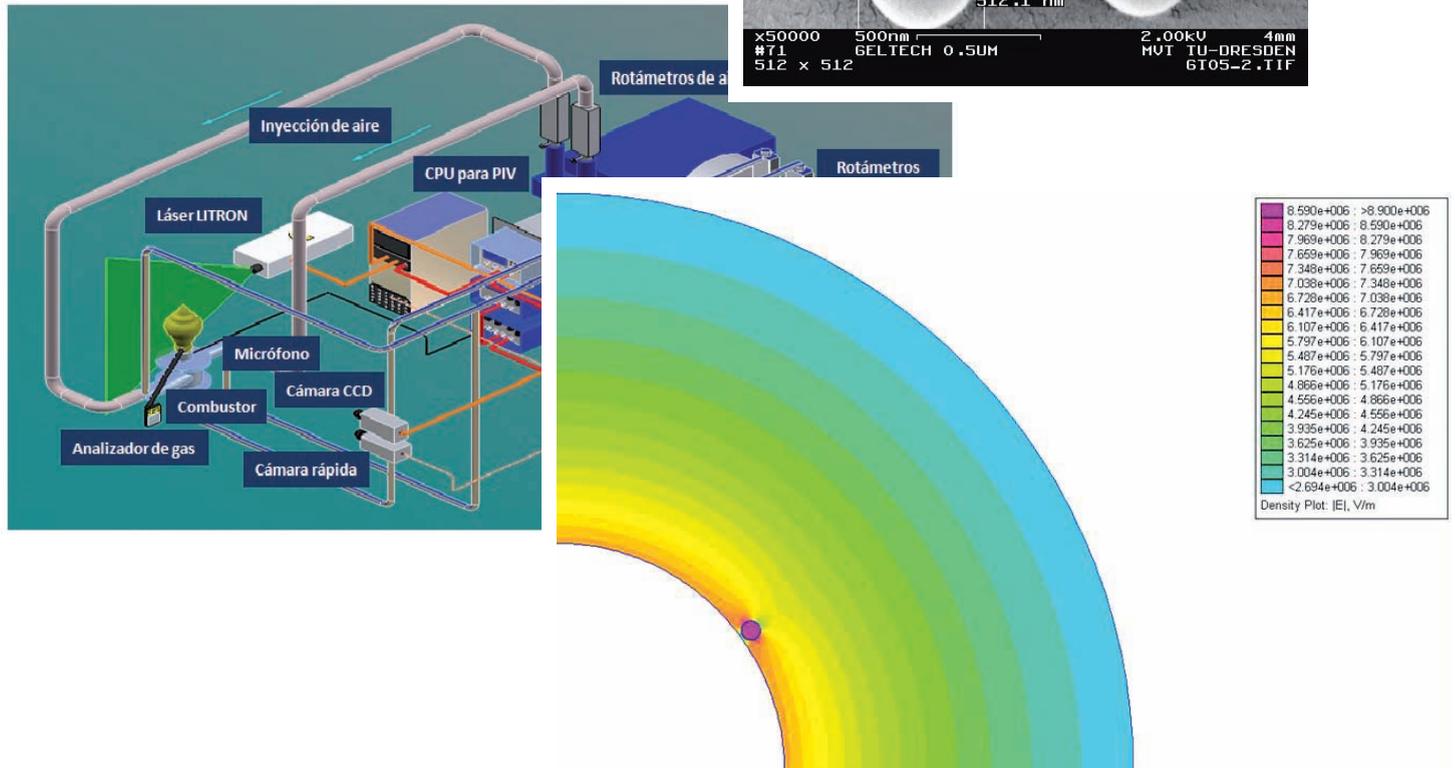
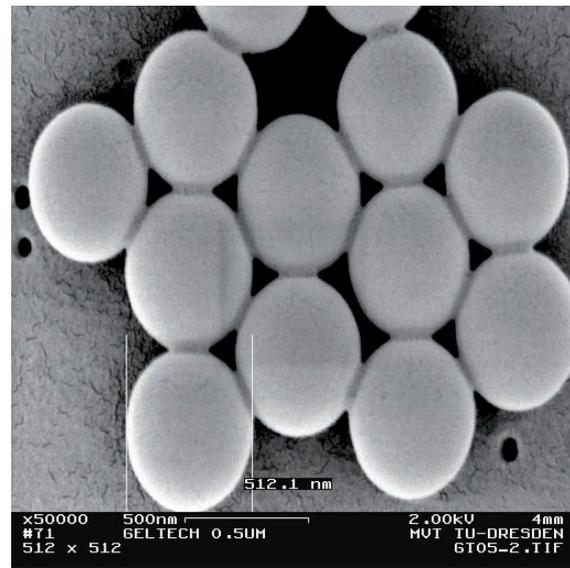
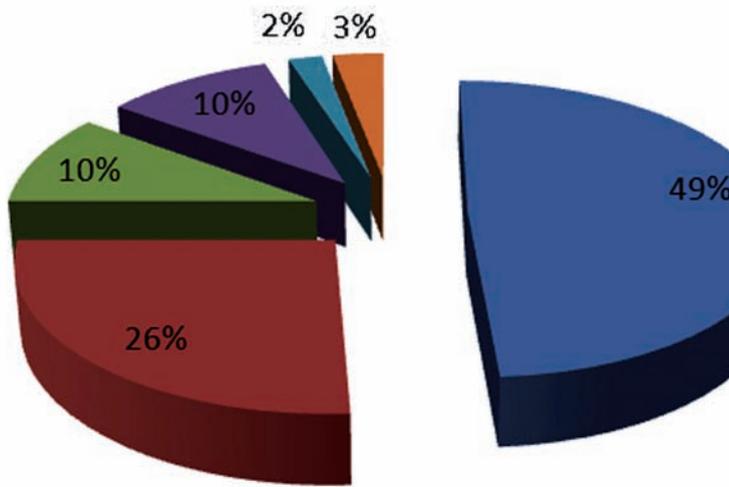




INGENIERÍA

Investigación y Tecnología

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO . FACULTAD DE INGENIERÍA . MÉXICO 2012





UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

DR. JOSÉ NARRO ROBLES
Rector

DR. EDUARDO BÁRZANA GARCÍA
Secretario General

...

