillacho@upc.edu

<sup>2</sup>Escuela Superior Politécnica del Litoral, CIDIS-Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación, Guayaquil, Ecuador

{fnovillo, wagila}@espol.edu.ec

<sup>3</sup>Universidad Politécnica Salesiana, GISTEL-Facultad de Ingenierías, Guayaquil, Ecuador

vhuilcapi@ups.edu.ec

**Resumen:** El análisis de incidencia que tienen las redes de comunicaciones sobre el comportamiento de los sistemas robóticos de control en red muestra grandes dificultades cuando se quieren hacer evaluaciones de tipo analítico. Por tal razón, en este trabajo un análisis que utiliza una aproximación basada en simulación es propuesto, de manera que el comportamiento temporal y espacial de un sistema robótico de control en red pueda ser evaluado. Para tal efecto, se propone un entorno de validación mediante el cual una red de comunicaciones permita distribuir mensajes de control entre el controlador principal y los controladores remotos ubicados en cada articulación angular del robot manipulador planar. Las interacciones entre los componentes del sistema han sido modeladas mediante un sistema de capas. Dicho modelo es llevado a un entorno de simulación con la finalidad de analizar el impacto de distintos parámetros de comunicaciones (i.e. tipo de red, tasa de datos y tamaño de datos) sobre el ciclo de comunicación y el error de seguimiento de trayectoria en un sistema robótico.

**Palabras clave:** Ethernet, CAN, Switched Ethernet, Sistemas de control en red, Ciclo de comunicación, Control de ajuste de trayectoria.

**Abstract:** The analysis of the incidence that the communications have in the behavior of the network controlled robotic systems shows big difficulties when you want to make analytic evaluations. for that reason, an analysis that uses an approaching based on simulation is proposed, so that the temporal and special behavior of a network controlled robotic system could be evaluated. for this purpose, it is proposed a validation environment whereby a communication network allows the distribution of control messages between the main controller and the remote controlled placed in each joint of the planar robot manipulator. The interactions between the components of the system have been modeled by means of a layer based system. This model is taken to a simulation environment in order to analyze the impact of the different parameters of the communications (i.e. network type, data rate and data size) in the communication cycle and the trajectory tracking error in a robotic system.

**Keywords:** Ethernet, CAN, Switched Ethernet, Networked Control Systems, Communication cycle, Control adjustment path.

## 1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, la evolución que han tenido las redes de comunicaciones ha permitido que los sistemas robóticos de control en red (NCRS) sean más robustos con un desempeño eficaz, lo que ha motivado que aplicaciones como la telecirugía, agricultura de precisión, entre otras, hayan tenido un gran repunte en los últimos años. Dentro de la arquitectura de un NCRS, la red de comunicación constituye la piedra angular, alrededor de la cual se comunican coordinadamente a través del intercambio de mensajes controladores, actuadores y sensores cuyas operaciones están distribuidas en diferentes ubicaciones geográficas.

En este contexto, uno de los aspectos principales a tener en cuenta en los NCRS son los tiempos de retardo, ya que pueden degradar su rendimiento e inclusive causar su inestabilidad en el desempeño del mismo.

El estudio del rendimiento de los NCRS, tradicionalmente se ha realizado de manera aislada [9], tanto el diseño del sistema controlador como la planificación del CPU y la red de

comunicación fueron analizadas independientemente, esta separación ha permitido a la comunidad de control enfocarse en su propio dominio del problema sin preocuparse sobre cómo la planificación es realizada, y también ha liberado a la comunidad de planificación de la necesidad de entender el impacto que esta tiene en la estabilidad y rendimiento de la planta bajo control. Sin embargo, cuando los dos campos convergen en un NCRS algunas hipótesis no son verdaderas [5], generando un impacto en la medida del rendimiento del NCRS resultante.

En aplicaciones de control en red que requieren un alto grado de precisión y flexibilidad, especialmente cuando los recursos computacionales (e.g. el tiempo del CPU y el ancho de banda de la red) son limitados, se hace preciso una interacción más estrecha entre ambos enfoques. Dada esta estrecha relación entre el Control y la Red de comunicación en un NCRS, es importante considerar ambos parámetros simultáneamente. El análisis y modelamiento del impacto de la planificación y comunicación en el rendimiento del NCRS ha sido a menudo



muy complejo, sino imposibles de estudiarlos analíticamente [2].

En este contexto, en [7] se propone rutinas en la simulación de sistemas distribuidos de control en red para tiempo real a través de un núcleo y bloques de red basados en comunicaciones con retraso a través del protocolo TCP/IP y su influencia en los bucles de control en red. Una red de agentes que pueden recopilar información acerca de la evolución de un proceso discreto y aplicar las acciones de control a través de la red de comunicación para mejorar su comportamiento es presentado en [3]

El presente trabajo utiliza una aproximación basada en simulación por capas para analizar el impacto que tienen las redes de comunicaciones sobre la calidad en el seguimiento de la trayectoria de un sistema robótico.

Para el desarrollo de este estudio se ha utilizado un brazo robótico planar, analizando su precisión en el seguimiento de trayectorias de referencia frente a diferentes redes de comunicación (e.g. Ethernet, Switch Ethernet, CAN).

El resto del trabajo está organizado como se describe a continuación. En la Sección 2, una breve descripción del escenario de los Sistemas de Control en Red y sus componentes es presentada. La descripción del mecanismo de simulación es analizada en la sección 3. Los parámetros de simulación y los resultados obtenidos de las simulaciones son presentados en la sección 4. Finalmente, las conclusiones relevantes se presentan en la sección 5.

## 2. MODELO DEL SISTEMA DE CONTROL ROBÓTICO EN RED

### 2.1 Descripción del escenario

Para el análisis del SRCR se utiliza el sistema propuesto en la Fig.1, el cual está compuesto por un controlador principal (CP), la red de comunicación (i.e. Ethernet, Switch Ethernet, CAN), y los controladores remotos (CR's). La planta sobre la cual se verificará el impacto que tienen las redes de comunicaciones sobre la robustez del SRCR está constituida por un brazo robótico planar, con  $n$  articulaciones cuyo desplazamiento será en el plano X-Y.

El sistema empieza a operar cuando el CP envía las señales de referencia (i.e. posición  $\mathbf{P}$ ; velocidad  $\mathbf{V}$  y aceleración  $\mathbf{A}$ ) a cada uno de los CR's a través de la red de comunicación. En la presente investigación se analizará el desempeño de las redes Ethernet, Switch Ethernet, y CAN sobre la precisión en el seguimiento de trayectorias del brazo manipulador anteriormente mencionado, así una vez que cada CR reciba las consignas, estos interactúan con las redes de sensores y actuadores que disponen para manejar a cada eslabón de la cadena cinemática, así también cada CR es responsable de enviar un mensaje de su estado al CP, y cuando el CP haya recibido todos los mensajes de estado de los  $n$  CR's estarán listo para enviar un nuevo grupo de consignas, iniciando de nuevo un ciclo de comunicación del SRCR.

### 2.2 Modelo de control de un eslabón

Para verificar la calidad del seguimiento de las referencias, el CP dispone de un generador de trayectorias, el cual define un conjunto de señales de posición, velocidad y aceleración,

representadas en el espacio articular por:  $q_d(t)$ ,  $\dot{q}_d(t)$ ,  $\ddot{q}_d(t)$  respectivamente. Estas consignas son definidas a continuación:

$$q_d(t) = b(1 - e^{-2t^3}) + c(1 - e^{-2t^3}) \sin(\omega t) \quad (1)$$

$$\dot{q}_d(t) = 6bt^2 e^{-2t^3} + 6ct^2 e^{-2t^3} \sin(\omega t) + (c - ce^{-2t^3}) \cos(\omega t) \omega \quad (2)$$

$$\ddot{q}_d(t) = 12bte^{-2t^3} - 36bt^4 e^{-2t^3} + 12cte^{-2t^3} \sin(\omega t) - 36ct^4 e^{-2t^3} \sin(\omega t) + 12ct^2 e^{-2t^3} \cos(\omega t) \omega - (c - ce^{-2t^3}) \sin(\omega t) \omega^2 \quad (3)$$

Donde  $b$ ,  $c$ , y  $\omega$  son constantes de la trayectoria de referencia (consigna) fijadas para el entorno de simulación.

Para describir las trayectorias deseadas establecidas en (1), (2), (3), la salida de cada actuador se asocia con cada uno de los eslabones del brazo manipulador (i.e.  $J1, J2 \dots Jn$ ), para que el efector final ejecute las consignas enviadas.

La calidad del control del manipulador robótico planar para el seguimiento de la trayectoria deseada se analiza usando el índice de medición del error denominado "Integral Absolute Error" (IAE) [6].

$$IAE = \int_{t_0}^{t_f} |y_{des}(t) - y_{act}(t)| dt \quad (4)$$

Donde  $y_{des}(t)$  es la salida deseada del sistema, y  $y_{act}(t)$  es la salida obtenida del sistema,  $t_0$  y  $t_f$  representan los tiempos iniciales y finales respectivamente en donde se analizan los datos.

## 3. DESCRIPCIÓN DEL MECANISMO DE SIMULACIÓN

### 3.1 Formulación del problema

En el SRCR mostrado en la Fig.1, la red de comunicación representa el aspecto principal a evaluar para el óptimo desempeño del sistema robótico planar propuesto, ya que es el medio que permite la comunicación entre los diferentes dispositivos.

La disponibilidad de la red, se debe a varios factores, entre ellos: tasas de muestreo en las cuales los diferentes dispositivos envían información, el número de nodos que intervienen en la red, el método de sincronización entre los dispositivos, tamaño de los mensajes, factores físicos de la red, y el tipo de Control de Acceso al Medio (MAC) que controla la transmisión de la información [8]. Para evaluar el rendimiento del robot planar se analizará en detalle los tiempos de los ciclos de comunicación para los tres tipos de redes propuestas (i.e. Ethernet, Switch Ethernet, CAN) y el error en el seguimiento de trayectorias en el robot planar.

Para simplificar el análisis, todo el sistema es visto en su conjunto como un modelo de tres capas (i.e. modelo de cebolla) [1]. A continuación se describen las funciones de cada una:

**Capa 0:** El CP envía las señales de referencia de las trayectorias deseadas a todos los CR's a través de la red de

comunicación, también es encargado de gestionar la recepción de los mensajes de estado de cada controlador remoto. Las tareas asignadas al CP son: Tarea<sub>00</sub>: toma lectura de las señales de referencia deseadas del CP. Tarea<sub>01</sub>: encapsula las trayectorias de referencia en paquetes y las envía a través de la red de comunicación. Tarea<sub>02</sub>: gestiona la llegada de los mensajes de estado de los  $n$  CR's. cuando todos los mensajes hayan sido recibidos, el CP está listo para iniciar nuevamente la Tarea<sub>00</sub>. Las tareas son disparadas por eventos y el tiempo de liberación dependerá del algoritmo de planificación del CPU utilizado. El tiempo total de ejecución de la capa 0 dependerá en parte del número de controladores remotos del sistema.

**Capa 1:** La Red mapea las señales de referencia desde el CP hacia los CR's y los mensajes de estado entre los CR's y el CP. Las tareas asignadas a esta capa son: Tarea<sub>10</sub>: mapea las señales de referencia desde el Controlador Principal a cada Controlador Remoto. Tarea<sub>11</sub>: mapea los mensajes de estado desde los controladores remotos al CP. El tiempo de mapeo en esta capa depende de varios factores como la topología de la red, ancho de banda, número de nodos, etc.

**Capa 2:** Cada CR realiza el interfaz con la red de comunicación para recibir las señales de referencia enviadas por el CP, así también envían los mensajes del estado de cada

uno, también ejecuta el lazo de control de movimiento del actuador, las tareas asignadas a esta capa son: Tarea<sub>20</sub>: extrae las señales de referencia deseadas de la trama recibida en la red de comunicación. Tarea<sub>21</sub>: realiza el lazo de control. Si la diferencia entre la trayectoria deseada y la ejecutada por el manipulador robótico es menor a cierto porcentaje de error, el CR dispara la Tarea<sub>22</sub>. La Tarea<sub>22</sub>: encapsula el mensaje de estado del controlador remoto en paquetes y los envía por la red

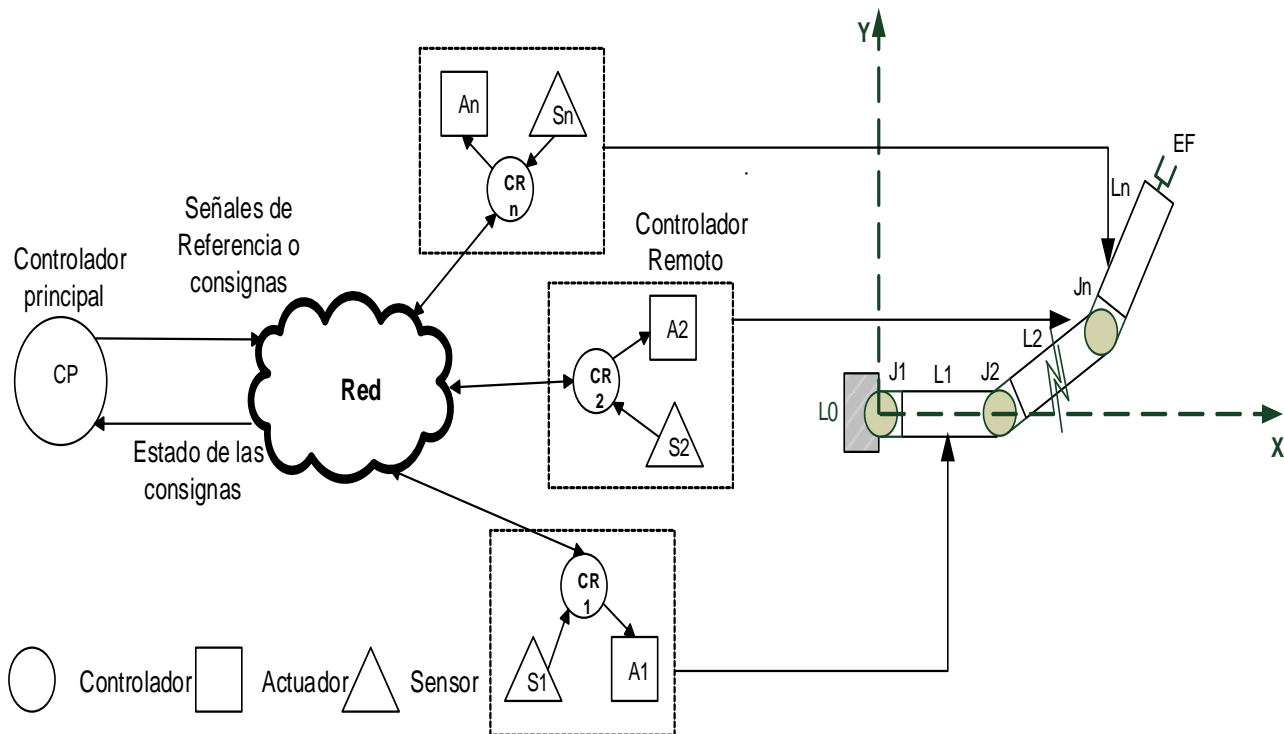


Figura 1. Estructura general del Sistema de control en Red.

### 3.2 Ciclo de comunicación

Los tiempos de retardo que ocurren en un sistema de control en red afectan su rendimiento e incluso pueden causar inestabilidades del mismo, es por esta razón que la presente investigación prioriza este análisis.

El ciclo de comunicación corresponde al tiempo comprendido entre el envío por parte del controlador principal del primer conjunto de trayectorias de referencias y del último mensaje de estado recibido del controlador remoto [4]. Para calcular el tiempo de retardo de transmisión de un mensaje ( $T_{delay}$ ) este es dividido en dos partes: el tiempo del dispositivo ( $T_{disp}$ ) y el tiempo de la red ( $T_{net}$ ), y se calcula de acuerdo a la siguiente expresión:

$$T_{delay} = T_{disp} + T_{net} \quad (5)$$

Donde:

$$T_{disp} = T_{pre} + T_{hold} + T_{pos} \quad (6)$$

Por lo cual:

$$T_{delay} = T_{pre} + T_{hold} + T_{net} + T_{pos} \quad (7)$$

Dónde:  $T_{pre}$  y  $T_{hold}$  son los retardos de pre procesamiento y espera en el dispositivo fuente respectivamente, y  $T_{pos}$  es el retardo de pos procesamiento en el dispositivo de destino. A continuación se detalla en un gráfico la ecuación (7).

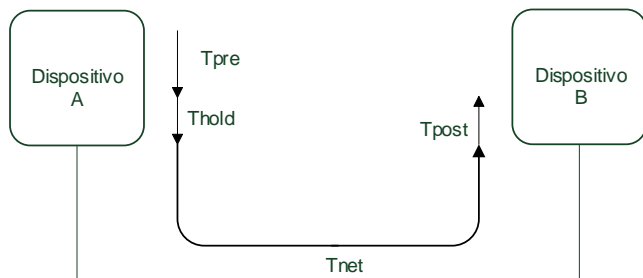


Figura 2. Tiempos de retardo de un sistema de control en Red.

En base a la ecuación (8) los tiempos de retardo en todo el sistema pueden ser agrupados en: el tiempo de retardo desde el CP al CR y viceversa, como se expresa a continuación:

$$T_{CP \rightarrow CR} = T_{CPpre} + T_{CPhold} + T_{CP \rightarrow CRnet} + T_{CPpos} \quad (8)$$

$$T_{CR \rightarrow CP} = T_{CRpre} + T_{CRhold} + T_{CR \rightarrow CPnet} + T_{CRpos} \quad (9)$$

donde  $T_{CPpre}$  es el tiempo de retardo del controlador principal al controlador remoto,  $T_{CPhold}$  es el tiempo de pre procesamiento en el controlador principal,  $T_{CP \rightarrow CRnet}$  es el tiempo de la red cuando el CP envía información al CR,  $T_{CPpos}$  es el tiempo de pos procesamiento del CP, una vez haya llegado la información al CR.

