

## Laboratorio Virtual “Si 1-StubMatch” para el Diseño de Acopladores de Impedancias usando Brazos Reactancia

PORRAGAS, Luis\*†, MARÍN, Luis, VÁZQUEZ, Alejandro y PORTILLO, Rogelio.

Recibido Abril 20, 2016; Aceptado Junio 16, 2016

### Resumen

Un proceso fundamental en el diseño de circuitos de RF es la adaptación de impedancias, este trabajo presenta un método complementario a los tradicionales considerando el uso de la carta de Smith como herramienta electrónica e implementada en forma de un simulador interactivo, cuyo objetivo fundamental es mostrar paso a paso la metodología de diseño y aplicar eficientemente los brazos reactancia sencillos impactando en la mejora del proceso de enseñanza-aprendizaje a través del desarrollo de una herramienta didáctica y tecnológica que facilite y fomente el autoaprendizaje que conlleve a la aplicación práctica del conocimiento. Esta herramienta consiste en un Laboratorio Virtual interactivo con una interfaz gráfica amigable que permite seguir la metodología de diseño de los acopladores bajo la técnica del Brazo Reactancia Sencillo, aprovechando las ventajas del método gráfico de la Carta de Smith y favoreciendo la reducción de errores de interpretación y el tiempo de realización al implementarse mediante un programa. La validación del simulador se desarrolla con casos prácticos reales, y se hace una comparación con herramientas computacionales existentes, mostrando su alta efectividad y ventajas para su uso como herramienta de apoyo.

**Brazo Reactancia, Carta de Smith, Acoplamiento de Impedancias, Lineas de Transmisión**

### Abstract

A fundamental process in the design of RF circuits is impedance matching, this paper presents a complementary method to traditional considering using the Smith chart as electronics and implemented tool in the form of an interactive simulator, whose main objective is the design and efficiently implement single stub match and improve the teaching-learning process through the development of an educational and technological tool that facilitates and promotes self-study that may lead to the practical application of knowledge. This tool is an interactive Virtual Laboratory with a friendly graphical interface that allows you to follow the design methodology of the impedance matching under the technical single stub match, taking advantage of the graphical method of the Smith Chart and favoring the reduction of misinterpretations and the completion time to be implemented by a program. Simulator validation develops practical situations, and a comparison with existing computational tools is showing its high effectiveness and advantages for use as a support tool; while its impact on student learning was measured through surveys and tests applied to them.

**Single Suth, Smith Chart, Impedance Matching, Transmission Line**

**Citación:** PORRAGAS, Luis, MARÍN, Luis, VÁZQUEZ, Alejandro y PORTILLO, Rogelio. Laboratorio Virtual “Si 1-StubMatch” para el Diseño de Acopladores de Impedancias usando Brazos Reactancia. Revista de Tecnología e Innovación 2016, 3-7: 13-21

\* Correspondencia al Autor (Correo electrónico: lporragas@uv.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

## Introducción

Los equipos de cómputo ofrecen grandes ventajas de procesamiento matemático asociado a velocidad y exactitud, lo que converge en una herramienta efectiva y eficiente para el análisis y diseño de sistemas de RF, en particular en el diseño de acopladores de impedancia cuando los sistemas a interconectar presentan diferentes valores nominales en sus terminales de entrada/salida. Actualmente, el desarrollo de ambientes virtuales constituye una herramienta imprescindible en los procesos de enseñanza aprendizaje, ya que los ambientes gráficos e interactivos facilitan el entendimiento y la interrelación del usuario con las diferentes variables involucradas en un sistema real. Con respecto al diseño de acoplamientos empleados en los sistemas de líneas de transmisión y en muchos sistemas de RF, la carta de Smith es un método gráfico que permite determinar los parámetros mínimos de diseño del acoplador con relativa facilidad y rapidez, siempre que se tenga cierta experiencia con la aplicación de los procedimientos asociados. Como objetivo particular de este laboratorio, se busca ilustrar el proceso de diseño a través de una interfaz gráfica que permita interactuar al usuario con los trazos a realizar y la interpretación de los valores obtenidos en la carta de Smith, proporcionando una excelente herramienta de enseñanza aprendizaje a nivel ingeniería para resolver los problemas de acoplamiento de líneas de transmisión empleando brazos reactancia sencillos.