LIC. ENRIQUE DEL VAL BLANCO
Secretario Administrativo

DR. FRANCISCO JOSÉ TRIGO TAVERA
Secretario de Desarrollo Institucional

M.C. MIGUEL ROBLES BÁRCENA
Secretario de Servicios a la Comunidad Universitaria

LIC. LUIS RAÚL GONZÁLEZ PÉREZ
Abogado General

MTRO. JOSÉ GONZALO GUERRERO ZEPEDA
Director de la Facultad de Ingeniería, UNAM

...

COMITÉ EDITORIAL

ÁLVARO ALDAMA RODRÍGUEZ
Consultor

DANTE JAIME MORÁN ZENTENO
Instituto de Geología, UNAM

RICARDO CHICUREL UZIEL
Instituto de Ingeniería, UNAM

FELIPE OCHOA ROSSO
Felipe Ochoa y Asociados Consultores

GUILLERMO CISNEROS PÉREZ
Universidad Politécnica de Madrid

OCTAVIO RASCÓN CHÁVEZ
Consultor

JOSÉ LUIS FERNÁNDEZ ZAYAS
Instituto de Ingeniería, UNAM

HUGH RUDNICK
Pontificia Universidad Católica de Chile

DANTE FRATTA
School Civil Environmental Engineering,
Louisiana State University

JORGE HUMBERTO SIERRA CARMONA
Facultad de Ingeniería,
Universidad de Antioquia Colombia

ROBERTO MELI PIRALLA
Investigador Emérito, UNAM

CARLOS L.V. AIKEN
University of Texas at Dallas

FEDERICO MÉNDEZ LAVIELLE
Facultad de Ingeniería, UNAM

JAIME URRUTIA FUCUGAUCHI
Instituto de Geofísica, UNAM

SANJIT K. MITRA
Electrical and Computer Engineering,
University of California Sta. Barbara

JACINTO VIQUEIRA LANDA
Profesor Emérito, UNAM

...

REVISTA INGENIERÍA INVESTIGACIÓN Y TECNOLOGÍA

MARCIA AIDA GONZÁLEZ OSUNA
Directora Técnica y Editora

CUITLÁHUAC ERNESTO SÁNCHEZ BASILIO
Coordinación de Arbitraje

EVA MYRIAM SOROA ZARAGOZA
Coordinación Editorial

EUGENIA GABRIELA GALVÁN GONZÁLEZ
Asistente en Diseño y Comunicación Visual

YURITZI RENÉE OLIVERA RANGEL
Coordinación de Diseño y Edición

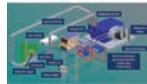
CONTENIDO

- 127-139 Sincronización de sistemas electrónicos en un mismo circuito integrado
Synchronization of Integrated Systems on a Chip
Linares-Aranda M., González-Díaz O. y Salim-Maza M.
- 141-153 Wideband Indoor Radio Propagation Measurements at 5.4 GHz
Mediciones de propagación de ondas de radio en banda ancha en interiores para 5.4 Ghz
Aragón-Zavala A., Mavrakís D., Castañón G. and Cuevas-Ruiz J.L.
- 155-168 Avances tecnológicos en la producción de alginatos en México
Technological Advance for Alginate Production in Mexico
Hernández-Carmona G., Rodríguez-Montesinos Y.E., Arvizu-Higuera D.L., Reyes-Tisnado R., Murillo-Álvarez J.I. y Muñoz-Ochoa M.
- 169-174 Aplicación inversa del método de Krylov para obtener una matriz de orden tres
Inverse Application of Krylov's Method to Obtain an Order-Three Matrix
Cortés-Rosas J.J. y Arganis-Juárez M.L.
- 175-184 Control neuronal auto-ajustable en tiempo real de un proceso de producción de fibra óptica polimérica
Real Time Self-Adjusting Neuro Control of a Polymeric Optical Fiber Production Process
Fuentes-Silva C., Noriega-Ponce A., Ocampo-Mortera M.A. y Serroukh I.
- 185-197 Reproducibilidad en representación sísmica
Reproducibility in Seismic Imaging
González-Verdejo O. y Chávez-Pérez S.
- 199-213 Análisis de impacto causado por estructuras coherentes en sistemas de combustión de flujo giratorio
Analysis of the Impact Caused by Coherent Structures in Swirling Flow Combustion Systems
Valera-Medina A., Syred N. y Griffiths A.
- 215-225 Herramienta educativa para la formación de ingenieros en protecciones eléctricas: relevador de distancia
Educational Software Tool for Protection System Engineers. Distance Relay
Trujillo-Guajardo L.A. y Conde-Enríquez A.
- 227-235 Respuesta sísmica de estructuras adyacentes conectadas por amortiguadores viscosos lineales
Seismic Response of Adjacent Structures Connected by Linear Viscous Dampers
Pulido-Delgado J.L., Rodríguez-Cuevas C. y Martín Duran-García H.
- 237-247 Diseño y construcción de un sistema de lavado en vivo para los aisladores de transformadores
Design and Construction of a Live Insulator Washing System for Transformers
Lizama-Cámara Y.A., Mendieta-Antúnez J.A., Blanco-Brisset, Olivares-Galván J.C. y Escarela-Pérez R.
- 249-256 Monitoreo en línea de accesorios de instalaciones eléctricas subterráneas mediante emisiones acústicas
Online Monitoring of Accessories for Underground Electrical Installations through Acoustics Emissions
Casals-Torrens P., González-Parada A. y Bosch-Tous R.
- 257-262 Comportamiento de la sedimentación en un sistema de micropartículas
Behaviour of the Sedimentation in a System of Microparticles
Salinas-Salas G.

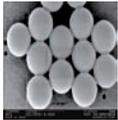
PORTADA/COVER



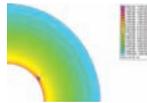
Estadística de fallas en transformadores de potencia 1983-1998 en la red de CFE



Sistema completo



Imágenes de las micropartículas de Geltech S201, Geltech S501, presentadas de izquierda a derecha



Simulación por elemento finito de una cavidad adyacente a la capa semiconductor interior

Ingeniería. Investigación y Tecnología es una publicación trimestral de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Ingeniería. Investigación y Tecnología is a magazine published quarterly by the Facultad de Ingeniería, UNAM.