El diagrama de los tiempos de retardos y su relación con las tareas asignadas a las distintas capas del modelo del SRCR es presentado en la Fig.3. De esta figura se puede observar que

los círculos indican el tiempo de entrada a una tarea, mientras que una cruz indica el tiempo de salida de una tarea, de tal manera que el ciclo de comunicación ( $T_{CC}$ ) correspondiente al tiempo comprendido entre el envío de la primera consigna por parte del CP y del último mensaje respondido por el CR se calcula de la siguiente manera:

$$T_{CC} = T_{CP \rightarrow CR} + T_{CR \rightarrow CP} \quad (10)$$

Se debe observar que la única tarea periódica es  $t_{21}$  en la capa2 del CR, y tiene un periodo  $h_{21}$ . Debido a que la mayoría de las tareas en el sistema son manejadas por eventos, la variabilidad de los tiempos de retardo en algunas de ellas (e.g. en el tiempo de espera del controlador remoto) hace que varíe también su ciclo de comunicación. En el presente estudio se analizó la variabilidad del ciclo de comunicación cuando se aplican diferentes tipos de configuraciones al modelo (e.g. tipo de red, tamaño de datos, número de controladores remotos, tasa de datos)

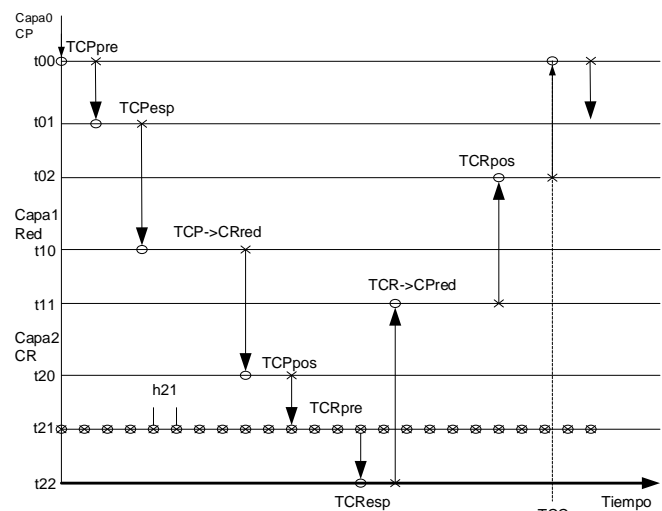


Figura 3. Diagramas de tiempo de un ciclo de comunicación del modelo.

## 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados obtenidos luego de múltiples simulaciones del escenario propuesto, en particular se realiza el análisis del ciclo de comunicación y el IAE para redes Ethernet (E), Switch Ethernet (SE) y CAN (C).

### 4.1 Parámetros de simulación

Los parámetros de simulación del tipo de red de comunicación usado en el SRCR, tamaño y tasa de datos a transmitir, y las restricciones consideradas en el proceso de simulación, se presentan en la Tabla 1.

Para evaluar el impacto de las redes de comunicación en la precisión del elemento final del brazo robótico y el rendimiento del SRCR siguiendo movimientos periódicos sin llevar a saturar los actuadores, se utilizaron trayectorias de referencia definidas por las ecuaciones (1), (2), (3), con los siguientes valores para sus constantes:

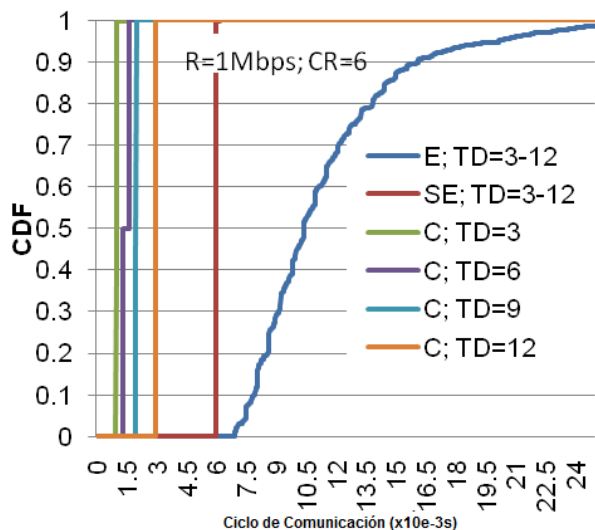
$$b = \pi / 4 \text{ (rad)}; c = \pi / 9 \text{ (rad)}; y, w = 10 \text{ (rad/s)}$$

**Tabla 1.** Parámetros de configuración

Parámetros de Configuración	
<b>RED de Comunicación</b>	
Tipo de red	Ethernet (E), Switched Ethernet (SE) y CAN (C).
Tasa de datos (R)	1, 5, 10 Mbps.
Tamaño de datos (TD)	3, 6, 9, 12 bytes.
Número de controladores remotos (CR)	2, 6, 10.
<b>Restricciones:</b>	
a) No se consideran pérdidas de paquetes en la red, tiempos de propagación por la red e interferencias dentro de la red	b) El número y tamaño de mensajes que envía el CP a un determinado CR a través de la red es el mismo en sentido contrario

#### 4.2 Impacto en el ciclo de comunicación

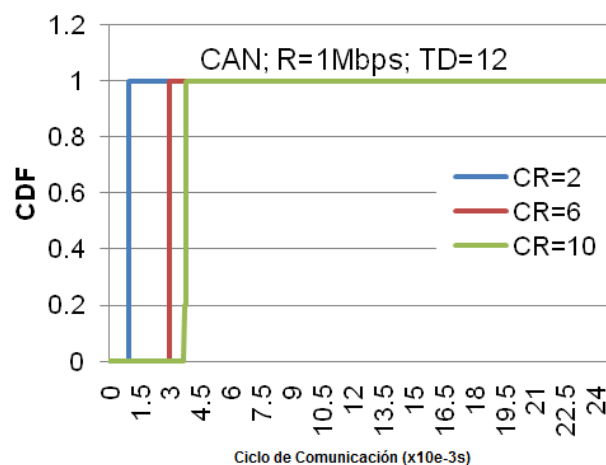
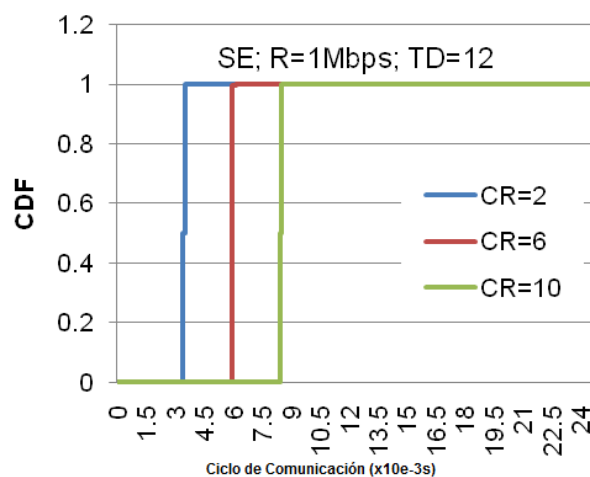
La función de densidad acumulada (CDF) del ciclo de comunicación para diferentes tamaños de datos (TD) sometidos a diferentes tipos de redes es mostrada en la Fig.4. De esta figura se observa que los tamaños de los datos propuestos afectan el  $T_{CC}$  en una red CAN (C), ya que su estándar no considera un mínimo tamaño de paquete de datos. El tamaño de la trama en una red CAN varía en relación al TD, variando con ello el tiempo de transmisión por la red y alterando de esta manera al ciclo de comunicación.


**Figura 4.** Ciclos de comunicación con diferentes TD.

Por el contrario, para las redes Ethernet (E) y Switched Ethernet (SE) los ciclos de comunicación no presentan variaciones para los diferentes valores de TD propuestos. Esto se debe a que dichos valores son menores que el mínimo tamaño de paquete de datos (46 bytes) establecido por el estándar Ethernet. De la misma figura, se determina que los  $T_{CC}$  de una red Ethernet son mayores que los de una Switched Ethernet, debido a que el control de acceso al medio en la Ethernet permite colisiones en la red. La lenta respuesta que presenta la dispersión acumulada en Ethernet, se debe a la

aleatoriedad en la ventana de contención cuando ocurren estas colisiones. En CAN, este hecho no se presenta y por tanto tiene una rápida respuesta en los ciclos de comunicación, esto se debe al mecanismo de control de acceso al medio por prioridad de los mensajes con el que trabaja este estándar de comunicación, evitando de esta manera colisiones y mejorando su comportamiento. Se observa también que la probabilidad de que los  $T_{CC}$  sean menores o iguales a 25 ms es del 100%, sin importar el tipo de red de comunicación implementado.

La Fig.5 presenta la CDF del ciclo de comunicación para diferentes tipos de redes: a) CAN; b) Switch Ethernet. En las figuras se observa que para cualquier tipo de red propuesta, a medida que incrementa el número de CR's, aumenta el  $T_{CC}$ , esto se genera debido a que el CP debe atender un mayor número de CRs y con ello los retardos generados por cada dispositivo se incrementan.


**a) Ciclos de comunicación en CAN.**

**b) Ciclos de comunicación en Switch Ethernet.**
**Figura 5.** Ciclos de comunicación con diferentes CR's.

#### 4.3 Impacto en la calidad del control del sistema robótico

En el análisis del impacto en el  $T_{CC}$  se notó una alta dependencia al tipo de configuración establecida en el modelo, esto es, los  $T_{CC}$  pueden variar tanto en el valor promedio como en su dispersión. Este tiempo de retardo inevitablemente producirá un error entre la trayectoria deseada y la generada. El **IAE** del error de seguimiento de trayectoria del brazo robótico para diferentes TD y tipos de red con respecto al tiempo es presentada en la Fig.6. De la figura se observa que el error de seguimiento se ve alterado por las variaciones en el tamaño de datos a ser gestionados por la red de comunicación. La red CAN presenta errores bajos en el seguimiento de trayectoria por parte del brazo robotizado; siendo la red Ethernet la que más error acumula. Para las diferentes redes analizadas la curva del **IAE** muestra un punto donde el error se mantiene constante ( $t=0.85s$ ), que corresponde al punto donde la velocidad en las articulaciones es igual a cero

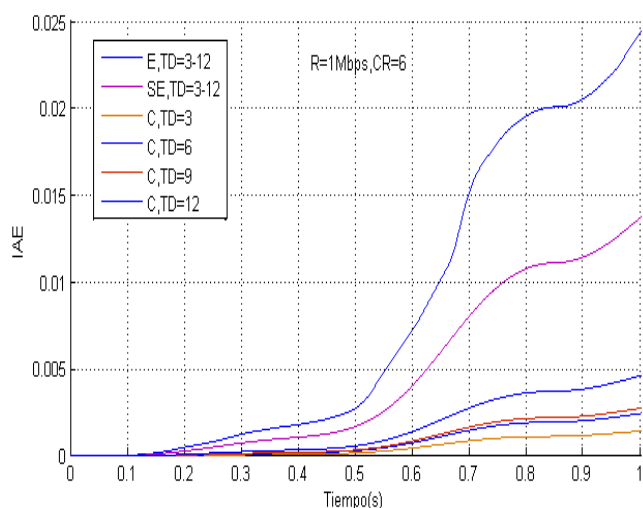


Figura 6. IAE del error de ajuste de trayectoria para diferentes TD.

## 6. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se realizó el modelado de un sistema robótico de control en red, NCRS, el mismo que fue recreado con una herramienta de simulación, considerando condiciones ideales, sin interferencias en la red ni perturbaciones en los actuadores. El NCRS fue sometido a diferentes redes de comunicaciones; así cuando el tamaño de dato aumenta la red CAN también aumenta su ciclo de comunicación a medida que aumenta el tamaño de datos, ya que su capacidad de transmisión es limitada, en cambio las redes Ethernet y Switch Ethernet no son afectadas. Sin embargo, la red Ethernet genera más retardos y dispersión por no contar con sistemas que impida colisiones de paquetes. En cuanto a los errores de trayectoria se puede concluir que dependiendo de la aplicación se podría determinar la bondad de la red de comunicaciones así por

ejemplo la red CAN podría ser usada para señales de control no muy complejas, la red SE daría soporte a señales más complejas y con retardos medios en cambio la red E genera más errores de trayectoria por lo que no sería apropiada en sistemas que requieran mucha precisión.

## RECONOCIMIENTO

Este trabajo ha sido desarrollado gracias a la colaboración del personal investigador de UPC, los miembros del Grupo de Investigación en Comunicaciones Móviles (GICOM) de la ESPOL y los miembros del Grupo de Investigación en Sistemas de Telecomunicaciones (GISTEL) de la UPS sede Guayaquil.

## REFERENCIAS

- [1] Barrientos, Antonio. Fundamentos de robótica. España : McGraw-Hill, 2007. pag.17.
- [2] Control Scheduling Codesign of RealTime Systems: The Control Server Approach. Anton Cervin, Johan Eker. s.l. : Journal of Embedded Computing, 2004.
- [3] Estimación y Control Distribuidos de SistemassobreRedes de Comunicación. Francisco Rubio, Pablo Millán, Luis Orihuela, Carlos Vivas. RIAI-Elsevier; 2014; vol. 11, pp. 377-388.
- [4] How does control timing affect performance? Analysis and simulation of timing using Jitterbug and TrueTime. Cervin, A., y otros. no.3, pp. 16-30, s.l. : Control Systems Magazine, IEEE, 2003, Vol. 23.
- [5] Integrated Control and Scheduling. K-E Arzen, B. Bemardsson, J.Eker, A. Cervin, K. Nilsson, P. Persson, L.Sha. Dept. Automatic Control, Lund Institute of Technology : Research report, 1999. ISSN 0820-5316.
- [6] Modern Control Engineering (5th Edition) by Katsuhiko Ogata.
- [7] Propuesta de algoritmos de control enlíneastcp/ip y compensación de retardos; Velasquez Sergio, Custodio Angel. Universidad, Ciencia y Tecnología; Vol 18, N° 70; 2014.
- [8] Simulation Based Performance Analysis of Networked Control Systems with Resource Constraints. Xia, Feng. Busan : The 30th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2004.
- [9] Wang, Fei Yue y Derong, Liu. Networked Control Systems Theory and Applications. Londres : Springer-Verlag, 2008. ISBN 978-1-84800-214-2.(9)

# Redes WDM PON: Tendencias y Propuestas Para Viabilizar y Optimizar su Implementación

Arévalo G.\*; Sierra J.\*\*

\*Universidad Politécnica Salesiana, Carrera de Ingeniería Electrónica, Quito, Ecuador  
e-mail: garevalo@ups.edu.ec

\*\* Universidad Pontificia Bolivariana, Facultad de Ingenierías, Medellín, Colombia  
e-mail: javier.sierra@upb.edu.co

**Resumen:** Las redes ópticas de nueva generación representan una de las soluciones más prometedoras para satisfacer la altísima demanda de banda ultra ancha exigida por el exponencial incremento del tráfico desde y hacia usuario final. Particularmente las redes WDM-PON ofrecen una de las soluciones de mayor escalabilidad, sobre todo a través del empleo de técnicas de modulación especial o de aprovechamiento del canal (como UDWDM), pero a costa del incremento de la complejidad de la red y por consiguiente, del costo. Este artículo hace un estudio de las principales propuestas para los problemas que limitan la implementación a gran escala de las redes PON de nueva generación haciendo énfasis en el estudio de las principales tendencias y abarcando las redes PON a las que se da mayor enfoque en la investigación actual.

**Palabras clave:** Wavelength-division multiplexing (WDM), passive optical networks (PONs), optical network unit (ONU), dynamic band width and wave length assignment (DBWA).

**Abstract:** New generation optical networks present one of the most promising solutions for satisfying the ultra-wide bandwidth demand required by the exponential increase of traffic to and from final users. Particularly, WDM-PON offer one of the most scalable solutions. Even, the WDM-PON capability is further potentiated by the use of advanced modulation formats and spectrum optimization techniques (like UDWDM). However, this increases the complexity and in consequence the cost. The present work makes a review of the main problems related with the limitations for new generation PON great scale deployment. We make emphasis in the main tendencies and most popular PON technologies which are currently under research.

**Keywords:** Wavelength-division multiplexing (WDM), passive optical networks (PONs), optical network unit (ONU), dynamic band width and wave length assignment (DBWA).

## 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad el tráfico demandado por los usuarios de redes de acceso de alta capacidad está creciendo de forma exponencial. Esto hace que soluciones como WDM-PON y UDWDM-PON tengan viabilidad para implementación a gran escala a mediano plazo. Uno de los principales problemas es sin embargo los altos costos involucrados en la implementación de este tipo de redes, por lo que es indispensable determinar estrategias y modelos de implementación que optimicen los costos de implementación y optimicen a su vez la explotación de los recursos disponibles en la red, manteniendo altas tasas de velocidad de acceso y de disponibilidad.

En efecto, las redes WDM PON tienen un gran potencial, si es que se logra optimizar sus costos de implementación, para ofrecer un adecuado costo-beneficio con una muy buena eficiencia energética. Es así que WDM-PON se ha constituido en un tema popular de investigación en años recientes debido a la gran cantidad de problemas alrededor de

esta tecnología que no han sido resueltos aún tales como el despliegue de láseres sintonizables de bajo costo que viabilicen la transmisión upstream, la asignación dinámica de canales y ancho de banda, la redundancia y sistemas de recuperación frente a fallos en la fibra, entre otros. Uno de los problemas que están siendo confrontados con más fuerza es precisamente la búsqueda de soluciones que permitan hacer viable económicamente la implementación de la red de distribución óptica de una WDM-PON [1], [2].

El presente trabajo hace una revisión de las tecnologías ópticas de nueva generación en las cuales la comunidad científica ha estado y continúa actualmente trabajando, enfocándose particularmente en el estudio de redes del tipo WDM PON. En la sección II del artículo se describen las soluciones que se han propuesto para lograr altas tasas de bits en grandes distancias con el menor costo posible. La sección III describe brevemente propuestas para la asignación dinámica de longitudes de onda y ancho de banda, mientras que la sección IV hace un barrido de las propuestas para optimizar los costos de implementación de la red de distribución óptica en redes PON de nueva generación, tales como WDM PON y LR PON. En la sección V se resaltan las ventajas del uso de clusterización de tamaño variable con el

Artículo recibido el 16 de diciembre, 2014;

Para contactos y correspondencia: Av. 12 de Octubre, N24-22 y Wilson, Universidad Politécnica Salesiana, Campus Girón. Teléfono: 23962800, ext. 2627.

fin de optimizar los costos de implementación de la red. Finalmente la sección VI presenta las conclusiones más relevantes al respecto del estudio realizado en el este artículo.