La interfaz permite establecer las especificaciones iniciales del sistema y la visualización paso a paso de los trazos necesarios en la carta de Smith, así como de los diferentes valores arrojados por el simulador de manera exacta y sistemática, lo cual ayuda a evitar los errores de interpretación por parte del usuario.

Así mismo, mostrar la vinculación de cada movimiento en la carta de Smith, con su respectivo cambio físico en el sistema a acoplar. La versión desarrollada maneja una interfaz amigable e interactiva que muestra los cambios relativos a los 2 parámetros de diseño del brazo reactancia sencillo siendo estos: la ubicación o posición del brazo en el sistema ( $d$ ) y la longitud necesaria del mismo ( $l$ ). El simulador muestra diversos valores relacionados con las variables involucradas en la metodología del diseño a lo largo del proceso, de manera similar que algunos de los simuladores más citados en referencias electrónicas como por ejemplo los simuladores interactivos “*single stub tuning*” de ©Amanogawa (Amanogawa.com, Parallel Stub Tuning, 2010) (Amanogawa.com, Serie Stub Tuning, 2010), o los programas de procesamiento matemático tales como Matlab® o MathWorks®; el laboratorio virtual **Si 1-StubMatch** pretende incorporar las bondades de estos programas en una sola interface gráfica amigable y confiable al usuario.

La carta de Smith es esencialmente una “*calculadora gráfica*” que permite que desarrollos matemáticos relativamente complicados que utilizan diversas técnicas algebraicas y números complejos, puedan ser reemplazados por construcciones geométricas de fácil interpretación. Esto ayuda a realizar adaptaciones de impedancia con un mínimo de trazos sobre la carta de Smith en lugar de cálculos laboriosos y tardados.

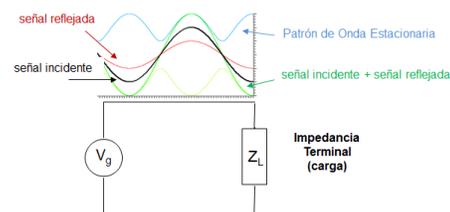
Durante la década de los 40 (1939 se publicó (Smith, 1939)), la Carta de Smith ha sido un auxiliar en el diseño manual de procedimientos de síntesis y análisis de acoplamientos de impedancias; sin embargo, actualmente este procedimiento o método de cálculo no es eficiente ya que presenta una exactitud limitada debido a la acumulación de errores de interpretación (humanos) en cada uno de los pasos realizados; debido a esto, existe un gran interés en automatizar esta herramienta gráfica para mejorar los procesos de diseño y de enseñanza-aprendizaje con la finalidad de lograr una solución eficiente en diferentes problemáticas de aplicación práctica de la ingeniería (principalmente en el área de RF). Muchos de estos desarrollos se basan por lo general en objetos diseñados en Java® (Amanogawa.com, Parallel Stub Tuning., 2010) (Amanogawa.com, Serie Stub Tuning, 2010) o animaciones en Flash® (Ramos, 2012) siendo muy pocos hasta ahora los desarrollados en LabView®. Java® se emplea generalmente cuando se necesita velocidad o tener una simulación muy compleja, Flash® tiene más ventajas para aplicaciones *e-learning*s y LabView® es una plataforma y entorno de desarrollo para diseñar sistemas, con un lenguaje de programación visual gráfico para aplicaciones en tiempo real, se aplicaba principalmente para soluciones industriales, pero actualmente se está incrementando su uso en el desarrollo de equipos educativos y de investigación interactuando con diferentes lenguajes y aplicaciones como NET®, ActiveX®, Multisim®, Matlab®/Simulink® y AutoCAD®.

El resto del trabajo se estructura como sigue: en la Sección 2 se describen las principales características del acoplamiento de impedancias y la justificación de su diseño en dicho proceso.

El desarrollo del simulador para el diseño de los mismos es tratado en la Sección 3, con algunos resultados de validación y comparación, y por último en la Sección 4, se plantean las conclusiones generales del trabajo.