Publicación indizada en Periódica, Latindex, Índice de Revistas Mexicanas de Investigación Científica y Tecnológica del CONACYT, Índice de Revistas del CREDI, Índice Internacional de Revistas Actualidad Iberoamericana de Chile, así como en los Índices Electrónicos: E-Journal, RedALyC, SciELO México, Directory of Open Access Journals DOAJ e Índice e-Revistas.

Certificado de Reserva al Uso Exclusivo del Título No. 04-1998-060218085600-102, expedido por el Instituto Nacional del Derecho de Autor el 2 de junio de 1998.

Certificado de Licitud de Título No. 10273 y de Contenido No. 7202, expedidos por la Comisión Calificadora de Publicaciones y Revistas Ilustradas el 7 de enero de 1998.

Registro Postal para Publicaciones Periódicas emitido por SEPOMEX: PP09-0786.

Distribución: Dirección General de Publicaciones y Fomento Editorial, UNAM. Avenida del Imán No. 5, Ciudad Universitaria, Coyoacán 04510, México, D.F. Tel. y fax (0155) 56 22 65 82.

Oficinas: Revista Ingeniería. Investigación y Tecnología: Edificio Principal de la Facultad de Ingeniería, UNAM. Biblioteca Antonio Dovalí J. Circuito Interior, Ciudad Universitaria, CP. 04510, Delegación Coyoacán, México DF o Apartado Postal 70-440, Administración de Correos "Ciudad Universitaria". Tel. 5622 0876, Fax. 5616 1899. Lada Nacional (0155), Lada Internacional (5255).

Sitio Web: www.ingenieria.unam.mx/~revistafi

E-mail: iit.revista@gmail.com

ISSN 1405-7743

© Derechos Reservados (All rights reserved).

Universidad Nacional Autónoma de México, 2012.

Los artículos firmados son responsabilidad de los autores.

Número suelto en México: \$40 pesos; en otros países, \$6.50 USD.

Single issue in Mexico: \$40 pesos; other countries, \$6.50 USD.

Suscripción anual (cuatro números) en México: \$120 pesos; en otros países, \$20 USD.

Annual subscription rate (four issues) in Mexico: \$120 pesos; other countries, \$20 USD.

50% de descuento a estudiantes que presenten su credencial UNAM.

Vol. XIII - Núm.2 - abril - junio 2012

Sincronización de sistemas electrónicos en un mismo circuito integrado

Synchronization of Integrated Systems on a Chip

Linares-Aranda M.

Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE)
Puebla, Puebla, México
Correo: mlinares@inaoep.mx

González-Díaz O.

Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE)
Puebla, Puebla, México
Correo: ogonzalez@susu.inaoep.mx

Salim-Maza M.

Freescale Semiconductor México
Correo: msalimm@freescale.mx

Información del artículo: recibido: agosto de 2008, reevaluado: septiembre de 2010, aceptado: marzo de 2011

Resumen

En el presente artículo se propone la aproximación no convencional de osciladores de anillo interconectados y acoplados como redes de distribución de reloj para la sincronización de sistemas electrónicos en un solo circuito integrado. Se presentan resultados de simulación HSPICE de redes de reloj convencionales (globales) y no convencionales (locales) utilizando parámetros típicos de un proceso de fabricación de circuitos integrados CMOS (*Complementary Metal-Oxide Semiconductor*) de 0.35 μm pozo-N de *Austria Micro Systems* (AMS). Con base en resultados experimentales medidos en redes de distribución de señal de reloj, locales y globales, fabricadas mediante el citado proceso, se muestra que la aproximación propuesta es apropiada para sistemas en un solo circuito integrado, debido a su buen desempeño en frecuencia, consumo de potencia y alta robustez a variaciones del proceso de fabricación. Además, las redes de osciladores de anillo interconectados y acoplados poseen modularidad, regularidad y tolerancia a fallas.

Descriptores

- redes de reloj
- sincronización
- sistemas en un chip
- circuitos digitales
- osciladores controlados por voltaje

Abstract

In the present paper, the non-conventional interconnected and coupled ring oscillators approach working as clock distribution networks to synchronize electronic systems on a chip (SoC) is proposed. Typical CMOS (Complementary Metal-Oxide Semiconductor) N-well 0.35 μm Austria Micro Systems process parameters were used for conventional and non-conventional clock distribution nets design and simulation. Experimental results from local and global clock distribution networks fabricated using a CMOS 0.35 μm process show that the use of interconnected rings arrays, as globally asynchronous locally synchronous (GALS) clock distribution networks, represent an appropriate approach due to good performance regarding scalability, low clock-skew, high-speed, faults tolerant and robust under process variations, regularity, and modularity.

keywords

- clock networks
- synchronization
- systems on a chip
- digital circuits
- voltage controlled oscillators

Introducción

Actualmente los circuitos integrados (CI), comúnmente conocidos como "chips" y utilizados en diferentes sistemas electrónicos, contienen millones de diminutos dispositivos semiconductores llamados transistores, ocupan áreas de varios milímetros cuadrados y operan a frecuencias del orden de Giga Hertz (10^9 Hz). El manejo masivo de la información y su procesamiento en tiempo real, especialmente en aplicaciones de video y comunicaciones, exigen que estos sistemas sean cada vez más rápidos y consuman menos potencia (Bakoglu, 1990).

La mayoría de los sistemas electrónicos procesan la información en forma digital y realizan sus operaciones de forma síncrona (Bakoglu, 1990), esto es, requieren al menos una señal de reloj que active (temporice) y transfiera (sincronice) la información apropiadamente para su correcto funcionamiento. Típicamente esta señal de reloj se genera fuera del chip (oscilador y PLL: *Phase-Lock Loop*) y se introduce al CI a través de una terminal del mismo (figura 1). Posteriormente, esta señal se transmite mediante una red (red de distribución) en

forma global a todos los elementos de carga (sumideros) que la necesiten, generalmente dispersos en todo el CI. Las redes de distribución de señal de reloj (RDSR) operan a la frecuencia más alta, manejan la mayor carga y ocupan el área más grande de un CI.