## 2. BÚSQUEDA DE TRANSMISORES DE BAJO COSTO

Las redes pasivas de nueva generación (*NextGeneration*) NG-PON ofrecerán tasas de transmisión de datos más allá de los 10 Gb/s mediante la asignación de longitudes de onda dedicadas por cada canal, así como por el uso de transmisores y receptores sintonizables tanto en el extremo del proveedor de servicios como del lado del usuario [3]. Uno de los problemas más complejos relacionados con el desarrollo comercial de estas redes es la búsqueda de terminales ópticas de usuario de alta velocidad pero de bajo costo. La transmisión de bajada es menos sensitiva al costo por el hecho que los costos son absorbidos por la infraestructura del proveedor de servicios pero en el caso de la transmisión de subida (que depende de los equipos en la ONU), los costos son parcialmente absorbidos por los usuarios finales.

También tiene que tomarse en cuenta el requerimiento de soluciones sintonizables, es decir de equipos que no trabajen a una sola longitud de onda sino que tengan la capacidad de ajustar su transmisión a distintas longitudes de onda (un concepto denominado “*colorless*”), lo cual hace aún más compleja la búsqueda de soluciones de bajo costo debido al valor agregado, en capacidad pero también en precio de comercialización, que esta última característica implica. Es así que existen principalmente tres alternativas para la transmisión de subida en una WDM-PON que son potencialmente comerciables: el uso de láseres sintonizables, el uso de una fuente de luz común de amplio espectro (*Broadband Light Source - BLS*) y la remodulación de la señal de bajada para convertirla en señal de subida a través del uso de un modulador reflectivo[4], [5].

Debido al hecho de que el costo de la BLS es compartido entre todos los usuarios en la red, esta solución ha sido popular en varias propuestas donde se incluye el uso de una fuente de luz continua (*continuous wave*) CW-BLS con el fin de proveer de luz semilla para transmisores en las ONUs que operen mediante la técnica de inyección de luz forzada (*injection-locked optical transmitters*). Sin embargo, esta clase de fuentes ofrecen un ancho espectral bajo y una alta intensidad relativa de ruido (*Relative Intensity Noise - RIN*), lo cual limita la tasa de bits potencial a alrededor de 1 Gb/s [6]–[8]. La BLS se implementa generalmente a través de uno o más amplificadores de fibra dopada de erbio (*Erbium Doped Fiber Amplifiers - EDFAs*) conectados en cascada.

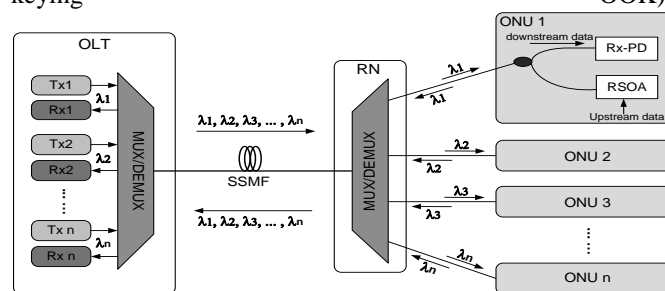
También es posible emplear no solo la BLS sino otro tipo de fuentes de luz con el fin de reducir el consumo de potencia, aunque involucrando generalmente un inconveniente aumento en los costos. Por ejemplo, en [9] se propone una red WDM-PON que ahorra más del 50% de la potencia óptica de bombeo mejorando el presupuesto de potencia global de la red mediante el uso de dos fuentes de luz multi-longitud de onda, cada una consistente en un EDFA

independiente con muchos reflectores selectores de longitud de onda.

Existen muchas opciones para el uso de fuentes de luz sintonizables en una ONU, como el uso de láseres DFB-LD (*Distributed Feedback Bragg-reflector Laser Diodes - DFB-LDs*) o láseres de cavidad externa (*External Cavity Lasers - ECLs*), los cuales pueden ser manejados directamente o empleando moduladores externos. Sin embargo, en la actualidad este tipo de láseres están lejos de ser efectivos en costo desde el punto de vista de una comercialización masiva. De modo que una opción atractiva es precisamente evitar el uso de este tipo de dispositivos mediante la remodulación de la señal de bajada para convertirla en datos de subida.

Al respecto de la remodulación de la señal de bajada, uno de los dispositivos más populares para el efecto es el amplificador óptico semiconductor reflectivo (*Reflective Semiconductor Optical Amplifier - RSOA*). La principal ventaja del RSOAs es que permite evitar el uso de un láser sintonizable en la ONU, pero su principal desventaja es su relativamente baja capacidad espectral (comparado con un láser sintonizable de alta capacidad). El ancho espectral de un RSOA típicamente llega hasta los 2.5 GHz, lo cual limita la tasa de bits precisamente alrededor de 2.5 Gb/s para distancias no mucho mayores a 20 km. En la figura 1 se muestra una topología WDM-PON que emplea RSOAs en sus ONUs.

Dado que el RSOA permite transmitir datos de subida con altos niveles de potencia, el alcance de la red puede incrementarse siempre y cuando la tasa de bits se mantenga relativamente baja, es decir, dentro de los límites impuestos los problemas que inevitablemente se derivan del uso de estos dispositivos como el RIN, el ancho de banda limitado, la pérdida de sintonización de la longitud de onda (*wavelength-detuning - WD*), la ganancia dependiente de la polarización (*Polarization Dependent Gain - PDG*) y la dispersión inducida por el alto desplazamiento en frecuencia (*chirp*) que sufren estos dispositivos. Se han propuesto redes LR WDM-PON bidireccionales operantes a 2.5 Gb/s que emplean láseres del tipo Fabry-Perot (*Fabry-Perot laser diodes - FP-LDs*), sintonizados mediante auto bloqueo de inyección de longitud de onda (*self-injection locked*), como fuentes continuas (CW) de luz para RSOAs[10], [11]. Estos sistemas alcanzan transmisión sin errores (BERs iguales o menores a  $10^{-12}$ ) a través de distancias de hasta 70km sin el empleo de técnicas especiales de modulación (sino la simple modulación on-off keying (OOK)).



**Figura 1.** Diagrama esquemático de una WDM-PON con transmisor de ONU basado en RSOA.

Mediante el uso de técnicas de modulación especial, como la modulación diferencial de desplazamiento de fase (*DifferentialPhaseShiftKeying* - *DPSK*), o la modulación diferencial de desplazamiento de fase en cuadratura (*DifferentialQuadraturePhaseShiftKeying* - *DQPSK*) o inclusive la multiplexación por división de polarización (*PolarizationMultiplexing* - *POLMUX*), se han reportado WDM-PON basadas en RSOA capaces de transmitir a tasas iguales o mayores a 10 Gb/s en enlaces de 20 km [12], [13], o inclusive mucho mayores velocidades en enlaces de mayor distancia mediante el uso de compensación de dispersión [14] o la ecualización de la señal alternativamente combinada con FEC [15], [16]. Sin embargo, estos alcances se logran a través de un incremento en la complejidad de las ONU, lo cual puede resultar en altos costos de implementación y a su vez en penalizaciones en el presupuesto de potencia de la red. Por ejemplo, existe una penalización de 10 dB de potencia en una transmisión basada en DPSK debido a la detección de señal requerida para la transformación de la señal OOK en una DPSK [12]. Adicionalmente se ha probado el uso de OFDM (*OrthogonalFrequencyDivisionMultiplexing*) dado su alta optimización del espectro y su robustez ante la dispersión, lográndose transmisiones mejoradas basadas en RSOA a 10 Gb/s o mayores [17], [18], [19]. La principal desventaja de esta solución es la complejidad de los circuitos electrónicos que demanda.

Un RSOA debe trabajar en la región de saturación de ganancia, lo que provoca que el presupuesto de potencia de la red deba incrementarse con el fin de lograr que llegue suficiente potencia a la ONU y que el RSOA trabaje en régimen parcial de saturación. Además, el radio de extinción (*extinction ratio* - *ER*) en la señal de bajada debe ser bajo con el fin de permitir una potencia de nivel cero relativamente alta y que permita mantener la condición de saturación. En [20] se presenta una propuesta que permite disponer de un ER de señal de bajada tan alto como 9 dB en una ONU basada en RSOA operante a 1.25 Gb/s que emplea una técnica de ajuste del nivel de umbral de decisión.

Otra técnica que puede usarse para mejorar la transmisión con RSOA es la variación de la longitud de onda de desacople en la transmisión de subida [21] y el uso de subportadoras para evitar la diafonía entre señales de bajada y subida causada por el re-uso de la longitud de onda de bajada para la transmisión de subida [22], [23] aunque las tasas de bits reportadas en esos sistemas no superan los 2.5 Gb/s. El uso de un transceptor de electro absorción con inyección bloqueada (*Injection-locked Electro-AbsorptionTransceiver* - *EAT*), en lugar de un RSOA, mejora la sensibilidad de la transmisión con respecto a la polarización [24] aunque dentro de mi conocimiento, no existen sistemas reportados que hagan uso de esta solución que a su vez superen los 2.5 Gb/s.

En años recientes, el uso de láseres de cavidad vertical y emisión superficial (*Vertical Cavity Surface EmittingLasers* - *VCSELs*) se ha incrementado dado que se trata de un dispositivo de menor costo que puede trabajar como una

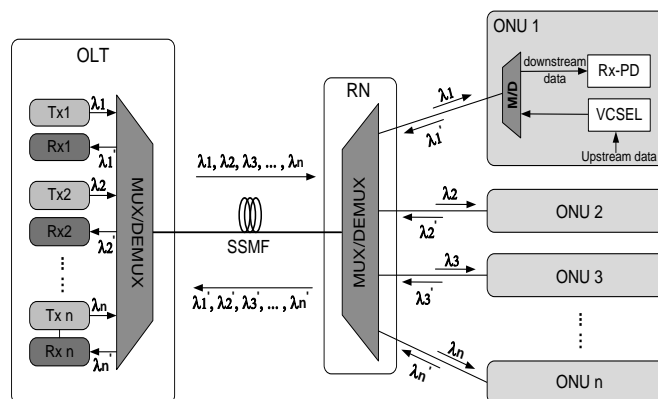


Figura 2. Diagrama esquemático de una WDM-PON con transmisor de ONU basado en un VCSEL.

fuente de luz sintonizable y que se puede modular directamente. Los VCSELs constituyen una de las alternativas más prometedoras para un despliegue comercial de dispositivos de transmisión sintonizables para usuario final. Un caso bien conocido del uso de VCSELs para transmisiones de 1.25 Gb/s es el caso del proyecto GigaWam (*Gigabit-access-passive-optical-networkusingWavelengthdivisionmultiplexing*) [25].

En el trabajo de descrito en [26] se reporta el empleo de un VCSEL directamente modulado para transmitir a 10 Gb/s sin el empleo de técnicas especiales de modulación o compensación de dispersión a lo largo de una red WDM-PON de 20 km de longitud. En esta red se alcanza tan alta tasa de bits mediante la compensación del desplazamiento en frecuencia que se produce debido al chirp generado por el VCSEL (este tipo de láseres tienen chirp alto en comparación con otros láseres de mejor desempeño). Dicha compensación se realiza mediante un cambio en la frecuencia central de los filtros ópticos, ajustándolos a la variación de frecuencia provocada por el VCSEL. En [27] se analiza las ventajas del uso de un VCSEL sobre un RSOA como fuente de luz en la transmisión uplink en una red PON. La figura 2 muestra una red WDM-PON en la cual las ONUs emplean VCSELs para la transmisión de datos de subida.

### 3. ASIGNACIÓN DINÁMICA DE ANCHO DE BANDA

En cualquier situación de las antes escritas, también tiene que tomarse en cuenta los casos en los cuales el número de longitudes de onda disponibles para la transmisión WDM es menor que el número de ONUs existentes en la red. En tal caso el principal problema constituye la asignación de longitudes de onda para garantizar un determinado ancho de banda al usuario (*Wavelength and BandwidthAssignment* - *WBA*) y debido al aumento en la demanda de ancho de banda por parte de los usuarios, es particularmente interesante el estudio de los algoritmos dinámicos de asignación de longitud de onda y ancho de banda (*DynamicWavelength and BandwidthAssignment* - *DWBA*).



Sobre este tema existen muchas investigaciones que se han llevado a cabo y que se han presentado en años recientes, uno de los problemas de interés actual es particularmente el estudio de DWBA gestionada a nivel de cada conexión individual de un mismo usuario (*call-level DWBA*) [28]–[30].

#### 4. COSTOS DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN ÓPTICA

Una de las más grandes ventajas del uso de WDM-PON es la escalabilidad que ofrecen y su muy alta tasa de bits. Sin embargo esto se logra a través de un aumento en la complejidad de la red y por consiguiente un aumento en los costos, lo que significa un problema para la expansión comercial de sistemas de telecomunicaciones basados en esta tecnología. Es así que a su vez muchos trabajos de investigación se han enfocado en el estudio de la optimización de costos de implementación para redes WDM-PON utilizando como variables de la función objetivo el tamaño de la red, el número de equipos intermedios, y la asignación de ancho de banda en función de la disponibilidad de canales y la demanda de los usuarios [31]–[34].

Sobre la base del hecho que las oficinas de un proveedor de servicios están generalmente ya construidas, uno de los enfoques más utilizados para el diseño óptimo de redes PON son las soluciones *greenfield*[33], [35]. Y dado que la reducción de costos es un problema ligado al dimensionamiento óptimo de la red, muchos investigadores afrontan el problema a través de modelos ILP combinados con heurísticas, dado que se trata de problemas del tipo NP-hard, como el que se presenta en [36] el cual se propone una solución para el diseño óptimo de tecnologías PON basadas en árboles con dos niveles jerárquicos en su infraestructura. Otras investigaciones proponen topologías PON multinivel como en [37]–[39] y generalmente sugieren modelos no verificables a través de comparaciones con resultados de software especializado en resolver problemas ILP, esto debido a su complejidad [40]. Otras propuestas hacen uso de modelos MILP (*MixedInteger Linear Programming*) para resolver el problema de la optimización de costos para la implementación de una red PON, como en [41]. En general, los modelos propuestos cubren la implementación de redes del tipo TDM-PON, WDM-PON e híbridas, tomando en consideración las limitaciones físicas de la fibra, tales como la atenuación. Dado que la inclusión de WDM hace más relevantes otros efectos no deseados en la transmisión por fibra óptica tales como las no-linealidades, especialmente a altas tasa de velocidad de transmisión, como 10 Gb/s, algunas investigaciones incluyen la verificación de ese tipo de restricciones en sus modelos [42].

En muchas investigaciones se concluye que la topología más apropiada para lograr un dimensionamiento óptimo de una red PON es la topología tipo árbol extendido multinivel [43], inclusive en las redes del tipo LRPON [44], [45]. En la figura 3 se muestra una comparación entre una topología tipo árbol de un solo nivel versus una tipo árbol multinivel.

#### 5. CLUSTERIZACIÓN ASIMÉTRICA DE USUARIOS

Existen estudios que consideran distribuciones de usuarios heterogéneas y con densidades variables, incluso con mucha distancia de separación entre sí [46], pero muy pocas investigaciones sin embargo hablan de una implementación optimizada en función de una clusterización diferenciada de la región de usuarios a través de técnicas como la teselación de Voronoi, la misma que permite a su vez determinar la ubicación más óptima de los nodos de distribución. Una de ellas es la presentada en [47]. Otro enfoque que casi no se ha explorado es la relevancia que adquieren los efectos no lineales cuando se transmite con la técnica UDWDM, en la cual los canales están separados 10 GHz o menos, tales como FWM; ejemplos a este respecto son la investigación realizada en [48] donde se analiza el efecto de FWM al momento de asignar canales en una red de ese tipo y [42] en la que se incluye el análisis de la restricción impuesta por FWM en el modelo de optimización para el diseño de una red WDM-PON. Sin embargo, dentro de mi conocimiento, ninguna investigación analiza la problemática de la implementación óptima de una red UDWDM-PON considerando técnicas de teselación en la clusterización de usuarios, tomando en consideración restricciones físicas incluidas las no linealidades y otras restricciones tales como la longitud de la fibra, número y costo de equipos, así como la demanda de los usuarios y capacidad de los canales. En la tabla 1 se presenta un resumen del estado del arte de las redes PON, en base a varios de los artículos citados anteriormente.

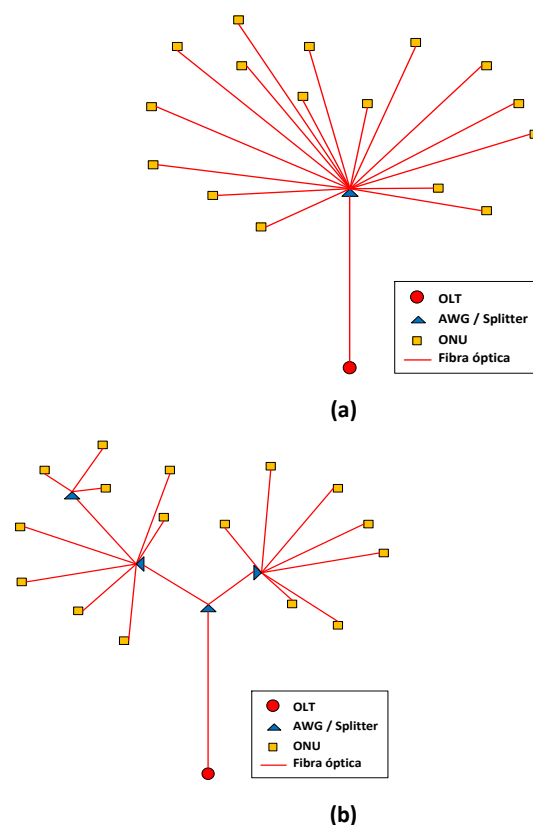


Figura 3. Diagrama esquemático de topologías PON típicas: (a) árbol de un nivel; (b) árbol extendido - multinivel.

Tabla 1. Sumarización del estado actual de las redes PON en base a los artículos citados.