### Acoplamientos de Impedancias.

En la práctica, las líneas de transmisión son el medio de interconexión entre una etapa generadora de señales (transmisor o etapa precedente) y una etapa receptora (etapa terminal o carga), donde regularmente su impedancia característica difiere de las impedancias de estas etapas. Esto genera un patrón estacionario en la línea como resultado de la suma instantánea de ondas reflejadas viajando en sentido inverso a la señal incidente proveniente de la etapa generadora. Este patrón de distribución de energía no uniforme a lo largo de la línea de transmisión como se observa en la Figura 1, se denomina “Patrón de Onda Estacionaria”.



**Figura 1** Patrón de Onda Estacionaria.

Para líneas de transmisión de energía o de información, la reflexión de potencia habitualmente es perjudicial, y está acompañada de sobretensiones y sobrecorrientes en la línea de transmisión; además, la distribución no uniforme de la potencia a lo largo de la línea genera puntos con elevadas concentraciones de temperatura (puntos calientes). Estas pérdidas por retorno deben reducirse al máximo, por lo que una técnica consiste en introducir una sección o tramo de línea de transmisión entre la línea de transmisión original y la carga, de tal modo que en las terminales de entrada de esta sección no se presente señal reflejada en este punto la impedancia es igual a la impedancia característica de la línea de transmisión; esto se conoce como adaptación de impedancia. (Neri R, Febrero 2013) (Blake, 2004)

Un buen sistema de acoplamiento es indispensable y representa la base para el funcionamiento óptimo de los sistemas. El objetivo de diseño es lograr que el valor del Coeficiente de Reflexión “ $\Gamma$ ” sea mínimo (muy pequeño, idealmente cero), de modo que la potencia transferida a la carga sea máxima. Por lo general, un acoplamiento se considera aceptable si su magnitud se maneja en el rango de  $|\Gamma| \leq 0.3$  (Neri R, Febrero 2013) (Blake, 2004). Los parámetros que definen usualmente las características de reflexión en una línea de transmisión son la Razón de Onda Estacionaria (ROE) y el Coeficiente de Reflexión ( $\Gamma$ ). En esencia, es una medida de la falta de compensación entre la impedancia de carga y la impedancia característica de la LT. La ROE se puede considerar como una figura de mérito inversa, y se puede medir, esta es su principal ventaja sobre el coeficiente de reflexión ( $\Gamma$ ), el cual es más útil y se emplea más en los cálculos. La ROE y el  $\Gamma$  se relacionan a partir de la ecuación 1:

$$ROE = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} \quad (1)$$

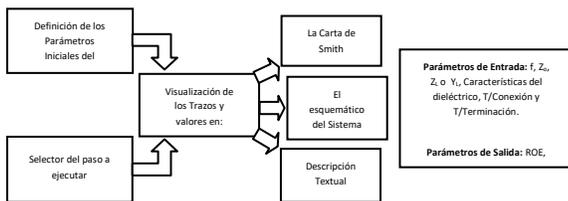
Su valor ideal es 1 y el pésimo  $\infty$ , algunas bibliografías consideran su rango práctico entre 1.5 y 2 ( $1.5 \leq ROE \leq 2.0$ ) (Neri R, Febrero 2013) (Blake, 2004), con estos valores de ROE y  $\Gamma$  prácticos, se entrega a la carga entre el 89% y el 96% de la potencia incidente ( $96\% \geq P_{\text{carga}} \geq 89\%$ ,  $0.2P_{\text{inc}} \leq P_{\text{ref}} \leq 0.333P_{\text{inc}}$ ).

Existen diferentes técnicas de acoplamiento dependiendo del rango de frecuencias de trabajo del acoplador, las más comunes son a través de circuitos como son las redes acopladoras tipo “L”, “T” y “ $\pi$ ” para bajas frecuencias; y mediante el uso de tramos de líneas de transmisión como elementos simulados para alta frecuencia, tales como los transformadores de un cuarto de longitud de onda ( $\lambda/4$ , inversores de impedancia) y los brazos reactancias (sencillo, doble y triple). En general, no es posible que el acoplador trabaje eficientemente en un rango amplio de impedancias, puesto que las condiciones del acoplador varían si la carga o algún parámetro del sistema como la frecuencia cambian; estas situaciones requieren el diseño de adaptadores o redes de adaptación de mayor ancho de banda o dinámicas, es decir, sintonizables.