Todas las RDSR están constituidas por interconexiones (en mayor grado) y repetidores o *buffers*, y utilizan técnicas adicionales para asegurar el correcto funcionamiento de la red ante diversos efectos eléctricos y ambientales no deseados (ruidos) siempre presentes (Stefan, 2005). El diseño de estas redes es complejo y las exigencias actuales de desempeño hacen que su diseño sea cada vez más estricto. La tendencia a incorporar continuamente un mayor número de funciones está provocando que los sistemas electrónicos sean cada vez más complejos y de mayor tamaño (SoC: *System on a Chip*, y MCM: *Multi-Chip Module*), lo cual a su vez provoca que las RDSR abarquen más área y consuman más potencia (de 30 a 50% de la energía total del sistema). Sin embargo, un CI no puede crecer infinitamente, pues las limitaciones físicas de los materiales utilizados para su fabricación imponen una cobertura (tamaño) máxima a la cual una señal puede conmutar a una frecuencia

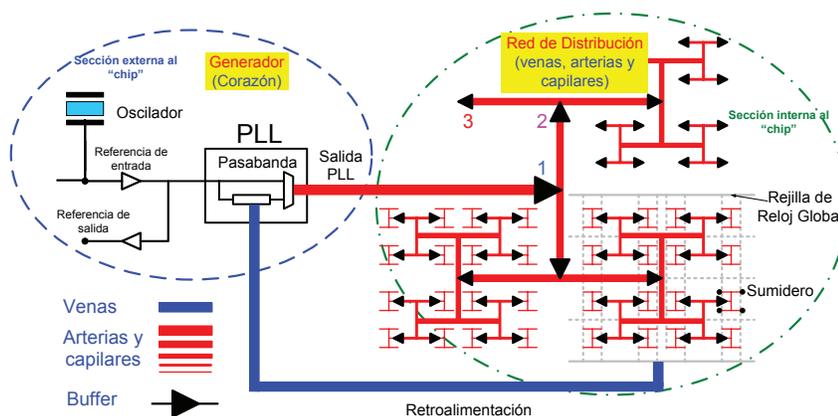


Figura 1. Sistema de reloj de un procesador

dada (Dennis *et al.*, 2005). Esta cobertura, denominada región isócrona, se reduce cuando la frecuencia crece (figura 2). Además, en tecnologías avanzadas de fabricación de CI, son las interconexiones las que tienden a dominar el retardo de los sistemas electrónicos integrados, y la evolución del desempeño de las interconexiones globales no es compatible con las velocidades de la señal de reloj global esperadas utilizando tecnologías avanzadas. Así, con el fin de seguir aplicando señales de reloj mediante redes globales, se ha modificado el escalamiento de las interconexiones de los últimos niveles en un CI (ITRS, 2004) y se dedican esfuerzos considerables en incorporar mejores y nuevos materiales en los procesos de fabricación, así como técnicas más eficientes de distribución de la señal de reloj. Estas tendencias y limitaciones plantean serios problemas en el diseño de redes que manejen señales de forma global, particularmente las RDSR. Con el fin de resolver algunos de los problemas que plantea el diseño de las RDSR globales en sistemas grandes y rápidos, en este trabajo se explora la filosofía local y se propone el uso de *redes de distribución de reloj con base en osciladores de anillo interconectados y acoplados*.

Redes de distribución de reloj convencionales

Los diseños actuales de RDSR diseminan una señal original en forma global a todos los nodos (sumideros) donde se requiera. Cada sumidero representa una carga que puede ser una simple compuerta digital o todo

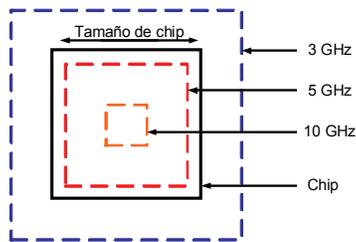


Figura 2. Regiones isócronas en un microprocesador

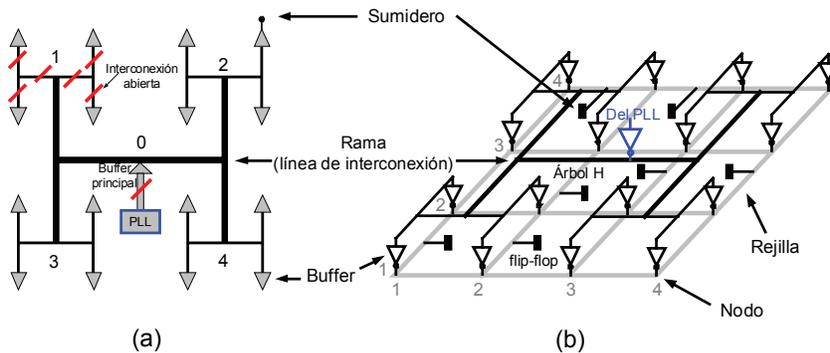


Figura 3. Redes de distribución de señal de reloj global: a) árbol H, b) árbol H-Rejilla

un elemento procesador complejo. Las RDSR de árbol H y Rejilla o una combinación de ambas (figura 3) son las topologías de RDSR más frecuentemente utilizadas en aplicaciones comerciales; sin embargo, para CI grandes, cada vez es más difícil cumplir con las figuras de mérito requeridas tales como: frecuencia, corrimiento de reloj (*skew*), temblor del reloj (*jitter*), consumo de potencia, etcétera.

Redes de distribución de reloj no-convencionales

Arreglos de osciladores de anillo interconectados y acoplados

Debido a los múltiples problemas que se presentan en las RDSR del tipo *global* (Salim *et al.*, 2001), esta filosofía ha cambiado y han surgido las redes del tipo *local*, tales como las redes de *arreglos de osciladores de anillo interconectados*, bien del tipo *resonante* con base en líneas de transmisión y utilizando ondas estacionarias (O'Mahony *et al.*, 2003), o bien del tipo *no-resonante* con base en líneas de transmisión utilizando ondas viajeras, entre las que se encuentran las de *arreglos de osciladores de reloj rotatorio* (Wood *et al.*, 2001) y las de *arreglos de osciladores de anillo interconectados y acoplados* (Hall *et al.*, 1997; O'Mahony *et al.*, 2003, Salim *et al.*, 2005). Estas últimas constituyen el tema de investigación del presente trabajo.