AÑO	DATOS	TIPO DE RED PON					RESTRICCIONES DEL PROBLEMA					FUNCIONES OBJETIVO					PROPONEN			USAN								
		TDM-PON	HYBRID TDM-WDM-PON	WDM-PON	LRPON	UDWDM-PON	TRANSMISIÓN UPLINK DE BAJO COSTO	ASIGNACIÓN DE LONGITUD DE ONDA Y ANCHO DE BANDA	DIMENSIONAMIENTO EN BASE A TOPOLOGÍA DE DOS NIVELES	DIMENSIONAMIENTO EN BASE A TOPOLOGÍA MULTINIVEL	RESTRICCIONES BASADAS EN LOGITUD Y/O ATENUACIÓN EN LA FIBRA	TIPO, COSTO Y CANTIDAD DE NODOS INTERMEDIOS (AWGs, Splitters)	OTRAS RESTRICCIONES FÍSICAS (DISPERSIÓN Y NO LINEALIDADES)	COSTO DE LA FIBRA	COSTO DE NODOS INTERMEDIOS	NÚMERO DE USUARIOS (CAPACIDAD DE LOS NODOS)	CAPACIDAD /UTILIZACIÓN DE LOS CANALES (DEMANDA DE LOS USUARIOS)	COSTO TOTAL DE IMPLEMENTACIÓN DE LA RED	ILP / MILP	MULTI OBJETIVO	HEURÍSTICA / METAHEURÍSTICA	PROPUESTA DE UN MODELO MATEMÁTICO	TRANSMISORES DE ALTA VELOCIDAD Y DE BAJO COSTO EN ONU	TÉCNICAS DE MODULACIÓN AVANZADA DE BITS	SCHEDULING / WBA / DWBA	CADENAS DE MARKOV	HEURÍSTICAS (PRUFER, PARTICIÓN, DIJKSTRA, STEINER TREE, etc.)	CLUSTERIZACIÓN DIFERENCIADA BASADA EN TESELACIÓN
2008	E.W.M. Wong [28]			X			X	X													X	X						
2009	J. Li 2009 [33]	X						X	X	X		X	X	X		X			X									X
2009	J. Zhang [34]			X				X	X	X		X	X			X			X									X
2010	J. Elbers [3]	X	X			X																X						
2010	C.F. Su [9]			X																		X						
2010	F. Y. Shih [11]			X	X																	X						
2010	L. Zhou [30]		X	X			X		X						X									X				
2010	M.S. Kiaei [32]	X		X			X		X						X		X						X					
2011	B.H. Choi [6]			X		X																X						
2011	C. H. Yeh [10]			X	X		X															X						
2011	Q. Guo [15]			X																			X					
2011	S.H. Cho [21]			X																		X						
2011	T.B. Gibbon [26]			X																		X						
2011	J.S. Vardakas [29]		X					X							X					X				X	X			
2011	M.S. Kiaei [31]	X		X			X		X						X		X		X				X					
2011	Y. Kim [37]	X							X	X	X		X	X		X	X		X								X	
2012	E. Wong [5]	X	X	X	X		X															X	X					
2012	K. Lee [8]			X																		X						
2012	L. Li [14]			X																			X					
2012	K. Y. Cho [16]			X	X																	X						
2012	J.M. Joo [17]			X																		X	X					
2012	R. Chowdhury [36]			X					X	X	X		X	X		X	X		X								X	
2012	B. Kantarci [38]	X							X	X	X		X	X		X			X								X	
2012	A. Eira [39]	X							X	X	X		X	X		X	X		X								X	
2012	B. Lin [44]	X			X				X	X	X		X	X		X	X		X								X	
2013	S. Francfort [40]	X	X	X					X	X	X		X	X		X	X		X								X	
2013	Sloggerenberg[41]	X							X	X	X		X	X		X	X		X								X	

Arévalo G.\*; Sierra J.\*\*

20 13	G. Rentao [45]	X							X	X	X		X	X		X	X		X							X	
20 13	A. Mitcsenkov [47]	X	X	X					X	X	X		X	X		X	X		X							X	X
20 14	L. Gouveia [43]	X							X	X	X		X	X		X	X		X							X	
20 14	S. Pal [46]	X			X				X	X	X		X	X		X	X		X							X	
20 14	M. Bi [48]					X						X			X				X			X			X		
20 12	G.V. Arévalo [27]			X			X												X								
20 13	G.V. Arévalo [42]		X	X					X	X	X	X	X	X		X	X		X							X	

## 6. CONCLUSIONES

Existe en la actualidad una serie de propuestas de nuevos dispositivos, formatos de transmisión, técnicas de asignación de canal, soluciones de optimización y arquitecturas de red, que buscan hacer óptima y viable la implementación de redes PON de nueva generación. Aquí destacan técnicas de modulación para transmisión a alta tasa de bits con dispositivos de bajo costo, compartición de fuentes amplio ancho de banda, remodulación de la señal descendente, algoritmos de asignación dinámica de longitud de onda y ancho de banda, heurísticas para optimizar el costo de implementación de la red de distribución óptica y técnicas de clusterización en base a teselación. Entre las redes que más se estudian están las LR PON y las WDM PON. Dentro de esta temática existen varios problemas pendientes tales como la propuesta de láseres sintonizables de muy bajo costo, la asignación inteligente de ancho de banda y modelos de optimización de la red que consideren las restricciones físicas de la fibra óptica dentro de sus variables de restricción, tales como impacto de la dispersión y de los efectos no lineales.

## REFERENCIAS

- [1] A. Banerjee, Y. Park, F. Clarke, H. Song, G. Kramer, and K. Kim, "Wavelength-division-multiplexed passive optical network ( WDM-PON ) technologies for broadband access : a review [ Invited ]," vol. 4, no. 11, pp. 737-758, 2005.
- [2] O. In, "Energy-Efficient Next-Generation Optical Access Networks," no. January, pp. 122-127, 2012.
- [3] J. Elbers, "Optical Access Solutions Beyond 10G-EPON / XG-PON," pp. 8-10, 2010.
- [4] P. S. A. Tri, "Performance Analysis of Next Generation-PON ( NG-PON ) Architectures," pp. 339-345.
- [5] E. Wong, "Next-Generation Broadband Access Networks and Technologies," J. Light. Technol., vol. 30, no. 4, pp. 597-608, Feb. 2012.
- [6] B.-H. Choi and S. S. Lee, "The effect of AWG-filtering on a bidirectional WDM-PON link with spectrum-sliced signals and wavelength-reused signals," Opt. Commun., vol. 284, no. 24, pp. 5692-5696, Dec. 2011.
- [7] D. Nettet, "Network Operator Perspective on WDM-PON Systems and Applications," 37th Eur. Conf. Expo. Opt. Commun., no. i, p. Th.12.C.6, 2011.
- [8] K. Lee, S. Do Lim, Y. M. Jhon, C. H. Kim, P. Ghelfi, A. T. Nguyen, L. Poti, and S. B. Lee, "Broadcasting in colorless WDM-PON using spectrum-sliced wavelength conversion," Opt. Fiber Technol., vol. 18, no. 2, pp. 112-116, Mar. 2012.
- [9] C.-F. Su, L. Wang, S.-K. Liaw, and Y.-S. Huang, "A colorless WDM-PON system using multi-wavelength light sources for optically-injection-locked transmitters," Opt. Fiber Technol., vol. 16, no. 1, pp. 1-4, Jan. 2010.
- [10] C. H. Yeh, C. W. Chow, Y. F. Wu, F. Y. Shih, and S. Chi, "Using Fabry-Perot laser diode and reflective semiconductor optical amplifier for long reach WDM-PON system," Opt. Commun., vol. 284, no. 21, pp. 5148-5152, Oct. 2011.
- [11] F. Y. Shih, C. H. Yeh, C. W. Chow, C. H. Wang, and S. Chi, "Utilization of self-injection Fabry-Perot laser diode for long-reach WDM-PON," Opt. Fiber Technol., vol. 16, no. 1, pp. 46-49, Jan. 2010.
- [12] C. H. Yeh, C. W. Chow, and S. Chi, "Using 10 Gb/s remodulation DPSK signal in self-restored colorless WDM-PON system," Opt. Fiber Technol., vol. 15, no. 3, pp. 274-278, Jun. 2009.
- [13] H.-D. Jung, N.-C. Tran, C. Okonkwo, E. Tangdiongga, and T. Koonen, "10Gb/s Bi-Directional Symmetric WDM-PON System Based on POLMUX Technique with Polarization Insensitive ONU," Natl. Fiber Opt. Eng. Conf., p. JThA27, 2010.
- [14] L. Li, J. Zhang, D. Duan, and A. Yin, "Analysis modulation formats of DQPSK in WDM-PON system," Opt. - Int. J. Light Electron Opt., vol. 123, no. 22, pp. 2050-2055, Nov. 2012.
- [15] Q. Guo and A. V. Tran, "20-Gb/s Single-Feeder WDM-PON Using Partial-Response Maximum Likelihood Equalizer," IEEE Photonics Technol. Lett., vol. 23, no. 23, pp. 1802-1804, Dec. 2011.
- [16] K. Y. Cho, S. Member, U. H. Hong, M. Suzuki, and Y. C. Chung, "103-Gb / s Long-Reach WDM PON Implemented by Using Directly Modulated RSOAs," vol. 24, no. 3, pp. 2011-2013, 2012.
- [17] J.-M. Joo, M.-K. Hong, D. T. Pham, C. J. Youn, Y.-H. Kwon, E.-S. Nam, and S.-K. Han, "19-Gb/s adaptively modulated optical OFDM transmission by separated I/Q baseband delivery using 1GHz RSOAs," Opt. Fiber Technol., vol. 18, no. 1, pp. 34-38, Jan. 2012.
- [18] C. H. Yeh and C. W. Chow, "Utilization of four WDM channels with signal remodulation of OFDM-QAM for 10Gb/s uplink passive optical networks," Opt. Commun., vol. 282, no. 18, pp. 3701-3705, Sep. 2009.
- [19] B. Wu and Z. Zhang, "Applications of Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing in Optical Access Network," Procedia Environ. Sci., vol. 10, pp. 1199-1204, Jan. 2011.
- [20] S.-H. Cho, S.-S. Lee, and D.-W. Shin, "Improving upstream transmission performance using a receiver with decision threshold level adjustment in a loopback WDM-PON," Opt. Fiber Technol., vol. 16, no. 3, pp. 129-134, Jun. 2010.

- [21] S.-H. Cho, S.-S. Lee, and D.-W. Shin, "Impact of wavelength detuning on upstream transmission in a loop-back WDM-PON based on reflective-SOA," *Opt. Commun.*, vol. 284, no. 7, pp. 1951–1954, Apr. 2011.
- [22] Y.-Y. Won, D.-H. Kim, Y.-X. Piao, S.-J. Park, and S.-K. Han, "1.25-Gb/s bidirectional colorless WDM-PON based on RSOA using subcarrier detection and optical carrier suppression," *Opt. Fiber Technol.*, vol. 15, no. 2, pp. 141–144, Mar. 2009.
- [23] Z. A. El-sahn, J. M. Buset, and D. V. Plant, "Overlapped-Subcarrier Multiplexing for WDM Passive Optical Networks: Experimental Verification and Mathematical Analysis," vol. 30, no. 5, pp. 754–763, 2012.
- [24] S.-C. An, H.-S. Kim, Y.-Y. Won, and S.-K. Han, "Colorless gigabit WDM-PON link using injection locking and electro-absorption transceiver," *Opt. Commun.*, vol. 284, no. 6, pp. 1526–1531, Mar. 2011.
- [25] K. Prince, T. B. Gibbon, R. Rodes, E. Hviid, C. I. Mikkelsen, C. Neumeyr, M. Ortsiefer, E. Rönneberg, J. Roskopf, P. Öhlén, E. In De Betou, B. Stoltz, E. Goobar, J. Olsson, R. Fletcher, C. Abbott, M. Rask, N. Plappert, G. Vollrath, and I. T. Monroy, "Enabling Gigabit Per-User Data Bandwidth," no. c, 2011.
- [26] T. B. Gibbon, K. Prince, T. T. Pham, a. Tatarczak, C. Neumeyr, E. Rönneberg, M. Ortsiefer, and I. T. Monroy, "VCSEL transmission at 10Gb/s for 20km single mode fiber WDM-PON without dispersion compensation or injection locking," *Opt. Fiber Technol.*, vol. 17, no. 1, pp. 41–45, Jan. 2011.
- [27] G. Arévalo and D. Cárdenas, "Advantages of the use of VCSEL over RSOA for uplink transmission on WDM-PON networks," *IEEE LATINCOM conferences*, 2012.
- [28] E. W. M. Wong and S. Chan, "Dynamic Wavelength Allocation Schemes in WDM-PON," 2008.
- [29] J. S. Vardakas, I. D. Moscholios, M. D. Logothetis, and V. G. Stylianakis, "An Analytical Approach for Dynamic Wavelength Allocation in WDM – TDMA PONs Servicing ON – OFF Traffic," vol. 3, no. 4, 2011.
- [30] L. Zhou, X. Cheng, Y. Yeo, and L. H. Ngoh, "Hybrid WDM-TDM PON Architectures and DWBA Algorithms," *Communications and Networking in China (CHINACOM)*, 2010
- [31] M. S. Kiaei, C. Assi, L. Meng, and M. Maier, "On the Co-Existence of 10G-EPONs and WDM-PONs: A Scheduling and Bandwidth Allocation Approach," *J. Light. Technol.*, vol. 29, no. 10, pp. 1417–1426, 2011.
- [32] M. S. Kiaei, L. Meng, C. Assi, and M. Maier, "Efficient Scheduling and Grant Sizing Methods for WDM PONs," *J. Light. Technol.*, vol. 28, no. 13, pp. 1922–1931, 2010.
- [33] J. Li and G. Shen, "Cost Minimization Planning for Greenfield Passive Optical Networks," *IEEE/OSA J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 1, no. 1, pp. 17–29, Jun. 2009.
- [34] J. Zhang and N. Ansari, "Minimizing the Arrayed Waveguide Grating Cost and the Optical Cable Cost in Deploying WDM Passive Optical Networks," *IEEE/OSA J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 1, no. 5, pp. 352–365, Oct. 2009.
- [35] M. Morrow and K. Vijayananda, "Providers: Opportunities and Challenges (Chapter 3)."
- [36] R. Chowdhury and B. Jaumard, "A cross layer optimization scheme for WDM PON network design and dimensioning," *2012 IEEE Int. Conf. Commun.*, pp. 3110–3115, Jun. 2012.
- [37] Y. Kim, Y. Lee, and J. Han, "A splitter location-allocation problem in designing fiber optic access networks," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 210, no. 2, pp. 425–435, Apr. 2011.
- [38] B. Kantarci and H. T. Mouftah, "Availability and Cost-Constrained Long-Reach Passive Optical Network Planning," *IEEE Trans. Reliab.*, vol. 61, no. 1, pp. 113–124, Mar. 2012.
- [39] A. Eira, J. Pedro, and J. Pires, "Optimized design of multistage passive optical networks," *IEEE/OSA J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 4, no. 5, pp. 402–411, May 2012.
- [40] S. Francfort and M. Chardy, "Real life cable constraints in designing Passive Optical Network architecture," vol. 0, pp. 337–339, 2013.
- [41] S. P. van Loggerenberg, M. J. Grobler, and S. E. Terblanche, "Solving the Passive Optical Network with Fiber Duct Sharing Planning Problem Using Discrete Techniques," *Electron. Notes Discret. Math.*, vol. 41, pp. 343–350, Jun. 2013.
- [42] G. V. Arévalo, J. E. Sierra, and R. C. Hincapi, "ILP Model for Greenfield WDM PON Network Design Based," vol. 33, no. 0.
- [43] L. Gouveia, M. J. Lopes, and A. de Sousa, "Single PON network design with unconstrained splitting stages," *Eur. J. Oper. Res.*, Jul. 2014.
- [44] B. Lin, L. Lin, and P.-H. Ho, "Cascaded Splitter Topology Optimization in LRPNs," pp. 3105–3109, 2012.
- [45] G. Rentao, L. Xiaoxu, L. Hui, and B. Lin, "Evolutional algorithm based cascade long reach passive optical networks planning," *Commun. China*, vol. 10, no. 4, pp. 59–69, Apr. 2013.
- [46] S. Pal, C. Zukowski, A. Nag, D. B. Payne, and M. Ruffini, "Cable Length Minimisation in Long-Reach-PON Planning for Sparsely Populated Areas," pp. 19–22, 2014.
- [47] A. Mitcsenkov, P. Bakos, G. Paksy, and T. Cinkler, "Technology-independent Topology Design Heuristics for Point-to-Multipoint Optical Access Networks," pp. 298–303, 2013.
- [48] M. Bi, S. Xiao, J. Li and H. He, "A bandwidth-efficient channel allocation scheme for mitigating FWM in ultra-dense WDM-PON" *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, pp. 1957–1961, 2014.

# Sincronoscopio Virtual para un Sistema Multimáquina de Laboratorio de Sistemas Eléctricos de Potencia

Valenzuela A.\*; Játiva J.\*

\*Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Quito, Ecuador  
e-mail: david.valenzuela@epn.edu.ec; jesus.jativa@epn.edu.ec

**Resumen:** Este trabajo tiene como objetivo la construcción de un sincronoscopio virtual para un sistema multimáquina del laboratorio de sistemas eléctricos de potencia de la Escuela Politécnica Nacional, utilizando como dispositivos de adquisición de datos las tarjetas NI USB 6008 de National Instruments, las cuales utilizan la plataforma NI LabVIEW para procesar, analizar y visualizar las variables eléctricas en una interfaz gráfica (HMI). El instrumento tiene la capacidad de realizar la sincronización de máquinas verificando voltajes de línea, frecuencias, secuencias de fases y voltaje diferencial, así como medir potencia activa, reactiva, aparente, y factor de potencia de un sistema multimáquina.

**Palabras clave:** Sincronoscopio virtual, sistema multimáquina, sistemas eléctricos de potencia, interfaz hombre máquina (HMI), máquinas de inducción y sincrónicas.

**Abstract:** This work is aimed at building a virtual synchroscope for a multimachine system of the electrical power system laboratory at the National Polytechnic School, using as data acquisition device a NI USB 6008 card from National Instruments, which uses the NI platform LabVIEW to process, analyze and display the electrical variables in a Human-Machine Interface (HMI). This instrument allows to synchronizemachines by verifying line voltages, frequencies, phase sequences and differential voltage, as well as measure of active, reactive, apparent power and power factor of a multimachinesystem.