### Laboratorio Virtual 1-StubMatch

Considerando el análisis preliminar con respecto a las ventajas que LabView® brinda como herramienta de aplicación, se ha desarrollado el laboratorio virtual denominado *Si 1-StubMatch*, este simulador se basa en una carta de Smith electrónica (Si-CSmith (Porrugas, 2014)) con una interfaz gráfica a través de la cual se despliegan los parámetros básicos para el diseño y análisis de problemas de acoplamiento de impedancias empleando brazos reactancia.

Aun cuando existen herramientas más sofisticadas, *Si 1-StubMatch* se distingue por su simplicidad, facilidad de uso y la confiabilidad de sus resultados, además, de ser uno de los primeros gráficos interactivos de la carta de Smith completamente desarrollado en LabView®. Una razón importante que justifica el desarrollo de herramientas que simulen y apliquen la carta de Smith, es ayudar a entender los cambios que se producen al variar parámetros como la carga, la longitud de la línea o la posición a lo largo de la línea, obteniendo así información valiosa del comportamiento de sistemas específicos. Para el diseño del laboratorio se ha empleado LabView® como herramienta gráfica ya que permite una implementación modular a partir de sub-instrumentos (“SubVI’s”, subrutinas) para ejecutar tareas específicas y lograr así una reducción y simplificación en la estructura final y una posible reutilización de los subVI’s en otras aplicaciones similares. La Figura 2 muestra los módulos principales que integran el laboratorio virtual *Si 1-StubMatch*.



**Figura 2** Módulos (SubVI’s) del laboratorio Virtual Si 1-StubMatch.

El programa consta de 5 módulos primarios (los cuales definen los subVI’s) 2 de ellos son a través de los cuales el usuario interactúa con el simulador: a través del primero se alimentan los datos iniciales al simulador, con el segundo el usuario controla paso a paso el proceso de diseño del acoplador.

Los otros 3 módulos son de salida a través de los cuales el simulador proporciona la información útil al usuario en tres representaciones: la primera mostrando su ubicación en el circuito o sistema, la segunda en la carta de Smith o de manera descriptiva a través de una ventana de texto y la tercera mostrando los valores numéricos resultantes de los trazos en la carta.

Para el caso de líneas de baja pérdida, siendo esta la consideración tomada en los acopladores que emplean tramos de líneas (brazos reactancia) para su implementación, ya que su longitud es relativamente pequeña y por lo tanto las pérdidas son despreciables, la Ec.2 describe la relación de la impedancia de entrada “ $Z_{ent}$ ” en términos del coeficiente de reflexión  $\Gamma$  :

$$Z_{ent}(l) = Z_o \left( \frac{V_{inc} e^{-j\beta l} + V_{ref} e^{+j\beta l}}{V_{inc} e^{-j\beta l} - V_{ref} e^{+j\beta l}} \right) \quad (2)$$

Empleando la identidad de Euler definida por:  $e^{\pm j\beta l} = \cos(\beta l) \pm j \sin(\beta l)$  y la Ec.2, se obtiene la Ec.3, la cual permite determinar la impedancia de entrada considerando una longitud determinada de línea considerando a la misma de baja pérdida.

$$Z_{ent}(l) = Z_o \frac{Z_L \cos(\beta l) + j Z_o \sin(\beta l)}{Z_o \cos(\beta l) + j Z_L \sin(\beta l)} \quad (3)$$

Dónde:

$Z_{ent}(l)$ .- Es la impedancia vista en las terminales de entrada de la línea de transmisión a la distancia “ $l$ ” en referencia a la carga.

$Z_L$ .- Es la impedancia de carga (impedancia en el extremo terminal de la línea de transmisión).

$Z_o$ .- Es la impedancia característica de la línea de transmisión.

$\beta$ .- Es la constante de fase de la línea de transmisión.

$l$ .- Es la distancia o ubicación del punto de medición respecto a la carga.

A partir de la ecuación 2 se despeja la ubicación o distancia “ $l$ ”, la cual representa el punto de conexión del acoplador “ $d$ ” en función de la impedancia característica ( $Z_0$ ) y la impedancia terminal ( $Z_L$ ); lo cual implica cálculos laboriosos y bastante tiempo de resolución; esto se simplifica enormemente empleando el método gráfico de la carta de Smith y más aún si su implementación es mediante un programa.