Las *redes basadas en arreglos de osciladores de anillo interconectados y acoplados*, son redes activas compuestas de cadenas en lazo cerrado de celdas de retardo sencillas. Estas redes son de fácil diseño, pues se reduce al de un solo oscilador y la repetición del mismo las veces necesarias hasta lograr un tamaño determinado. Además, son robustas a variaciones del proceso de fabricación, pues esas variaciones son absorbidas por todos los anillos minimizando su impacto en las diferentes figuras de mérito. Asimismo, son altamente regulares y escalables con los avances de la tecnología. En la figura 4 se presentan arreglos de 6, 8 y 16 osciladores de anillo interconectados y acoplados.

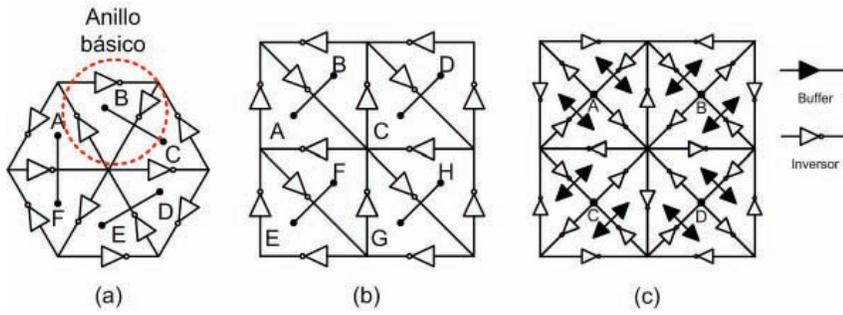


Figura 4. Arreglos de osciladores de anillo interconectados y acoplados: a) a 60°, b) a 45°, c) a ±45° con buffers en cada sumidero

Oscilador de anillo básico

Un oscilador de anillo de ondas viajeras se construye mediante un número impar de etapas de retardo (inversor convencional, inversor diferencial, oscilador controlado por voltaje (VCO), etcétera) conectadas en lazo cerrado o anillo. Considere el oscilador de anillo de 3 inversores convencionales mostrado en la figura 5. En este oscilador, el periodo de oscilación T de la onda de voltaje a la salida de cualquier inversor puede expresarse como la suma de 6 tiempos de retardo de propagación (figura 5b). Considerando inversores idénticos, las capacitancias de carga en las salidas son iguales, por lo que es posible expresar el periodo de oscilación en términos del tiempo de retardo promedio τ_d , como (Rabaey *et al.*, 2004):

$$\begin{aligned}
 T &= \tau_{PHL1} + \tau_{LH1} + \tau_{PHL2} + \tau_{PLH2} + \tau_{PHL3} + \tau_{PLH3} \\
 &= 2\tau_{P1} + 2\tau_{P2} + 2\tau_{P3} \\
 &= 3(2\tau_d)
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

con

$$\tau_d = \frac{\tau_{PLH} + \tau_{PHL}}{2} \cong \frac{C_L}{V_{dd}} \left(\frac{1}{\beta_n} + \frac{1}{\beta_p} \right)
 \tag{2}$$

$$\tau_{PHL} \cong \frac{1}{2} \left(\frac{4C_L}{\beta_n V_{dd}} \right) = \frac{2C_L}{\beta_n V_{dd}}$$

$$\tau_{PLH} \cong \frac{1}{2} \left(\frac{4C_L}{\beta_p V_{dd}} \right) = \frac{2C_L}{\beta_p V_{dd}}$$

$$\beta_n, \beta_p = \frac{\mu_{n,p} \epsilon_{ox}}{T_{ox}} \left(\frac{W}{L} \right)$$

$\mu_{n,p}$ movilidad de portadores en transistores n, p ,
 ϵ_{ox} permitividad del óxido de silicio,
 T_{ox} grosor del óxido de silicio,
 L, W longitud, ancho de canal de los transistores, respectivamente.
 C_L carga en la salida del inversor,
 C_{ox} capacitancia de compuerta del transistor MOS,
 V_{dd} voltaje de alimentación.

Así, la frecuencia de oscilación es inversamente proporcional al número N de etapas inversoras y al tiempo de retardo promedio por etapa τ_d . Generalizando la expresión para un número impar N se tiene:

$$f_{osc} = \frac{1}{N2\tau_d}
 \tag{3}$$

De la ecuación (3) se observa que la velocidad del oscilador puede aumentarse mediante la reducción del número N de etapas. Esta reducción de etapas resulta muy atractiva, ya que simultáneamente se disminuye el consumo de potencia y área. Así, es conveniente considerar osciladores de una y dos etapas. Sin embargo, a medida que N disminuye, es más difícil satisfacer simultáneamente los criterios de oscilación de Barkhausen (Pacheco *et al.*, 2004): “la oscilación estable en un oscilador de anillo requiere un cambio de fase total de 360° a una frecuencia en la cual la ganancia del lazo

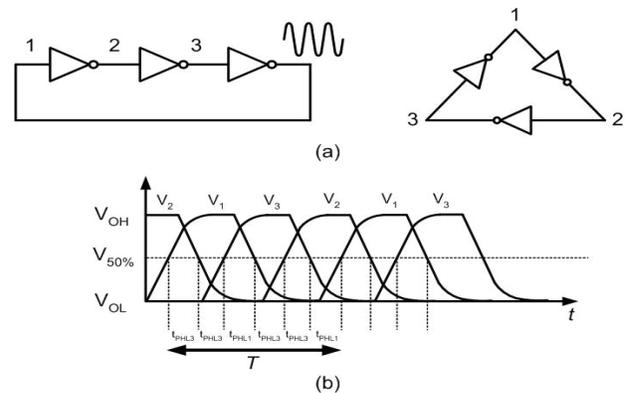


Figura 5. Oscilador de anillo de 3 etapas de retardo, a) topologías del oscilador, b) formas de onda de los nodos

en pequeña señal esté por encima de 0 dB. En un oscilador de anillo de N celdas, cada celda contribuye con un cambio de fase dependiente de la frecuencia de $180^\circ/N$ y la inversión de fase en corriente directa provee los 180° restantes. Cuando $N = 1$ los problemas de baja ganancia y/o fase son más críticos, por lo que es necesario un diseño fino del oscilador lo que conlleva a un mayor tiempo de diseño". Debido a lo anterior, y dado que en circuitos integrados el tiempo de diseño es un factor de costo que siempre debe minimizarse, en este trabajo nos restringimos a osciladores de anillo de 2 y 3 etapas.