**Keywords:** Virtual synchroscope, multimachine system, electrical power systems, human machine interface (HMI), induction and synchronous machines.

## 1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la tecnología permite diseñar equipos de adquisición de datos, procesamiento de señales y medición de variables eléctricas en tiempo real, posibilitando su uso en aplicaciones de monitoreo y control de procesos en la industria o centros de educación. El desarrollo del Laboratorio de Sistemas Eléctricos de Potencia demanda la operación de varios grupos motor-generador funcionando en paralelo. El sistema multimáquina está constituido por máquinas de inducción y máquinas sincrónicas, las cuales pueden entregar o absorber potencia activa, funcionando como motor o generador cualquiera de las máquinas eléctricas. Las máquinas de inducción siempre absorben potencia reactiva ya sea funcionando como motor o generador, mientras que las máquinas sincrónicas tienen la facilidad de operar con factores de potencia en adelanto o atraso independiente de su modo de funcionamiento.

### 1.1 Máquina de inducción

Las máquinas de inducción son las de mayor utilización en los sectores industrial, comercial y residencial debido a su alta eficiencia, robustez y confiabilidad.

Los componentes esenciales de una máquina de inducción son: estator y rotor, el primero es la parte estacionaria, donde se alojan los devanados por los cuales circula corriente

alterna que produce un campo magnético giratorio sobre la periferia del rotor, a velocidad de sincronismo como se indica en la ecuación (1). El campo magnético rotativo produce en el rotor una fuerza electromotriz que induce en cada de las bobinas una corriente, este fenómeno tiende a hacer girar el rotor a una velocidad casi igual a la de sincronismo.

$$N_s = \frac{120 \cdot f}{p} \quad (1)$$

Las máquinas de inducción tienen la funcionalidad de ser usadas como motores o generadores, dependiendo de la aplicación.

#### 1.1.1 Máquina de inducción como motor

Cuando funciona como motor, la máquina de inducción transforma la energía eléctrica de la red en energía mecánica, consumiendo potencia activa y reactiva del suministro eléctrico, Fig.1.

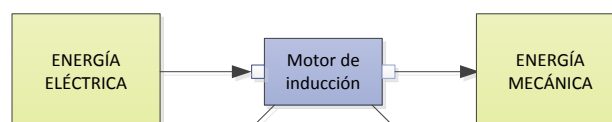


Figura 1. Conversión de energía en el motor de inducción

El control de la velocidad de un motor de inducción se efectúa con métodos externos tales como, control de frecuencia, cambio de polos en el estator o control de voltaje del estator.

### 1.1.2 Máquina de inducción como generador

Los generadores asincrónicos a lo largo de la historia no fueron utilizados, sino hasta el aprovechamiento de las energías renovables, donde actualmente se utilizan en centrales eólicas o en pequeñas centrales hidroeléctricas.

Al operar como generador la velocidad del rotor es mayor que la velocidad de sincronismo y si se incrementa el torque aplicado al eje del generador, se aumenta la cantidad de potencia activa producida por el generador, Fig. 2. Debido a que no dispone de un circuito de campo magnético, la máquina consume potencia reactiva del sistema eléctrico, por tanto estos generadores deben conectarse a una barra de voltaje y frecuencia constantes.

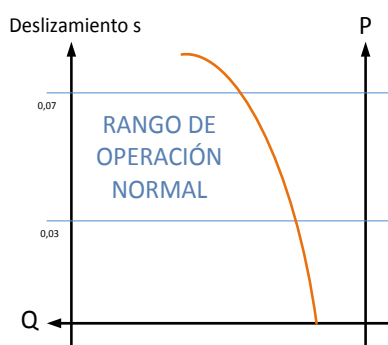


Figura 2. Rango de operación generador de inducción

### 1.2 Máquina Sincrónica

La máquina sincrónica tiene la facilidad de funcionar como motor o generador y además puede controlar el factor de potencia, como su nombre lo indica funciona a velocidad sincrónica.

Los componentes esenciales de una máquina sincrónica son rotor y estator, según el tipo de rotor se clasifican en máquinas de rotor cilíndrico o de polos salientes.

#### 1.2.1 Máquina sincrónica como motor

La máquina sincrónica al funcionar como motor permite la conversión de potencia eléctrica en mecánica, con la particularidad de que la velocidad del rotor es la misma que la sincrónica. Esta velocidad es independiente de la carga mientras no sobrepase los rangos nominales de la máquina motriz.

El motor sincrónico es una máquina de doble alimentación de energía, es por tanto necesario introducir corriente continua en el devanado de campo (rotor) y además aplicar corriente alterna trifásica en la armadura (estator). En el primer caso se induce en la periferia del rotor un campo magnético estacionario, mientras lo segundo provoca circulación de

corriente en los devanados de la armadura, produciéndose un campo magnético uniforme rotatorio.

#### 1.2.2 Máquina sincrónica como generador

Al aplicar corriente continua al devanado del rotor, éste produce un campo magnético, si el rotor está en movimiento por medio de una máquina motriz, dicho campo será rotacional e inducirá un voltaje en los devanados trifásicos de la armadura, transformando la energía mecánica en eléctrica.

Con un generador sincrónico es posible variar la cantidad de potencia activa, a través del control del torque impuesto en el rotor por la acción de la fuente mecánica de energía, además es posible variar la cantidad de potencia reactiva que absorbe o entrega al sistema, mediante la variación de la corriente de campo.

#### 1.3 Funcionamiento en paralelo de generadores sincrónicos

Las condiciones necesarias para la conexión en paralelo de generadores deben satisfacer dentro de un rango muy pequeño las siguientes condiciones:

- La magnitud del voltaje del grupo motor-generador entrante debe ser igual a la del otro grupo motor-generador.
- La frecuencia de los dos sistemas de generación debe ser de igual magnitud.
- Los dos generadores deben tener la misma secuencia de fases.
- Igualdad en los ángulos de los voltajes terminales de ambos sistemas de generación.

Si existe el cierre arbitrario del interruptor, los grupos motor-generador se verán expuestos a grandes esfuerzos y con ello a disminuir su vida útil. La conexión de las máquinas para la puesta en paralelo de generadores se muestra en la Fig. 3.

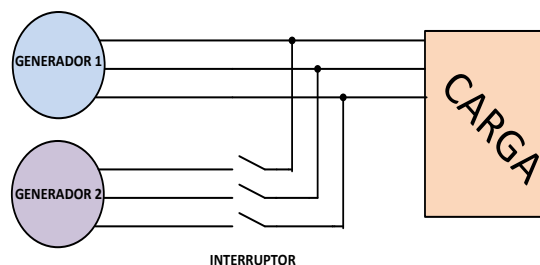


Figura 3. Conexión para puesta en paralelo de generadores

## 2. DISEÑO DE INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA Y VIRTUAL

El trabajo consiste en la construcción de un sincronoscopio virtual, para acoplar un generador a la red de suministro de energía eléctrica o la conexión en paralelo de dos generadores sincrónicos. Para representar un sistema

eléctrico real se utilizan líneas de transmisión de laboratorio, en la cual se miden los flujos de potencia activa y reactiva inyectados o absorbidos por cada uno de los generadores sincrónicos, además de la potencia activa y reactiva absorbida por una carga trifásica, Fig. 4.

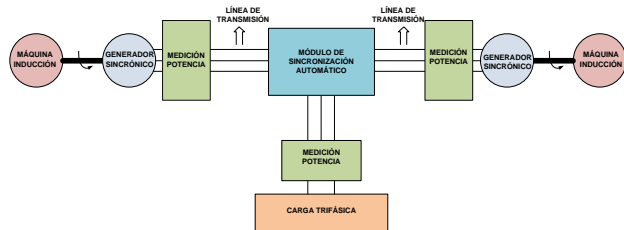


Figura 4. Sistema multimáquina de laboratorio

El proceso de sincronización y la medición de flujos de potencia se realizan por medio de un dispositivo de adquisición de datos y una interfaz gráfica desarrollada en software LabVIEW.

Para la etapa de sincronización de generadores se deben establecer condiciones, tales como correspondencia de secuencia de fases de ambos sistemas, comparación de voltajes, comparación de frecuencias y voltaje diferencial entre sistemas, con el fin de no dañar a los generadores sincrónicos. La medición de flujos de potencia se basa en la medición de fasores de voltajes y corriente en el sistema multimáquina. Con el objeto de aprovechar al máximo las entradas analógicas de la tarjeta de adquisición de datos se utiliza el método de Aron o método de los dos vatímetros.

El proceso de sincronización necesita de 6 entradas analógicas de la tarjeta de adquisición de datos, 3 para cada uno de los sistemas de generación, con el fin de comparar magnitudes de voltaje, frecuencia y secuencia, además se utiliza 1 entrada diferencial para medir el voltaje diferencial entre los dos sistemas de generación.

Para el cálculo de flujos de potencia se utilizan 10 entradas analógicas: 4 entradas para la medición de voltajes y 4 entradas para la medición de corriente en la línea de transmisión y 2 entradas para la medición de corriente que circula hacia la carga.

### 2.1 Desarrollo del hardware

El módulo de sincronización permite acoplar generadores sincrónicos entre sí o realizar la conexión en paralelo de un generador al sistema eléctrico, mediante el cierre de contactores trifásicos. La señal de cierre es enviada desde la tarjeta de adquisición de datos, siempre y cuando se cumplan los requisitos de sincronización que previamente son verificados mediante la visualización en LabVIEW.

Los procesos llevados a cabo por el prototipo de sincronización y medición de flujos de potencia se muestran

en los diagramas de bloques de la Fig. 5 y Fig. 6 respectivamente.

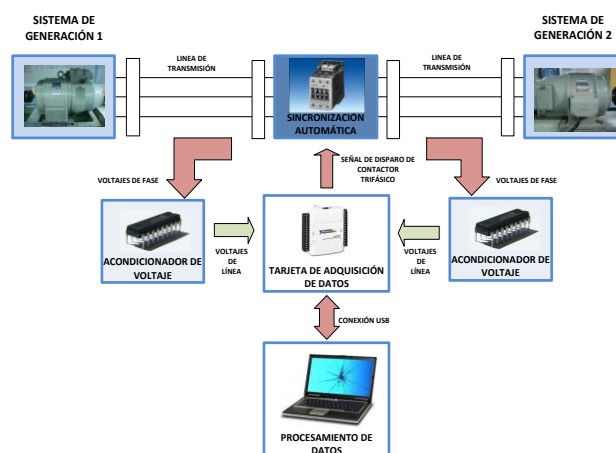


Figura 5. Diagrama de bloques para sincronización

En el sistema generador – generador o generador – red eléctrica se toman medidas de potencia activa, reactiva y aparente que fluyen entre los sistemas. Para realizar este proceso se deben tener dos señales de voltaje y dos señales de corriente por cada punto de medición.

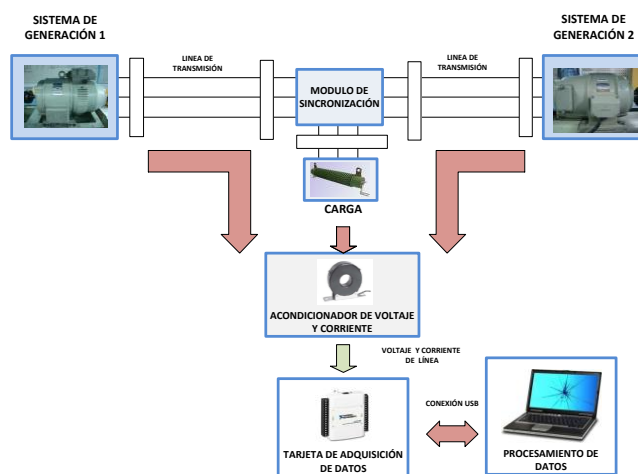


Figura 6. Diagrama de bloques para medición de flujos de potencia

#### 2.1.1 Medición de voltaje

En el proceso de sincronización y medición de potencia se realiza la medición de los voltajes de línea de ambos sistemas de generación.

Es necesario acondicionar la señal de voltaje al máximo rango que soporta la tarjeta de adquisición de datos, es decir de  $\pm 10$  V, por ende se utilizan transformadores, divisores de voltaje, además de diodos zener y fusibles como elementos de protección para voltaje y corriente respectivamente. Se obtienen voltajes compuestos por medio de amplificadores operacionales.

Conexión de transformadores monofásicos

Al utilizar transformadores monofásicos, es necesario la construcción de 3 bancos de transformadores trifásicos en conexión Dyn11, Fig. 7. Se ha optado por esta conexión debido a que los generadores de laboratorio internamente están conectados en triángulo. En el secundario se dispone de un neutro el cual es el punto común de los transformadores, y además es el punto de referencia para la adquisición de datos. Este punto común debe ser conectado al neutro de la red eléctrica.

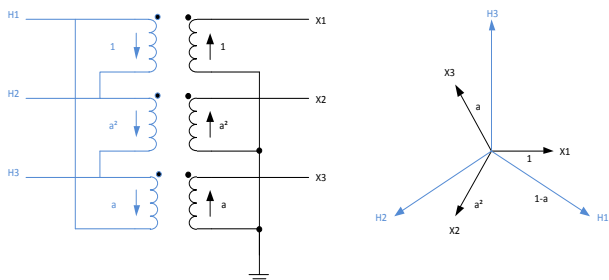


Figura 7. Banco de transformadores en conexión Dyn11

El desfase existente entre el voltaje primario y el voltaje secundario del banco de transformadores es corregido por medio de software en el cálculo de flujos de potencia y en el proceso de sincronización.

Divisor de voltaje resistivo

Con el fin de asegurar el funcionamiento de los 12 divisores de voltaje usados en la etapa de medición de potencia y en el proceso de sincronización, el divisor de voltaje se diseña para el voltaje secundario entre fase y neutro de los transformadores, tal como se muestra en la Fig. 8. Como elementos de protección de sobre voltajes en cada una de las fases se utilizarán diodos zener de 3,9 V, los cuales recortan los picos de voltaje mayores a dicho valor, protegiendo la tarjeta de adquisición de datos.

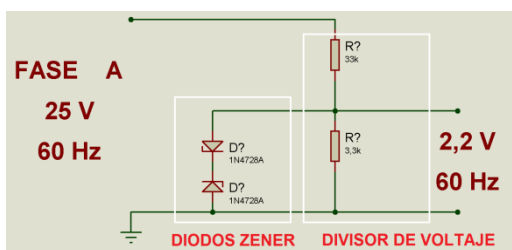


Figura 8. Divisor de voltaje resistivo y diodos zener como protección

Composición del voltaje de línea

En los circuitos trifásicos se denomina voltaje de fase a la diferencia de potencial entre cada una de las fases y el neutro del sistema, mientras que el voltaje de línea se define como la diferencia de potencial entre un par de fases. Esta diferencia debe realizarse tomando en cuenta magnitud y ángulo de los fasores, Fig. 9.

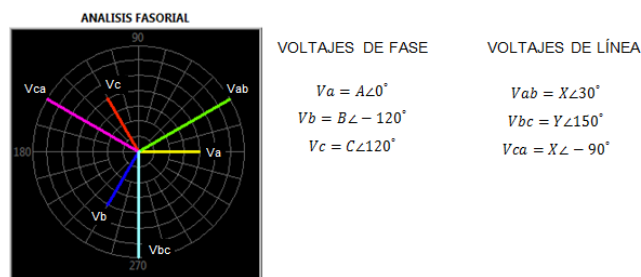


Figura 9. Diagrama fasorial voltajes de línea y voltaje de fase

La diferencia de voltajes se realiza mediante circuitos con amplificadores operacionales, la primera etapa funciona como seguidor de voltaje y en la segunda como un restador de señales eléctricas, tal como se muestra en la Fig. 10.

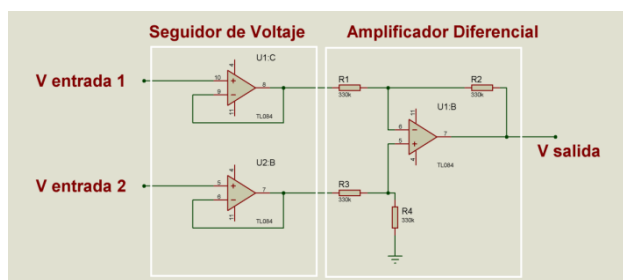


Figura 10. Acondicionamiento de voltajes

En el proyecto se utiliza el integrado TL084 que consta de 4 amplificadores operacionales por pastilla con alimentación de ±12V. El diseño del circuito restador tiene ganancia unitaria, donde las resistencias tienen el mismo valor de 330 kΩ, con el objetivo de tener una mayor impedancia y disminuir la corriente circulante.

2.1.2 Medición de corriente

La medición de flujos de potencia en el sistema multimáquina implica la medición de corriente que se encuentra circulando en el mismo, tanto en amplitud como en ángulo. Para medir dicha corriente se utilizan transformadores de corriente conectados en estrella que reducen la magnitud, la corriente se transforma en señal de voltaje por medio de resistencias con el fin de que la señal sea admisible para la tarjeta de adquisición de datos.

El devanado primario del transformador de corriente se conecta en serie con el sistema a medir, mientras el devanado secundario se conecta al instrumento de medición, como se indica en la Fig. 11.



Figura 11. Transformador de corriente tipo ventana



Las conexiones en el secundario de los transformadores de corriente pueden ser en triángulo o estrella, en el primer caso, existirá un desfase de 30° entre la corriente del primario y del secundario, mientras que en conexión en estrella no se modifica el desfase entre devanados.

La medición de corriente se realiza por medio de una resistencia en serie con el devanado secundario del transformador de corriente, la resistencia produce una caída de voltaje, la cual ingresa a la tarjeta de adquisición de datos, en el presente trabajo se utiliza resistencias de 1Ω de 5W de potencia de disipación. En la Fig.12 se muestra el modo de conexión de resistencias para la medición de corriente.

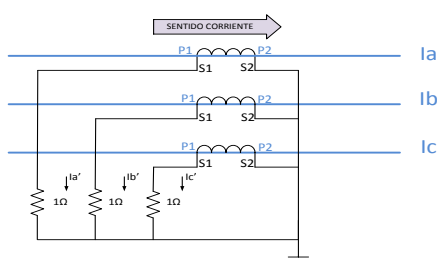


Figura 12. Conexión transformadores de corriente en estrella

### 2.1.3 Circuito de control y fuerza para la sincronización

El proceso de sincronización, a diferencia del proceso de medición de flujos de potencia, envía señales digitales desde la tarjeta de adquisición de datos para activar o desactivar los contactores trifásicos que permiten el acoplamiento entre los sistemas de generación.