El método propuesto para determinar la impedancia de entrada en una línea de baja pérdida con una longitud determinada, es mediante el uso del laboratorio virtual **Si 1-StubMatch**, el cual está basado en el método gráfico de la Carta de Smith, implicando una serie de pasos bien definidos:

1. Normalización de la impedancia de carga ( $Z_L$ ) en función de la impedancia característica ( $Z_0$ ) y su ubicación en la Carta de Smith.
2. Dibujar el círculo de la ROE tomando el centro de la carta y como radio la distancia al punto ubicado de la impedancia de carga normalizada.
3. Desplazarse en sentido horario (implica desplazarse de la carga hacia el generador) la distancia “ $l$ ” a la que se quiere determinar la impedancia de entrada. A lo largo del arco del círculo se pueden apreciar los diferentes valores de impedancia a lo largo de la línea de transmisión. En este caso se debe utilizar la escala periférica es decir en longitud de onda hacia el generador, recordando que esta es la longitud de onda en el medio o dentro de la línea de transmisión, que puede diferir de la longitud de onda de espacio libre.

4. Establecido el punto final se desnormaliza la impedancia, siendo este el valor de la impedancia a la entrada de la línea de transmisión  $Z_{ent}(l)$ .

En la Figura 3 se muestra el diagrama de flujo para la utilización del simulador **Si 1-StubMatch**.

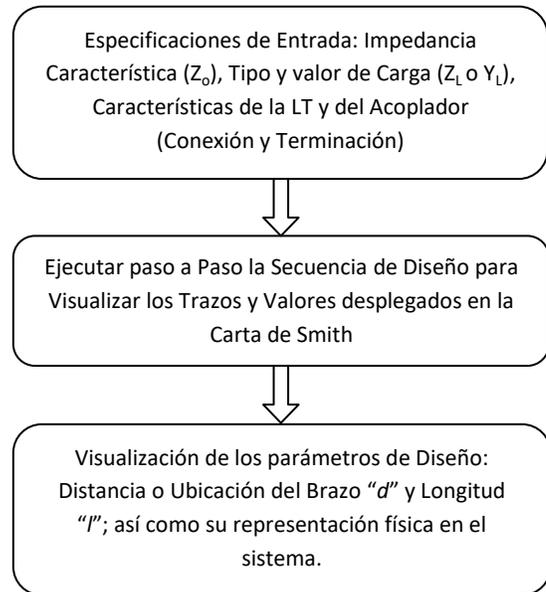


Figura 3 Diagrama para el uso de Si 1-StubMatch.

### Resultados del uso del laboratorio virtual si 1-stub match

En la Figura 4 se muestra la interfaz gráfica de **Si 1-StubMatch**, en la que se pueden visualizar al mismo tiempo todos los resultados obtenidos de las diferentes variables eléctricas a considerar en un análisis.

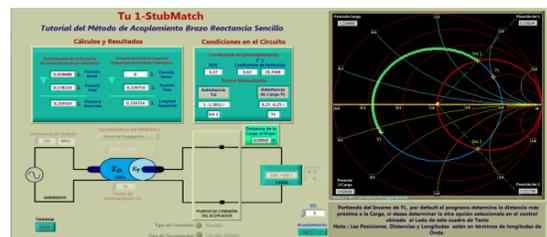


Figura 4 Interface gráfica de Si 1.StubMatch.

La validación del instrumento se basa en múltiples pruebas de diseño con problemas resueltos en diferentes bibliografías y otros simuladores (Amanogawa.com, Parallel Stub Tuning., 2010) (Ramos, 2012). En particular, se plantea un problema cuyos parámetros de entrada son: La frecuencia de trabajo  $F_{gen}= 300$  MHz, la Impedancia Característica de la Línea  $Z_0=50\Omega$  y su Factor de Propagación=1, la Impedancia de Carga  $Z_L=100+j100 \Omega$ , y las características del brazo a conectar, es este caso en paralelo y terminado en corto circuito; los parámetros a calcular son:

- a) Coeficiente de Reflexión,
- b) Razón de Onda Estacionaria.
- c) Especificaciones del Acoplador: distancia de conexión y longitud del brazo (2 opciones) y
- d) Impedancia normalizada en el punto de conexión del brazo. El planteamiento del problema se representa de manera gráfica en la Figura 5.