Arreglos de osciladores de anillo

Una vez obtenido el oscilador de anillo básico se pueden conectar múltiples osciladores en un arreglo de diferentes formas. Considere la versión de oscilador de anillo básico de forma triangular mostrado en la figura 5a. Compartiendo un inversor de cada lado del triángulo, éste puede extenderse a una red de 2 dimensiones, tal como se muestra en la figura 6a. De esta figura se puede observar que cualquier triángulo constituye una celda fractal (Fractal, 2007) en el sentido de que cualquier forma de triángulo interno tiene la misma forma de la red entera (figura 6b).

Las RDSRs de anillos interconectados presentadas en la figura 4 están acopladas en modo rejilla; este modo introduce efectos de borde que hemos denominado "efectos de superficie de cristal" por su semejanza con las impurezas en los cristales semiconductores. Con el fin de contrarrestar estos efectos, en Salim (2005) se presentan diferentes formas de acoplamiento de los arreglos con base en la duplicación del ancho de los segmentos compartidos entre celdas básicas. En la tabla 1 (Salim, 2005) se compara el desempeño de 3 arreglos alimentando el mismo número de sumideros (64), cubriendo la misma área ($11\text{ mm} \times 11\text{ mm}$) y mismo arreglo matricial, pero con diferente modo de acoplamiento. De la tabla 1 se observa que el esquema de ajedrez presenta mayores ventajas, ya que consume menos poten-

cia, oscila más rápido y posee corrimiento de reloj teóricamente de 0%.

Tabla 1. Figuras de mérito para diferentes arreglos de osciladores de anillo interconectados y acoplados (Salim, 2005)

Arreglo	Acoplamiento	F (Hz)	ClkSkw (%)	Potencia (mW)	V_{barrido} (V)
4 × 4	Rejilla	1.073	2.35	183.5	1.800
4 × 4	Doble ancho	1.028	4e-13	220	1.820
4 × 4	Ajedrez	1.099	4e-13	173	1.785

Robustez de RDSR de anillos interconectados y acoplados

Tolerancia a fallas

Durante todo proceso de fabricación de un CI se presentan defectos en los dispositivos (transistores, diodos, capacitores, resistores, etcétera) e interconexiones que lo componen, debido a fallas en las diferentes etapas del proceso (malas difusiones e implantaciones, sobregabados y falta de grabado de materiales, deficiente depósito de aluminio, polisilicio, cobre, etcétera). En particular, es de vital importancia el defecto de conductores abiertos (roturas), ya que en sistemas complejos actuales se ha encontrado que hay una alta probabilidad de que existan roturas en las líneas de interconexión. Esto es más crítico en CI con tecnologías avanzadas que utilizan varios niveles de interconexión de aluminio o de cobre. Las RDSR de anillos interconectados y acoplados (figura 7) han mostrado ser más robustas a fallas de circuito abierto que redes globales (figura 3) conservando prácticamente el mismo desempeño (Salim *et al.*, 2007). Así por ejemplo, si se presentaran las siete fallas indicadas en las figuras 7a y 7b (los números en las interconexiones de estas figuras indican interconexiones abiertas) el arreglo seguiría funcionando, ya que la señal de reloj llegaría a todos los sumideros por otro camino diferente al de la falla, tal

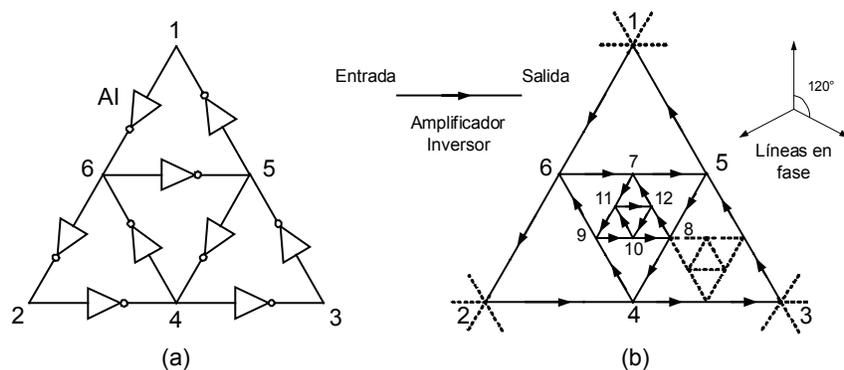


Figura 6. Arreglo 2D de osciladores de anillo interconectados y acoplados

como se indica en la figura 7c. Por el contrario, en el caso de la red global de árbol H que alimenta 16 sumideros S_i (figura 3a), puede verificarse que si sucediera una sola falla crítica (rotura) en la interconexión que lleva la señal de reloj al sumidero inicial de la red S_0 , entonces todos los sumideros finales de la red S_i , $i = 1, 2, \dots, N$ ($N = 16$), se quedarían sin señal de reloj y en consecuencia el sistema integrado no funcionaría.

Incertidumbre de la señal de reloj

El *skew* y el *jitter* de la señal de reloj (figura 8) son incertidumbres altamente importantes en la sincronización de sistemas digitales y de comunicaciones. El *skew* se refiere a variaciones en el tiempo de llegada de los flancos de la señal de reloj en diferentes sumideros finales, el *jitter* se refiere a la fluctuación alrededor de los bordes de elevación y caída de la señal de reloj. Ambas variaciones en la señal de reloj limitan la frecuencia de operación de los circuitos que la utilizan.