Con el fin de proteger y aislar la tarjeta de adquisición de datos con los sistemas de generación, se ha implementado el circuito de protección y control de la Fig. 13.

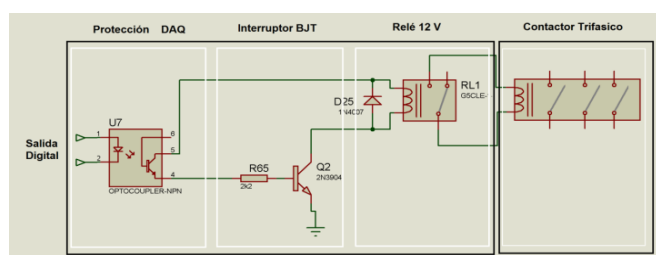


Figura 13. Circuito de protección y control

El disparo del contactor trifásico se realiza en dos etapas, la primera energiza un relé de 12 V, el cual cuenta con un contacto abierto y un contacto cerrado, uno de estos, dependiendo de la aplicación está conectado al voltaje de alimentación (220 V) con el fin de energizar la bobina del contactor trifásico.

Para proteger y aislar los circuitos eléctricos entre sí, se utilizan optoacopladores, los cuales funcionan como interruptores activados mediante un diodo emisor de luz infrarrojo, cuya única conexión entre ambos es óptica. La cantidad de luz infrarroja depende de la corriente circulante

por el diodo emisor. Estos permiten transmitir señales de control a alta frecuencia y conservar la forma de onda de la señal de entrada. En el proyecto se utiliza el optoacoplador 4n25 para protección de las salidas digitales de la tarjeta de adquisición de datos.

Para verificar la activación de los contactores trifásicos se ha diseñado un circuito de medición, conectado directamente a la bobina de los contactores, sirve para mejorar el algoritmo de control y utiliza una entrada digital de la tarjeta de adquisición de datos por cada contactor trifásico. La Fig. 14 muestra el circuito utilizado para comprobar la activación del contactor.

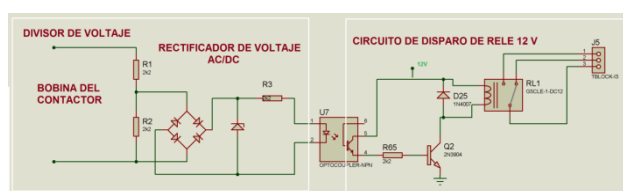


Figura 14. Circuito para comprobar activación del contactor trifásico

### 2.2 Desarrollo de software

El desarrollo de la interfaz gráfica HMI y la programación que realiza la sincronización y medición de flujos de potencia están basados en lenguaje gráfico del software LabVIEW. Los datos ingresan al computador por medio de la tarjeta de adquisición de datos, previo acondicionamiento de las variables eléctricas. La Fig. 15 muestra el diagrama de flujo principal para el proceso de sincronización y medición de flujos de potencia.

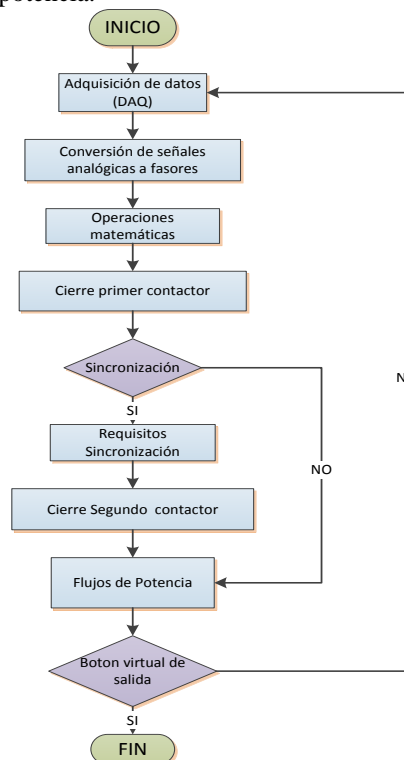


Figura 15. Diagrama de bloques de programación

Adquiridas las señales analógicas, es necesario convertirlas en fasores, para esto se utiliza el módulo de LabVIEW Power Electric Suite, con esta herramienta es posible visualizar la frecuencia de los sistemas, así como los fasores de voltaje, corriente. Para el posterior análisis de las señales eléctricas es conveniente separar en magnitud y ángulo a los fasores utilizando la biblioteca de operaciones matemáticas existentes en LabVIEW.

La pantalla principal del programa para la sincronización y medición de flujos de potencia se muestra en la Fig. 16. Si desean realizar las mediciones se debe seleccionar el botón “INGRESAR”, caso contrario se debe seleccionar el botón de salida de programa “SALIR”.

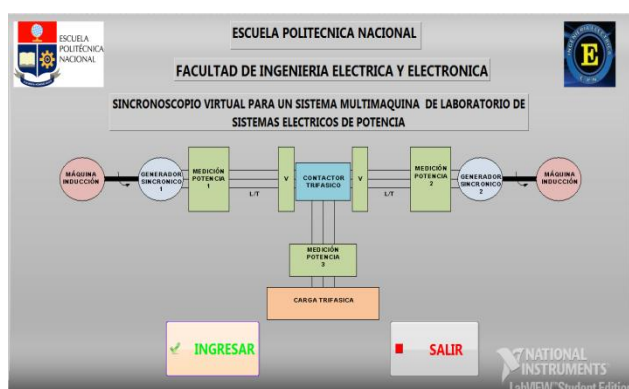


Figura 16. Interfaz gráfica principal

### 2.2.1 Sincronización

En la Fig. 17 se muestra el diagrama de bloques para el acoplamiento de generadores eléctricos, en el cual se compara voltajes, frecuencias, secuencias y se verifica el mínimo voltaje diferencial de ambos sistemas.

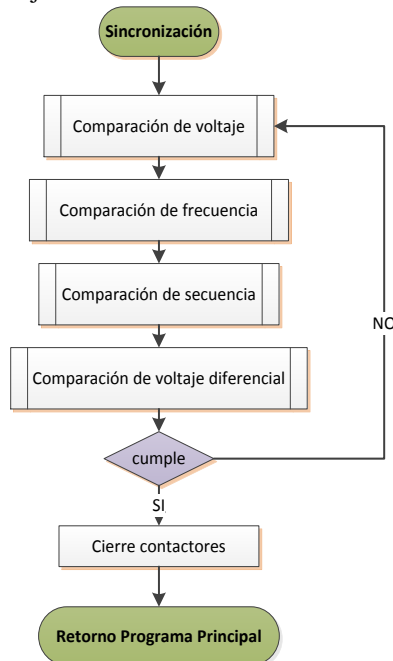


Figura 17. Diagrama de bloques sincronización

Para cumplir la condición de igualdad de voltajes de línea, la diferencia entre las magnitudes de los sistemas de generación debe ser menor al 5%.

La diferencia de frecuencias no debe ser mayor a 0,2 Hz con el fin de precautar la integridad de los generadores eléctricos.

Tabla 1. Valores permisivos de frecuencia

Límites de Frecuencia	Valor
Máxima	60,2 Hz
Nominal	60 Hz
Mínima	59,8 Hz

En el proceso de sincronización es necesario comprobar la secuencia de fases de ambos sistemas, si tienen la misma secuencia, positiva o negativa, estos pueden acoplarse, si difieren en secuencia, no se pueden sincronizar y es necesario el intercambio de dos fases de cualquiera de los sistemas.

La comprobación de secuencia de fases de los sistemas de generación se realiza con la resta de los ángulos de los fasores de voltaje de las fases 1 y 2, tomando en cuenta que la primera fase que ingresa a la tarjeta de adquisición sirve de referencia para determinar el desfase de las demás. Si la resta entre fase 1 y fase 2, se encuentra alrededor de +120, la secuencia del sistema es positiva caso contrario la secuencia es negativa.

Comprobado secuencia de fases, igualdad de magnitud de voltajes y de frecuencias entre los sistemas de generación, es necesario observar el desfase de ángulo entre fases homónimas de cada uno de los generadores, midiendo el voltaje diferencial entre dichas fases. La diferencia de voltaje admisible para el acoplamiento de los sistemas de generación debe ser menor a 20 V (<10%), con el fin de evitar daños en los generadores.



Figura 18. Interfaz gráfica de sincronización

### 2.2.2. Medición de potencia

La medición de flujos de potencia se realiza a partir del cierre de uno de los contactores de los sistemas de generación, donde el contactor cerrado sirve de nexo entre el generador y la carga, esperando el cierre del otro contactor, que previamente debe cumplir requisitos de sincronización, por

ende se pueden tener dos tipos de conexiones básicas, conexión generación- carga y conexión doble generación- carga.

En la conexión generación- carga, únicamente se mide el flujo de potencia activa y reactiva que se dirige de generación hacia la carga, la generación puede ser cualquiera de los generadores de laboratorio, o la red de energía eléctrica. En esta conexión se tienen 2 mediciones de potencia, en la salida del generador y en la entrada de la carga, por tanto es posible determinar las pérdidas de potencia en la línea de transmisión tal como se indica en la Fig. 19.

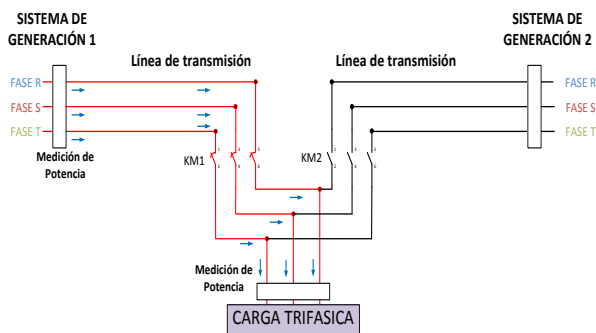


Figura 19. Medición de potencia generador - carga

La conexión doble generación-carga, Fig. 20 corresponde al acoplamiento de los sistemas de generación y carga, en esta conexión es posible visualizar la potencia que fluye desde los generadores hacia la carga, y los flujos de potencia entre generadores. Debido a que es posible motorizar uno de ellos con la disminución de su velocidad, mientras el generador restante va tomando toda la carga.

En esta conexión se tienen 3 lugares de medición de potencia: salida de cada uno de los generadores y entrada de la carga. Con estas mediciones es posible visualizar la entrega o absorción de potencia activa y reactiva de los generadores del sistema multimáquina.

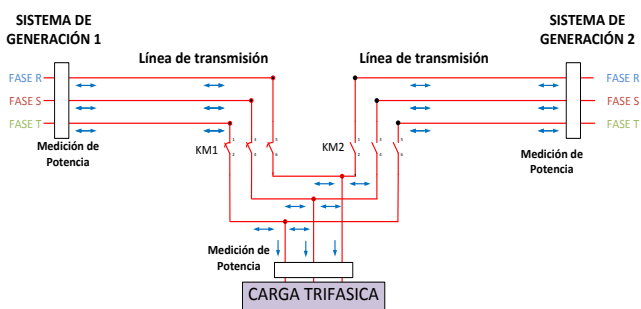


Figura 20. Medición de potencia doble generación-carga

Para determinar la potencia activa y reactiva que fluye por el sistema, es necesario utilizar la biblioteca de operadores matemáticos de LabVIEW, los cuales procesan rápidamente los valores de corriente y voltaje. Mediante indicadores numéricos y gráficos se visualiza en tiempo real los flujos de potencia en cualquiera de las conexiones antes mencionadas,

en la Fig. 21 se muestra la interfaz gráfica existente en cada uno de los puntos de medición de potencia.

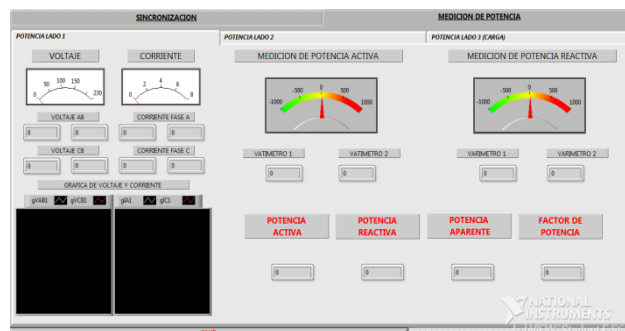


Figura 21. Interfaz gráfica para medición de potencia

### 3. CARACTERÍSTICAS Y VENTAJAS DEL SINCRONOSCOPIO VIRTUAL

En el presente proyecto se desarrolla un equipo didáctico para uso en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas, que cuenta con dos tareas independientes, definidas como: sincronización de sistemas de generación y medición de potencias.

El dispositivo construido permite realizar la sincronización de generadores y la medición de potencia en un solo dispositivo. Por lo que permite familiarizar al estudiante con un ambiente similar al de una sala de control, en el cual las variables eléctricas (frecuencias, voltajes, corrientes y potencias) se encuentran presentadas en una interfaz gráfica.

La etapa de sincronización permite al estudiante comprender detalladamente las condiciones necesarias para realizar la conexión de dos sistemas de generación, ya que muestra en pantalla las magnitudes y formas de onda de las variables eléctricas necesarias.

La medición de potencias permite determinar los flujos de potencia activa y reactiva que circulan dentro de un sistema multimáquina. Con los analizadores industriales disponibles en el Laboratorio únicamente se puede medir potencia activa en ambas direcciones, mientras que la potencia reactiva solo es posible con factores de potencia inductivo. El equipo descrito tiene la opción de medir potencias con factores de potencias inductivos y capacitivos. Actualmente existen equipos disponibles en el mercado a precios bastante elevados, por lo que este equipo se constituye en una solución para las necesidades didácticas de estudiantes de ingeniería.

### 4. CONCLUSIONES

La interfaz gráfica permite la visualización de todas las variables involucradas en la sincronización de sistemas de generación, además de indicadores virtuales para la medición

de potencias activa, reactiva y aparente de un sistema multimáquina.

El diseño del módulo didáctico permite realizar la puesta en paralelo de sistemas de generación, de forma manual o automática. En operación manual el usuario verifica los parámetros para sincronización, mientras que en operación automática el software verifica las condiciones adecuadas para ingresar en paralelo.

Las tarjetas de adquisición de datos NI USB 6008 cuentan con entradas analógicas que pueden funcionar en modo diferencial o con referencia a un punto común. En el sincronoscopio se utilizan las dos configuraciones, para la medición de voltajes y corrientes, referenciando las entradas al neutro de la red de energía, mientras que la medida del voltaje diferencial entre sistemas de generación utiliza el modo diferencial.

El módulo didáctico tiene la capacidad de medir valores de potencia reactiva en ambas direcciones, es decir con factores de potencia inductivo o capacitivo, la cual es una característica no disponible en los analizadores de redes del Laboratorio de Máquinas Eléctricas.

El trabajo diseñado, construido y probado en el presente proyecto permite elevar el nivel tecnológico del Laboratorio de Máquinas Eléctricas, dando al estudiante las facilidades para alcanzar un conocimiento más realista y detallado de un sistema eléctrico de potencia.

## REFERENCIAS

- [1] A. Fitzgerald, C. Kingsley, S. Umans, "Máquinas eléctricas", 6ta ed., México: McGraw-Hill, 2004.
- [2] I. Boldea, S. Nasar, "The Induction Machines Design Handbook", 2nd ed. Florida: CRC – Press, 2010.
- [3] J. Grainger, W. Stevenson, "Análisis de Sistemas de Potencia". 1ra ed., México: McGraw-Hill, 1996
- [4] S. Bhag, Huseyin R, "Máquinas Eléctricas y transformadores", 3era ed., México, Oxford University Press 2002.
- [5] S. Chapman, "Máquinas Eléctricas". 1era ed., Bogota: McGraw-Hill. 1987.
- [6] W. Brokering, R Palma, L. Vargas, "Los sistemas Eléctricos de Potencia" Santiago: Prentice Hall-Pearson Educación, 2008.
- [7] J.Lajara, "LabVIEW entorno gráfico de programación", 2da ed., Alfaomega, 2011.
- [8] C. Barrera, J. Játiva, "Análisis de estabilidad angular en un sistema de laboratorio," Revista Politécnica, vol. 33, 2014.

# Vector Control for an Interior Permanent Magnet Synchronous Machine with Maximum Torque per Ampere Strategy

Dominguez X.\*; Imbaquingo C.\*\*

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

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

**Resumen:**El principal objetivo de este artículo es detallar una metodología para implementar una estrategia de control de Máximo Torque por Amperio (MTPA) en una Máquina Síncrona de Imanes Interiores Permanentes (IPMSM). Las IPMSMs han sido ampliamente usadas en los últimos años en la industria al presentar un excelente desempeño dinámico y una alta densidad de poder. En el presente estudio, criterios y teoría de la estrategia MTPA y control vectorial son detallados en primer lugar. Luego, el análisis matemático y aspectos de simulación son presentados. Finalmente, el comportamiento del control de velocidad y torque es expuesto. Los resultados muestran respuestas exitosas del sistema en estado estable y durante transitorios.

**Palabras clave:** Control de velocidad, Control vectorial, IPMSM, MTPA, Referencia síncrona

**Abstract:**The main objective of this paper is to show a methodology to implement a Maximum Torque per Ampere Strategy (MTPA) in an Interior Permanent Magnet Synchronous Machine (IPMSM). IPMSM's have been broadly used on industry in the last years for having excellent dynamic performance and high power density. In this article, vector control and MTPA theory and criteria are firstly detailed. Then, the mathematical analysis and simulation aspects are presented. Lastly, the speed and torque control responses are exposed. The results show successful responses of the system on steady-state and during transients.

**Keywords:** IPMSM, MTPA, speed control, synchronous frame, vector control

## 1. INTRODUCTION

The permanent-magnetsynchronous motor (PMSM) has received notorious acceptance in industrial applications due to its high efficiency, high torque-current ratio, low noise, and robustness [1][2][3]. In particular, the interior PMSM (IPMSM) provides a smooth rotor surface and better dynamic performance [4]. In order to make appropriate use of these relevant advantages in this machine, the use and application of an accurate and efficient control technique needs to be developed and tested; this precisely the purpose of this paper. This goal will be achieved with the use of the Maximum Torque per Ampere (MTPA) strategy [5] and vector control theory.