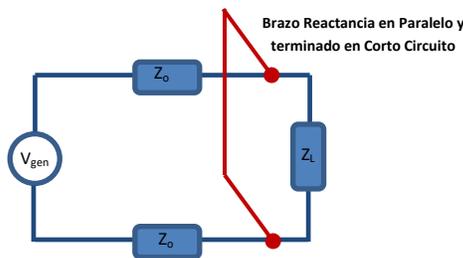


Figura 5 Planteamiento del problema. (Neri R, Febrero 2013).

Siguiendo el procedimiento establecido, los resultados se muestran en la Tabla 1, en la que se realiza una comparación con instrumentos virtuales similares con otras plataformas de desarrollo y cuyos paneles se muestran en las Figuras 6 y 7 respectivamente.

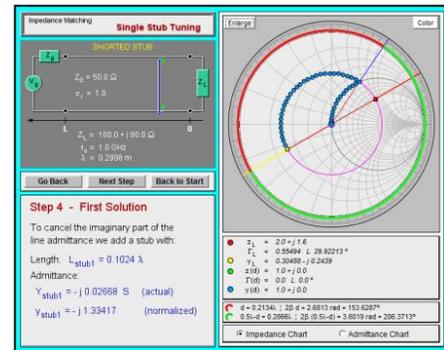


Figura 6 Panel gráfico del simulador hecho en Java® (Amanogawa.com, Parallel Stub Tuning., 2010).

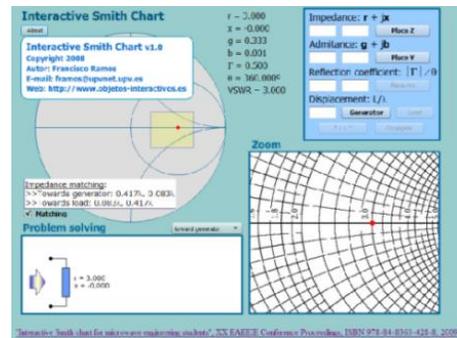


Figura 7 Panel gráfico del simulador hecho en Flash® (Ramos, 2012).

Inciso		Si 1-StubMatch	Instrumento En Java®	Instrumento En Flash®
a) ROE		4.2656	2.618	4.266
b) $\Gamma$	Mag $\Gamma_L$	0.6202	0.62017	0.620
	Ang $\Gamma_L$	29.7449°	29.7448°	29.745°
	$P_{YL}$	0.458688 $\lambda$	No la calcula	No la calcula
d) $P_{int}$	$P_{int1}$	0.178234 $\lambda$	No la calcula	No la calcula
	$P_{int2}$	0.321766 $\lambda$	No la calcula	No la calcula
e) $d_{Brazo}$	$d_{min}$	0.219547 m	0.2195 $\lambda$ (158.07°)	0.220 $\lambda$
	$d_{max}$	0.363078 m	0.3631 $\lambda$ (261.41°)	0.363 $\lambda$
f) $l_{Brazo}$	$l_{min}$	0.0897543 m	0.0898 $\lambda$	No la calcula
	$l_{max}$	0.410246 m	0.4102 $\lambda$	No la calcula
e) $B_{frec}$	$f_{min}$	No lo calcula	283.5 / 317.1 MHz	No la calcula
	$f_{max}$	No lo calcula	291 / 306.9 MHz	No la calcula
	BW	No lo calcula	33.6 / 15.9 MHz	No la calcula

**Tabla 1** Valores obtenidos del Problema propuesto en cada uno de los simuladores.

De la comparación de los resultados anteriores, se pudo comprobar y validar la precisión y exactitud del instrumento, así como su versatilidad, facilidad, simplicidad y capacidad para la presentación de los resultados lo cual repercute directamente en el fácil entendimiento y fijación del conocimiento sobre el diseño de brazos reactancias sencillos aplicando el método gráfico de la carta de Smith.