Con el fin de determinar la estabilidad de los arreglos de anillos interconectados y acoplados, se investigó el desempeño de 16, 64, 256 y 1024 anillos acoplados en forma de rejilla y ajedrez cubriendo 6, 12, 24 y 48 mm de lado, bajo variaciones del proceso de fabricación a través de análisis de MonteCarlo. Se consideró 10% de variación en la longitud mínima de canal del transistor; 30% de longitud mínima en el ancho del transistor e interconexiones; 8% en el ancho de óxido;

23% y 18% en los voltajes de encendido de los transistores tipo N y P, respectivamente; y 20% en la resistencia por cuadro y capacitancia por área de la interconexión. Los anillos fueron diseñados utilizando el modelo unificado propuesto en (Salim, 2005). En las figuras 9 y 10 se presentan gráficas de corrimiento de reloj, para el peor de 10 casos de redes locales y globales, respectivamente. La figura 9 muestra arreglos de osciladores de anillo que alimentan 1024 sumideros y ocupan un área de 48 mm × 48 mm. La figura 9a corresponde al arreglo de anillos interconectados en *modo rejilla*. Observe cómo los corrimientos más grandes ocurren en las esquinas del arreglo y la mayor parte del mismo presenta corrimiento menor a 5%. La figura 9b corresponde al arreglo de anillos interconectados en *modo ajedrez* y puede verse cómo el corrimiento más grande ocurre en una esquina del arreglo y los siguientes ocurren en tres regiones aisladas y ubicadas aleatoriamente. La mayor parte del arreglo presenta corrimiento menor a 7%. La figura 10 corresponde al peor de 30 casos de la red global árbol H, alimentando sólo 64 sumideros en un área máxima de 12 mm × 12 mm. Observe cómo los corrimientos más grandes y más pequeños ocurren en diferentes lados del arreglo; una mitad del arreglo presenta bajo corrimiento y la otra mitad presenta alto corrimiento. Esto muestra que el arreglo es muy sensible a las variaciones de proceso que afecten las primeras etapas del árbol H, y que se reflejan en etapas subsiguientes.

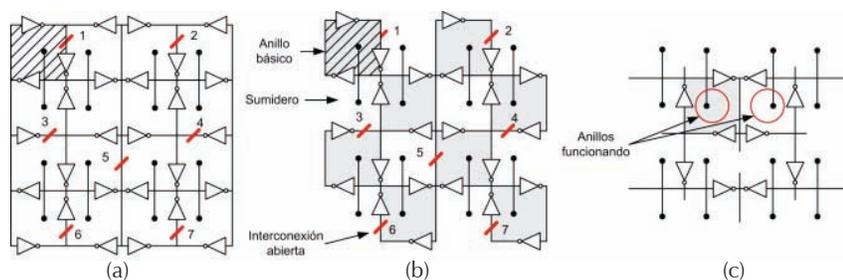


Figura 7. Redes locales de distribución de señal de reloj con interconexiones abiertas (fallas): a) rejilla, b) ajedrez, c) red equivalente a ajedrez, considerando las 7 fallas de la figura 7b

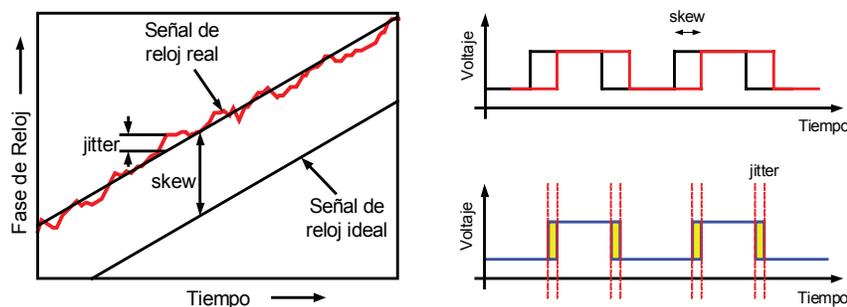


Figura 8. Incertidumbres de la señal de reloj

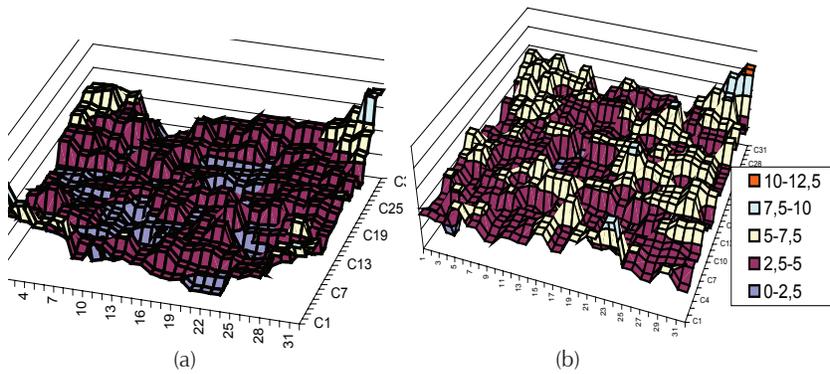


Figura 9. Corrimiento de reloj porcentual del peor de 10 casos de análisis Monte Carlo en una red de anillos interconectados y acoplados: a) modo rejilla, b) modo ajedrez

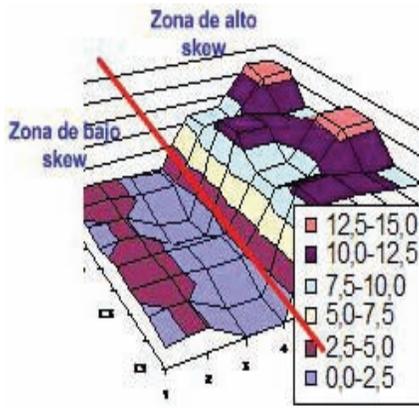


Figura 10. Corrimiento de reloj porcentual para una RDSR de árbol H

Circuitos integrados de prueba fabricados

Con el fin de verificar experimentalmente la funcionalidad de diferentes RDSR utilizando osciladores de anillo interconectados y acoplados, se fabricaron dos circuitos integrados utilizando una tecnología CMOS de 0.35 μm AMS.