For simulation and analysis purposes of the IPMSM control, common electrical parameters for this kind of machine analyzed by references [6] [7] will be assumed as Table 1 details.

## 2. VECTOR CONTROL USING MTPA TECHNIQUE

The synchronous reference frame will be implemented by the use of Park transformations [8] so that we can transform a 3-

phase system into dq components (Equation 1). This will be especially helpful when controlling stator currents because instead of tracking three 50/60 Hz sinusoidal reference signals ( $I_a$ ,  $I_b$ ,  $I_c$ ) only two DC reference signals will need to be tracked (the quadrature and direct currents,  $I_q$  and  $I_d$  respectively). On the other hand, dq to abc transformation (See Equation 2) is useful when feeding back voltage references to the machine as three phase values are again required.

**Table 1.** IPM Parameters

PARAMETER	SYMBOL	VALUE
Stator resistance	$R_s$	0.43 $\Omega$
D-axis stator inductance	$L_d$	27 mH
Q-axis stator inductance	$L_q$	67 mH
No-load peak line-to-line voltage constant	$V_{pk}/k_{rpm}$	98.67 V (peak value @ 1000rpm)
Number of pole pairs	$p$	2
Moment of inertia	$J$	0.00179 kg*m <sup>2</sup>
Rated current	$I_n$	10A
Mechanical Load Torque	$K_l$	0.00764 Nm/(rad/s)

$$\begin{bmatrix} V_{qs} \\ V_{ds} \\ V_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} * \cos(\theta) & \frac{2}{3} * \cos(\theta - 2\pi/3) & \frac{2}{3} * \cos(\theta + 2\pi/3) \\ \frac{2}{3} * \sin(\theta) & \frac{2}{3} * \sin(\theta - 2\pi/3) & \frac{2}{3} * \sin(\theta + 2\pi/3) \\ 1/3 & 1/3 & 1/3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 1 \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \sin(\theta - 2\pi/3) & 1 \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & \sin(\theta + 2\pi/3) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{qs} \\ V_{ds} \\ V_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

To successfully achieve the MTPA condition, the synchronous reference frame with the  $dq$  axes placed like in Fig. 1 will be considered. There we can see that the  $q$  axis is ahead the  $a$  axis with the  $\theta_e$  angle ( $\theta_e = \theta$ ). Additionally, it can be observed the  $q$  and  $d$  axes being in quadrature and rotating at an angular speed equal to  $\omega_e$ . Therefore in this quadrature reference, the current only has direct ( $I_d$ ) and quadrature ( $I_q$ ) components.

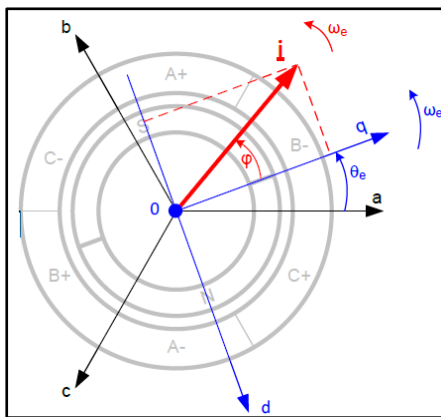


Figure 1. Selection of the d-q axes positions

For the assumed dq scheme, the torque and current in a PMSM are related with Equations 3 to 6 [8][9]:

$$T = 1.5 P (\lambda_{pm} I_q + (L_d - L_q) I_d I_q) \quad (3)$$

$$I_q = I \cdot \cos(\varphi) \quad (4)$$

$$I_d = -I \cdot \sin(\varphi) \quad (5)$$

$$I = \sqrt{I_q^2 + I_d^2} \quad (6)$$

Where  $\lambda_{pm}$  is the amplitude of the permanent magnet machine flux linked to the stator windings, while  $L_d$  and  $L_q$  are the direct and quadrature inductances respectively. By using Equation 7 [10] and considering the figures in Table 1, for this study case,  $\lambda_{pm}$  is found to be equal to 0.272 [V.s].

$$\lambda_{pm} = \frac{60 * V_{pk} / k_{rpm}}{2 * \sqrt{3} * \pi * P * 1000} \quad (7)$$

Contrary to the Surface Permanent Magnet Synchronous Machine (SPMSM) [9][11] where the direct current is set to be null, in the IPMSM the direct and quadrature currents need to be both appropriately controlled to produce the desired current module ( $I$ ) and thus the required torque. However, there is an infinite number of  $I_q$  and  $I_d$  currents combinations which may produce the same final current module as Equation 6 implies. This is reason why the MTPA control strategy seeks to maximize the torque for a given amount of current by maximizing the torque function with respect to the  $\varphi$  angle ( $\frac{d}{d\varphi} T = 0$ ). If we do this after replacing Equations 4 and 5 in 3, we have:

$$\frac{3}{2} P (-\lambda_{pm} I \sin(\varphi) - I^2 (L_d - L_q) \cos(2\varphi)) = 0 \quad (8)$$

When solving Equation 8 for  $\varphi$  and considering the nominal current  $I = I_{nominal} = 10$  [A] (Table 1); from the obtained mathematical answers the angle that produces the biggest torque is  $\varphi = 33.86^\circ$  with 12.32 [Nm]. For this condition and using Equations 4 and 5, we obtain  $I_q = 8.303$  [A] and  $I_d = -5.57$  [A].

In Fig. 2 it can be visualized the  $I_d$  and  $I_q$  components relation in MTPA conditions for different current amplitudes ( $I$ ) between 1 and 10 [A]. As we can see, the bigger  $I_q$  the bigger the negative  $I_d$ . As permanent magnets present higher reluctance than iron, the inductance along the  $d$  axis tends to be smaller than the one on the  $q$ -axis [15]. For these reason in typical IPMSMs,  $L_d$  is lower than  $L_q$ . This results on the need of introducing negative  $I_d$  to produce positive torque on the  $d$  axis.

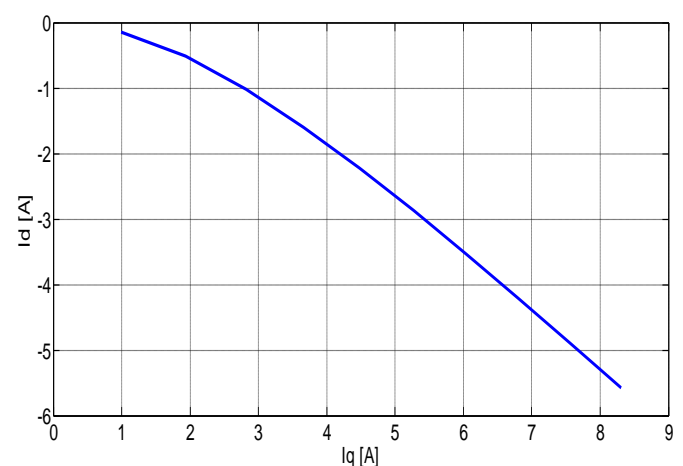


Figure 2.  $I_d$  vs  $I_q$  in MTPA condition

Using the previous  $I_d$  and  $I_q$  values for the MTPA case, the back-emf voltage values ( $EMF$ ) on  $q$  and  $d$  axes can be obtained by the use of the following equations [8][9]:

$$EMFq = We (\lambda pm + Ld.Id) \quad (9)$$

$$EMFd = -We.Lq.Iq \quad (10)$$

$$We = P.Wr \quad (11)$$

Where  $We$  and  $Wr$  are the electrical and mechanical speeds of the rotor respectively. If we plot  $EMFd$  vs  $EMFq$ , it can be observed in Fig. 3 the inverse relation between their amplitudes. The bigger the  $EMFq$ , the lower the  $EMFd$  module. This can be explained as the  $EMFd$  depending on  $q$ -axis variables and vice versa, as Equations 9 and 10 imply.

To implement the MTPA strategy, Equation 6 is replaced in 3 so that we can get  $Id$  in function of  $Iq$  as we can see in Equation 12.

$$Id = -\frac{\lambda pm}{2(Ld-Lq)} - \sqrt{\frac{\lambda pm^2}{4(Ld-Lq)^2} + Iq^2} \quad (12)$$

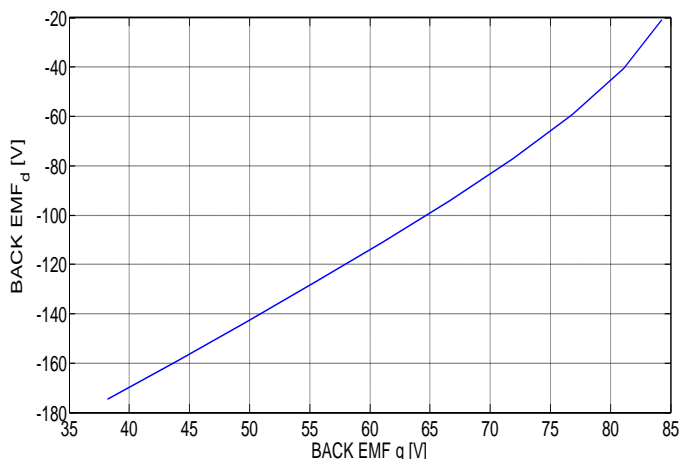


Figure 3. BACK\_EMFd vs BACK\_EMFq in MTPA condition

Then, replacing Equation 12 in 3 we finally have:

$$T = \frac{3}{2} P \left[ \frac{1}{2} \lambda pm.Iq - (Ld - Lq) \sqrt{\frac{\lambda pm^2.Iq^2}{4(Ld-Lq)^2} + Iq^4} \right] \quad (13)$$

Now, we need to bear in mind that the reference torque is the input of the system (as it depends from the machine's load) while  $Iq$  is the output. As in the previous Equation it is not simple to mathematically isolate  $Iq$ , we can give appropriate values to  $Iq$  to get their corresponding torque  $T$  components. If we do this we can plot  $Iq$  versus  $T$  as in Fig. 4 so that we could use a curve fitting method [12] to finally obtain an expression for  $Iq$  in function of the required torque  $T$ . To get enough accuracy when doing this procedure, a fifth polynomial degree curve for the fitting process was used (Equation 14). This mathematical approximation model presented a 95% of confidence bounds with a Root Mean

Squared Error (RMSE) of 1.65%. In fact, the fitting curve is very accurate as we can clearly observe in Fig. 5 where a deep zoomed area from the non-linear part of the original plot (Fig. 4) has been made.

$$Iq = a.T^5 + b.T^4 + c.T^3 + d.T^2 + e.T + f \quad (14)$$

Table 2. Fitting curve constants values

CONSTANT	VALUE
a	1.448E-6
b	-0.0001314
c	0.00469
d	-0.08753
e	1.249
f	0.02338

However, it must be mentioned that for the MTPA technique to work properly, the parameters of the machine ( $\lambda pm$ ,  $Ld$ ,  $Lq$ ) should not vary on time [13][14]. This is why it is very critical to provide nominal operation conditions for the motor as well to successfully control its temperature. Lastly, for a given required torque only  $Id$  is missing and it can be obtained by means of Equation 12.

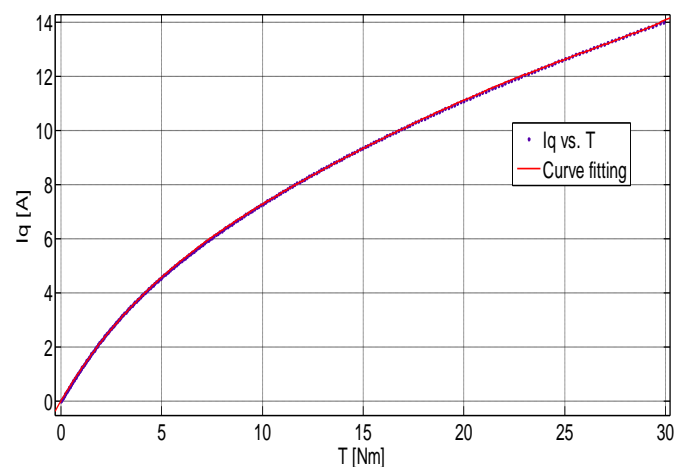


Figure 4. Iq vs T with equation (12) and curve fitting

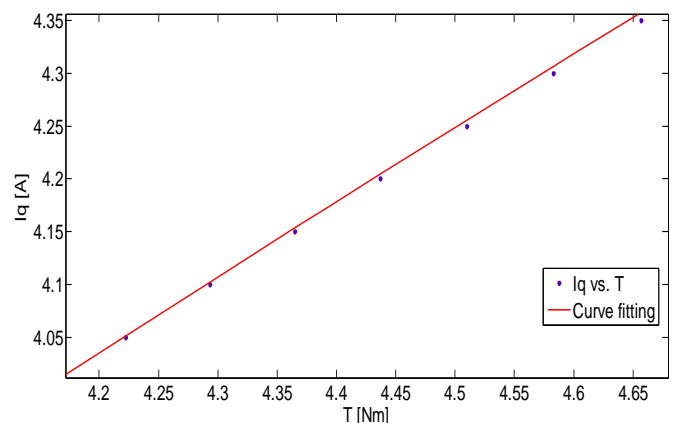


Figure 5. Iq vs T deep zoom with equation (12) and curve fitting

### 3. TORQUE CONTROL TOPOLOGY

The inner loop shown in the block diagram detailed in Fig. 6 has been used to perform the torque control of the IPMSM. The implementation of the torque control using PSIM® Software, including the control and power stages, is the one exposed in detail in Figs 7 and 8.

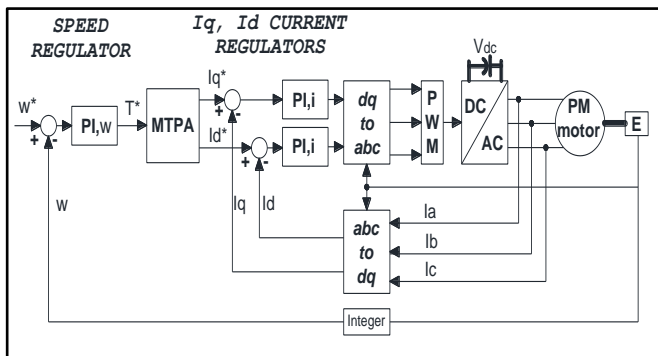


Figure 6. Torque control with MTPA strategy scheme

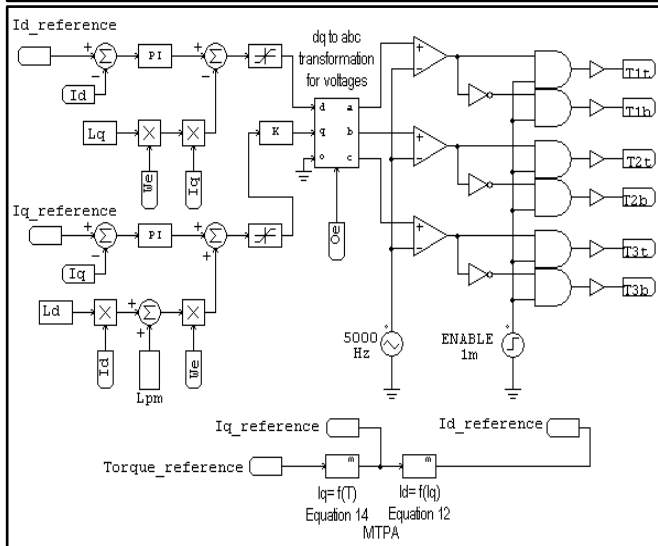
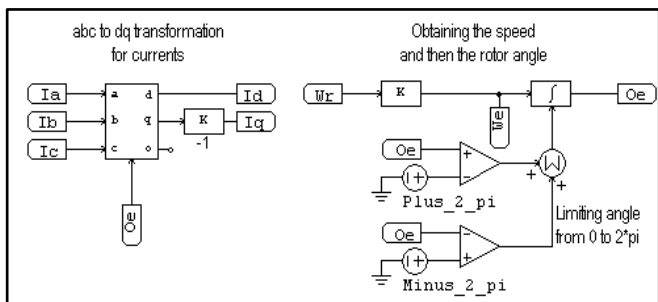


Figure 7. Torque control with MTPA strategy implemented in PSIM®

For the design of the  $I_q$  and  $I_d$  regulators, the selected closed loop bandwidth was 100 [Hz]. The closed loop structure is shown in Fig. 9, being  $L$  and  $R$ , the per-phase inductance and resistance of the motor. However, for the  $I_q$  and  $I_d$  regulators we consider  $L_q$  and  $L_d$  respectively for the design of the PI

controllers in Equations 15 and 16. Thus, we get for the  $I_q$  controller  $K_p=42.09$  with  $K_i=6.41$ , while for the  $I_d$  controller it was attained  $K_p=16.96$  and  $K_i=15.92$ .

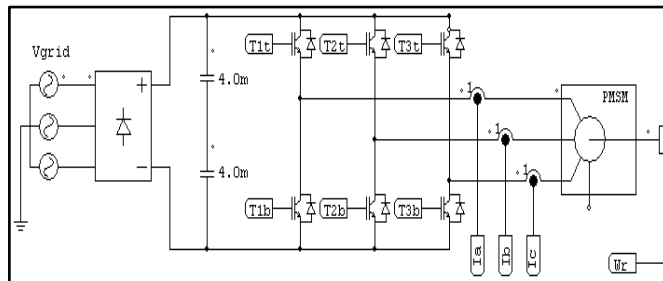


Figure 8. Power stage in PSIM® to achieve the MTPA strategy

$$K_p = 2 \cdot \pi \cdot \text{Bandwidth}_{\text{Hz}} \cdot L \tag{15}$$

$$K_i = R/L \tag{16}$$

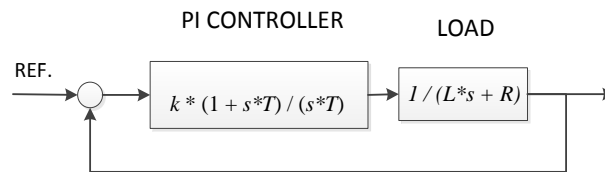


Figure 9. Closed loop PI Regulator scheme

To confirm a successful action of the controllers, we can verify the response time ( $T_r$ ) of the closed loop system which is the necessary time for the controlled variable to reach 63% of the commanded reference on a first order system. When the requested torque is 10 [Nm],  $I_q$  and  $I_d$  references in MTPA condition are set to 7.281 [A] and -4.635 [A] respectively. So, the 63% of the  $I_q$  reference is  $0.63 \cdot 7.281 = 4.58$  [A].