## Conclusiones

Las técnicas analíticas suelen ser la mejor forma de abordar un problema y comprender el comportamiento del mismo. Por otra parte, las técnicas de análisis son a menudo el primer paso cuando se buscan resultados numéricos. Se desarrolló este tutorial interactivo del método de acoplamiento el brazo reactancia sencillo en forma de laboratorio virtual totalmente en LabView®.

Este recurso educativo dirigido a estudiantes de ingeniería eléctrica, electrónica y telecomunicaciones permite el estudio, análisis e interpretación del proceso de diseño de los acopladores bajo la técnica del brazo reactancia sencillo de una forma más rápida y amigable.

Los estudiantes encontraron a **Tu 1-Stub Match** una herramienta atractiva, innovadora, de fácil uso y con grandes ventajas en la reducción de los tiempos de resolución de los problemas y en la adquisición y fijación del conocimiento, así como la asimilación práctica de la técnica del brazo reactancia sencillo para un adecuado diseño y aplicación.

De la comparación de los resultados mostrados en la Tabla 1, se pudo comprobar y validar la precisión y exactitud del instrumento, así como su versatilidad, facilidad, simplicidad y capacidad para la presentación de los resultados, lo cual repercute directamente en el fácil entendimiento por parte del usuario del procedimiento para acoplar una línea de transmisión con la técnica del brazo reactancia sencillo aplicando el método gráfico de la carta de Smith.

De las comparativas realizadas entre las interfaces se pueden sintetizar las siguientes diferencias.

- El Si **1-StubMatch** es una interface que muestra cada uno de los trazos realizados, lo cual le permite al usuario seguir cada uno de los pasos a su propio ritmo de ejecución hasta completar el acoplamiento. Inclusive, en cualquier momento le permite regresar para realizar al paso inmediato anterior o a los que sean necesarios.
- El **Si 1-StubMatch** tiene una mayor interactividad al permitir que el usuario decida las características del acoplador y la secuencia de acoplamiento.

- En el Simulador en Java® (Amanogawa.com, Parallel Stub Tuning., 2010) (Amanogawa.com, Serie Stub Tuning, 2010) solo es posible decidir el tipo de terminación del brazo en caso de querer conectarlo diferente (serie o paralelo) usando otro simulador, es decir, se necesitan 2 programas.
  - En el Simulador de Flash® (Ramos, 2012) la interface no es nada amigable además de no mostrar la metodología de diseño ni explica cómo o de dónde salen los valores numéricos de acoplamiento, por lo que para el usuario con poca experiencia la información es difícil de interpretar para su aplicación práctica.
  - El **Si 1-StubMatch** brinda la ventaja de ser una interfaz en español siendo más amigable al usuario, además de contar con un cuadro de texto en el que se describe de manera detallada el procedimiento que acompaña los trazos en la carta y en condiciones en el circuito.
  - Los resultados obtenidos por el **Si 1-StubMatch** son bastante similares a los del simulador de Java®, cuya discrepancia radica en la resolución empleada, esto es posible ajustarse con el inconveniente de sacrificar el tiempo de ejecución.
- [4]. Amanogawa Parallel Stub Tuning. <http://www.amanogawa.com/archive/SingleStub/SingleStub-2.html>
- [5]. Amanogawa Serie Stub Tuning. <http://www.amanogawa.com/archive/SeriesStub/SeriesStub-2.html>
- [6]. F.Ramos. Interactive Smith Chart (online) <http://labvirtual.webs.upv.es/smith.htm>
- [7]. L. Porrugas. Laboratorio Virtual Interactivo **Si-CSmith** (Simulador para el Análisis y Aplicación del Método Gráfico de la Carta de Smith). Innovación Tecnología y Educación (CIVITEC 2014). Tomo 5 Ingenierías, pp 962-971.

## Referencias

- [1]. Smith P. (1939). "Transmission-Line Calculator". Electronics. Vol. 12, No.1, pp 29-31.
- [2]. Neri R. & Porrugas L. (Febrero 2013). Líneas de Transmisión. Veracruz, México: Universidad Veracruzana. pp. 182-196.
- [3]. Blake R. (2004). Sistemas Electrónicos de Comunicaciones. México: Thompson Intl. pp. 182-196.