As in the PSIM® model the IGBT’s gate signals are enabled at 1 [ms], in Fig. 9 it can be confirmed that  $T_r$  is equal to 1.562 [ms] and it is the required time to reach 4.58 [A].

Now, considering control theory we could verify the bandwidth of the system by using Equation 17. Replacing the  $T_r$  obtained previously with the simulator, we get the bandwidth equal to 101.89 [Hz] which is practically the desired value.

$$\text{Bandwith [Hz]} = 1 / (2 \cdot \pi \cdot T_r) \tag{17}$$

Additionally, if we plot a Bode diagram for the system as in Fig. 11, it can be checked that with a magnitude of -3 [dB] the closed loop frequency response of the system is equal to 99.7 [Hz] which is again in a practical way the required value.



This fact again corroborates an appropriate design of the controllers.

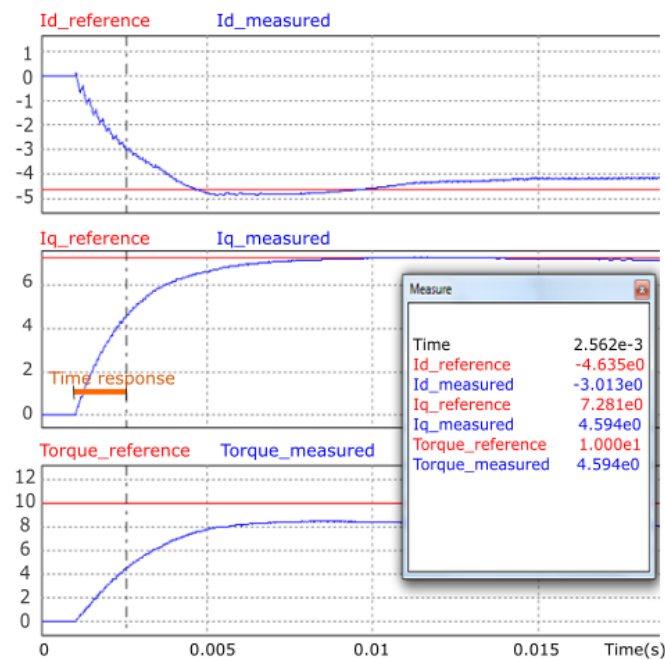


Figure 10. Closed loop time response  $T_r$  for current regulators

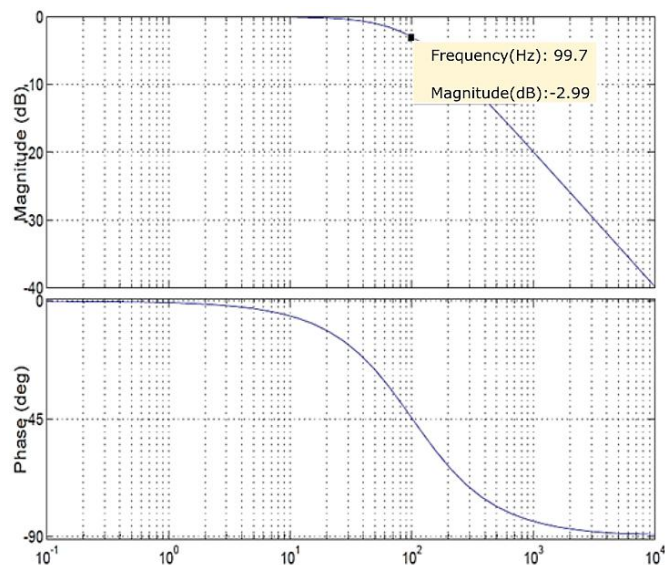


Figure 11. Bode diagram for the closed loop system

In order to briefly test if the MTPA technique was accomplished, we could simply change the phase angle advance ( $\varphi$ ) for the current. In MTPA condition, when 10 [Nm] is required,  $I_q=7.281$  [A] and  $I_d=-4.635$  [A]. This implies a total current of 8.631 [A] if we use Equation 6, this represents an advance angle  $\varphi = 32.48^\circ$ .

With the same amount of total current (8.631 [A]), if we change for example the angle  $\varphi$  to  $50^\circ$ , the currents are  $I_q=$

5.54 [A] and  $I_d=-6.61$  [A]. Replacing these values as well as the initially considered parameters of the machine in Equation 3, we obtain that the torque is equal to 8.91 [Nm]; which is a lower value than the one obtained with MTPA (10 [Nm]). It can be verified for different  $\varphi$  angles that the only one producing MTPA condition was the one achieved by means of the detailed methodology.

On the other hand, when talking about the response of the system, it must be mentioned that initially, the back-emf effect was neglected in the controllers. However, this produced an unwanted response on  $I_d$  especially as Fig. 12 reveals. After implementing back-emf compensation for the  $I_q$  and  $I_d$  current controllers, the  $I_d$  current and torque responses were improved as Fig. 13 reveals.

#### 4. SPEED CONTROL LOOP FOR THE IPMSM

Once the current controllers behave properly, the speed control loop (outer loop in Fig. 6) will be implemented with the same procedure used for the current regulators. The closed loop system has the same configuration as the one in Fig. 9, however this time the transfer function of the plant to be controlled is:

$$G(s) = \frac{1}{(J + J_{load})s + (B + K_1)} \quad (18)$$

Where,  $J$  and  $J_{load}$  are the machine's and load's moment of inertia respectively.  $J_{load}$  will be considered equal to 0.030 [kg.m<sup>2</sup>] while  $B$ , which is the friction coefficient of the machine will be obtained as Equation 19 exposes. There,  $\tau_{mech}$  is the mechanical time constant of the machine and it will be assumed to be equal to 0.3 [s] which is a typical value.

$$\tau_{mech} = \frac{J}{B} \quad (19)$$

For this case the PI constants for the speed regulator will be:

$$K_p = 2 \cdot \pi \cdot Bandwidth_{Hz} \cdot (J + J_{load}) \quad (20)$$

$$K_i = (B + K_1) / (J + J_{load}) \quad (21)$$

Thus, we have  $K_p=0.08765$  and  $K_i=3.379$ . Verifying the time response ( $T_r$ ) for the speed closed loop, we obtain the results exposed in Fig. 14 when requiring a set point rotor speed of 100 rad/s. There it can be verified that  $T_r$  is 31.4 [ms] (considering again that IGBT'S are enabled at 1 [ms]). Using Equation 17 the bandwidth of the system would be 5.06 [Hz] which is again in practical terms the desired 5 [Hz] bandwidth.

Several simulations were performed to confirm a good speed response of the system. Proper results were obtained at steady

state and during transients. In Fig. 15 it can be appreciated a successful system response when 100 [rad/s] were required as a rotor speed reference from zero to 0.2 [ms] and then the reference changed to 40 [rad/s] until 0.4 [ms]. As it can be observed, the proposed control technique presents a suitable dynamic response which is a relevant advantage against schemes based on online search algorithms that show a poor dynamic behavior [15] [16] and undesirable torque disturbance [17]. In PSIM® the employed elements to perform the speed control are exposed in Fig. 16.

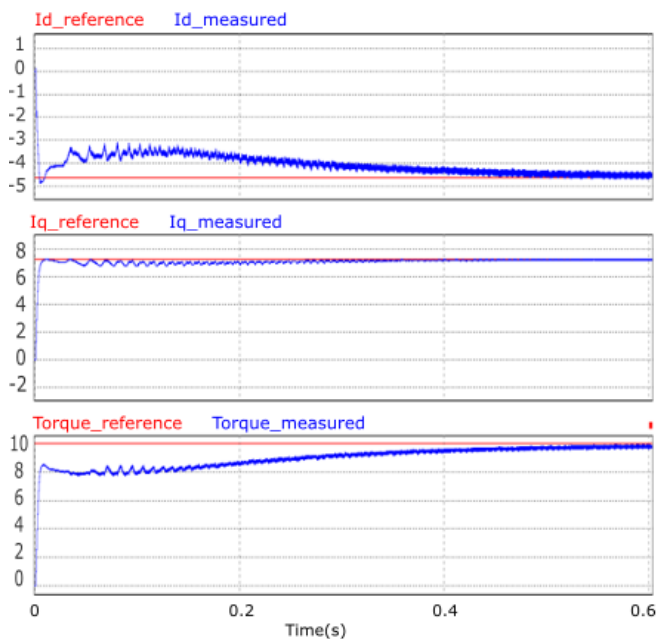


Figure 12. System response without back-emf compensation

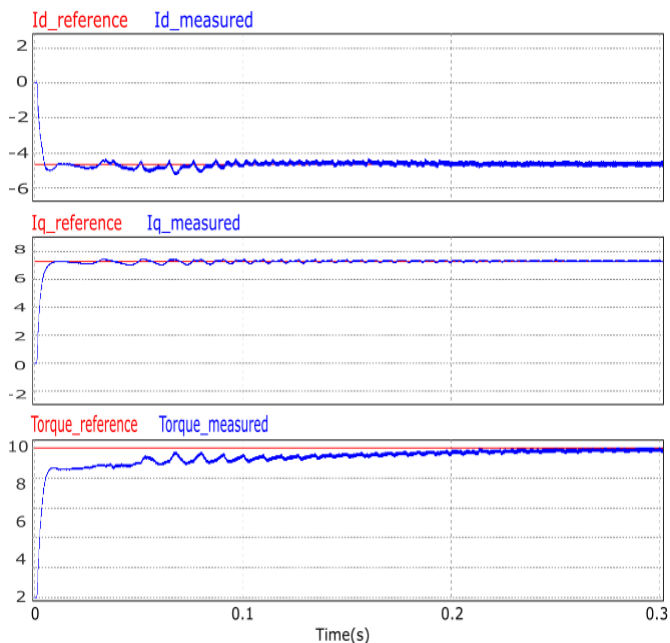


Figure 13. System response with back-emf compensation

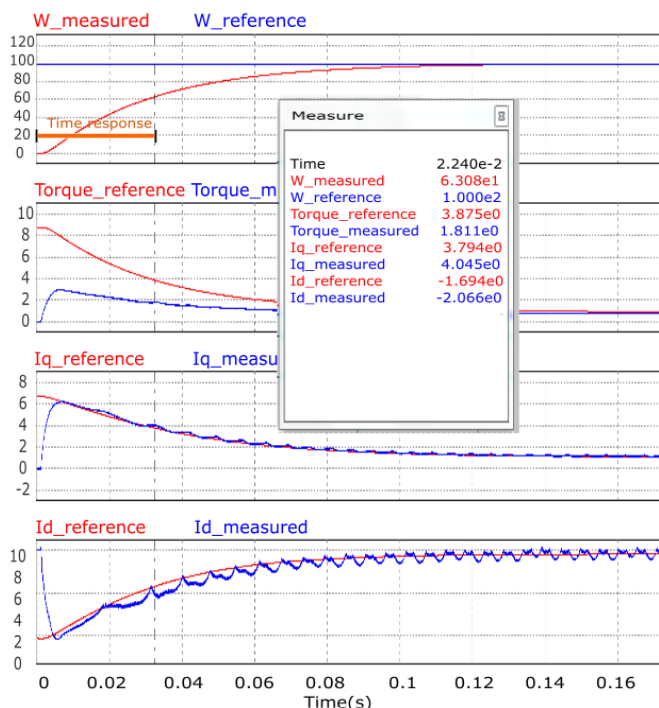


Figure 14. Speed closed loop system response time

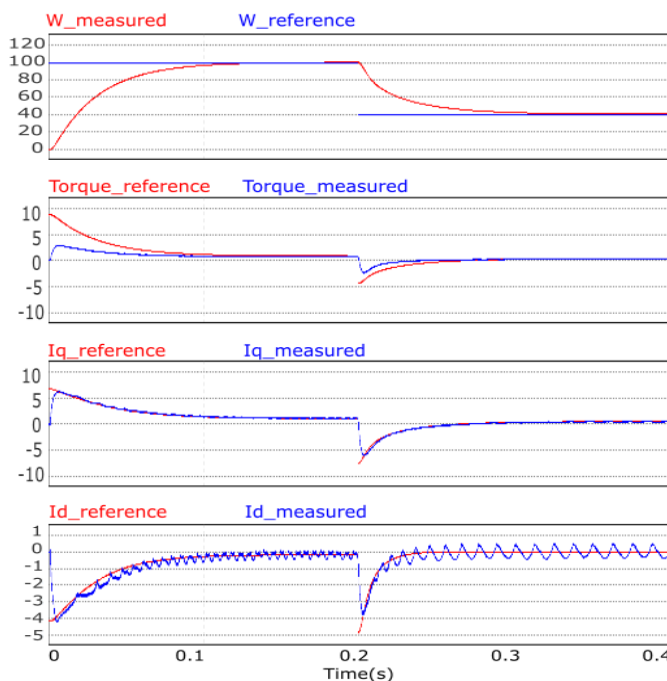


Figure 15. Speed closed loop system response

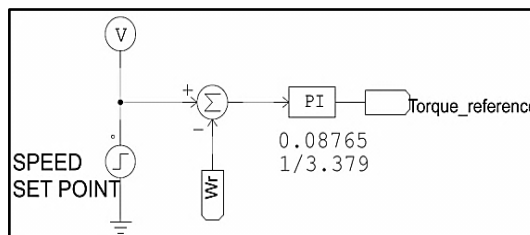


Figure 16. Speed control elements in PSIM®

## 5. CONCLUSIONS

In this paper, by means of a maximum torque per ampere strategy, a vector control for an IPMSM has been successfully implemented. The use of Park transformations was especially helpful as it permitted to track only two dc reference signals ( $I_d$  and  $I_q$ ) instead of three sinusoidal references. The proposed methodology has been validated by performing several simulation conditions in PSIM® software. Proper speed and torque control responses were attained on steady state and during transients. For the MTPA technique to be effective, nominal operating conditions should be given to the motor (mainly in terms of temperature) so that the parameters of the machine will not vary on time.

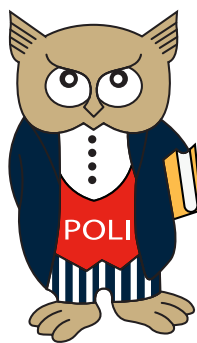
## 6. FUTURE WORK

As a part of future work, it is intended to consider non-linearities regarding the magnetic saturation and unwanted temperature effects of the motor that appear when working with higher current rates. Additionally, to improve the performance of the system, robust algorithms against unexpected parameter variations will be studied and used.

## REFERENCES

- [1] Pillay P. and Krishnan R., "Control characteristics and speed controller design of a high performance PMSM," in Proc. IEEE Ind. Appl. Soc.
- [2] Rudnicki, T.; Czerwinski, R.; Frechowicz, A., "Permanent magnet synchronous motor control driver," Mixed Design of Integrated Circuits and Systems, 2011 Proceedings of the 18th International Conference , vol., no.45., pp.545,548, 16-18 June 2011
- [3] Fodorean, D.; Szabo, L., "Control of a permanent magnet synchronous motor for electric scooter application," Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2012 International Symposium on , vol., no., pp.1178,1181, 20-22 June 2012
- [4] Fang, J.; Heising, C.; Staudt, V.; Steimel, A., "Permanent-Magnet Synchronous Machine model for urban transport applications", Optimization of Electrical and Electronic Equipment, 2010 12th International Conference on , vol., no., pp.358,363, 20-22 May 2010
- [5] Shoudao Huang; Ziqiang Chen; Keyuan Huang; JianGao, "Maximum torque per ampere and flux-weakening control for PMSM based on curve fitting," Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2010 IEEE , vol., no., pp.1,5, 1-3 Sept. 2010
- [6] Odhano, S; Giangrande, P; Bojoi, R., "Self-commissioning of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Drives With High-Frequency Current Injection", IEEE Transactions on Industry Applications, vol, no 50, issue: 5, March 2014
- [7] Hassan, A.and. Azzam, M; "Robust control of a speed sensorless permanentmagnet synchronous motor drive", Faculty of Engineering. El-Minia University, El-Minia, Egypt.
- [8] D.W. Novotny and T.A. Lipo, "Vector Control and Dynamics of AC Drives", Oxford University Press, New York, 1998.B.
- [9] Kitajima, J.; Ohishi, K., "Rapid and stable speed control of SPMSM based on current differential signal," Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima 2014 - ECCE-ASIA), 2014 International , vol., no., pp.1247,1252, 18-21 May 2014
- [10] PSIM User`s guide, Version 9.0, Release 3, May 2010. Available at: [www.powersimtech.com](http://www.powersimtech.com)
- [11] Maekawa, S.; Hinata, T.; Suzuki, N.; Kubota, H., "Study of low speed sensorless drives for SPMSM by controlling elliptical inductance," Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima 2014 - ECCE-ASIA), 2014 International , vol., no., pp.919,924, 18-21 May 2014
- [12] Guest, P., "Numerical Methods of curve fitting paperback", Cambridge University Press, London, 2012.
- [13] Kim, Sang Min; Kwon, Taesuk, "A simple method to minimize effects of temperature variation on IPMSM control in real-time manner," Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2014 IEEE , vol., no., pp.4212,4217, 14-18 Sept. 2014
- [14] Gubae Rang; Jaesang Lim; Kwanghee Nam; Hyung-Bin Ihm; Ho-Gi Kim, "A MTPA control scheme for an IPM synchronous motor considering magnet flux variation caused by temperature," Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2004. APEC '04. Nineteenth Annual IEEE , vol.3, no., pp.1617,1621 Vol.3, 2004
- [15] Ahmed, A., "Maximum torque per ampere (MTPA) control for permanentmagnet synchronous machine drive system", Master Thesis, University of Akron, Ohio-USA
- [16] Antonello, R.; Carraro, M.; Zigliotto, M., "Towards the automatic tuning of MTPA algorithms for IPM motor drives," Electrical Machines (ICEM), 2012 h International Conference on , vol., no., pp.1121,1127, 2-5 Sept. 2012

- [17] Mademlis, C.; Kioskeridis, I. and Margaris, N., "Optimal efficiency control strategy for interior permanent-magnet synchronous motor drives," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 19, no. 4, pp. 715–723, Dec. 2004.



[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)