- a) El chip denominado RDR02 (figura 11) contiene estructuras no expandidas: un oscilador anillo de tres etapas de retardo, un oscilador de relajación, un arreglo 16 osciladores de anillo en modo rejilla y un arreglo de osciladores de relajación acoplados en modo rejilla. Mediante este chip se verificó el amarrado de los arreglos de anillos interconectados y acoplados.

Cada etapa de retardo consiste en un inversor convencional con $L = L_{\text{min}} = 0.35 \mu\text{m}$; $W_N = 3 \mu\text{m}$ y $W_P = 6 \mu\text{m}$. Se utilizó metal nivel 2 con ancho de $0.9 \mu\text{m}$ para las líneas de interconexión y un ancho de $2 \mu\text{m}$ para las líneas de alimentación en nivel 5. Los arreglos de anillos ocupan un área de $190 \mu\text{m} \times 190 \mu\text{m}$, lo cual constituye una cobertura muy pequeña, por lo que estos arreglos se consi-

deran no expandidos. En estos arreglos se tomaron los cuatro nodos cuaternarios como las salidas del arreglo (nodos A, B, C y D de la figura 4d), ya que presentan la misma fase y el menor efecto de superficie de cristal en el arreglo. Debido a la alta frecuencia de operación de los arreglos y a las limitaciones del equipo de medición, se utilizaron divisores de frecuencia entre 16 en las diferentes salidas (Salim *et al.*, 2005; Pacheco *et al.*, 2004).

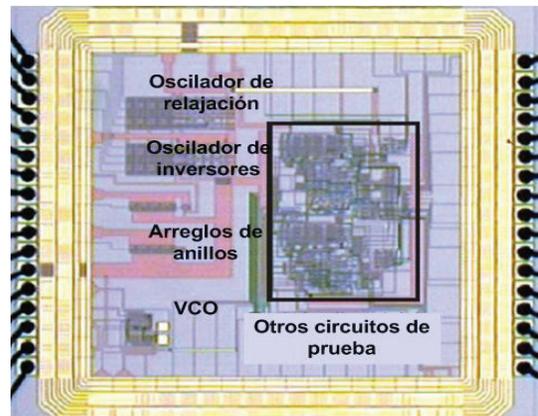


Figura 11. Fotografía del chip RDR02

b) El chip fabricado denominado RDR04 (figura 12) contiene tres RDSR: dos del tipo local y una del tipo global. Las RDSR usan serpentinatas de 5 vueltas para extender la longitud de las interconexiones entre etapas de retardo. Cada RDSR tiene como sumidero final (carga) un convolucionador de señales de 4×4 bits. Se utilizaron terminales dedicadas para alimentar cada estructura de prueba (redes, divisores, convolucionador, etcétera).

- *Arreglo de 16 anillos interconectados y acoplados en modo rejilla* (figura 13). En esta red cada anillo está compuesto por tres inversores convencionales sencillos. Los transistores MOS utilizados en cada inversor tienen una longitud de canal $L_{\min} = 0.35 \mu\text{m}$ y ancho de $W_n = 15 \mu\text{m}$ y $W_p = 30 \mu\text{m}$ para tipo n y tipo p, respectivamente. El área del arreglo es de $1900 \mu\text{m} \times 1900 \mu\text{m}$. El perímetro de cada anillo con serpentinatas es 11.1 mm. Con el fin de verificar las formas de onda en diferentes nodos del arreglo, se seleccionaron 12 salidas con la misma fase tal como se indica en la figura 13c. Las salidas se dividieron en grupos: esquinas (nodos 1-4), lados (nodos 5-8) e internos (nodos 9-12).
- *Arreglo de VCO acoplados en modo rejilla* (figura 14). Consiste en un arreglo matricial de 4×4 VCO acoplados en modo rejilla. Cada VCO está formado por dos celdas de retardo diferenciales (Linares *et al.*, 2007). El arreglo tiene un área de $1900 \mu\text{m} \times 1900 \mu\text{m}$ y utiliza serpentinatas de tres dobleces. El perímetro de cada VCO con serpentinatas es 2.5 mm. Se seleccionaron 12 salidas con la misma fase tal como se indica en la figura 14b (nodos 1-12).
- *Red global* (figura 15). La red global disemina una señal generada por un VCO a 16 sumideros distri-

buidos en un área de $800 \mu\text{m} \times 800 \mu\text{m}$. Las ramas externas de la red se doblaron hacia adentro (figura 15a) y se usaron serpentinatas (figura 15b) para incrementar la separación entre repetidores con el fin de verificar el comportamiento del arreglo con interconexiones de longitud grande. Se tomaron ocho salidas del arreglo tal como se indica en la figura 15b.

Resultados experimentales

Circuitos integrados fabricados

Chip RDR02. En la tabla 2 se resumen los valores de *clock skew*, consumo de potencia y la frecuencia interna (dividida entre 16) para diferentes valores de la fuente de alimentación. El comportamiento del consumo de potencia y la frecuencia se muestran en la figura 16. En esta figura, los valores se normalizaron con el máximo valor presentado en la tabla 2. Se observa una alta linealidad de estos parámetros con V_{dd} .

Chip RDR04. Las mediciones experimentales de diferentes figuras de mérito de las redes expandidas fabricadas fueron tomadas en 3 chips. En las figuras 17 a 19 se muestran formas de onda de salida experimentales de los arreglos expandidos mostrando mediciones de frecuencia, voltaje pico a pico y corrimiento de reloj entre las salidas. Los diferentes arreglos se alimentaron con $V_{dd} = 3.3 \text{ V}$. En las tablas 3 a 7 se presentan figuras de mérito de las redes fabricadas. El *skew* y *jitter* del peor caso, se presentan como un porcentaje del periodo de reloj. Las mediciones se clasificaron por chip y por posición geométrica en el arreglo (esquina, lado o interno). En la tabla 7 se incluye la figura de mérito *skew + jitter* ($S + J$). Es válido agregarlos, ya que juntos reducen la porción útil del periodo de reloj dado.

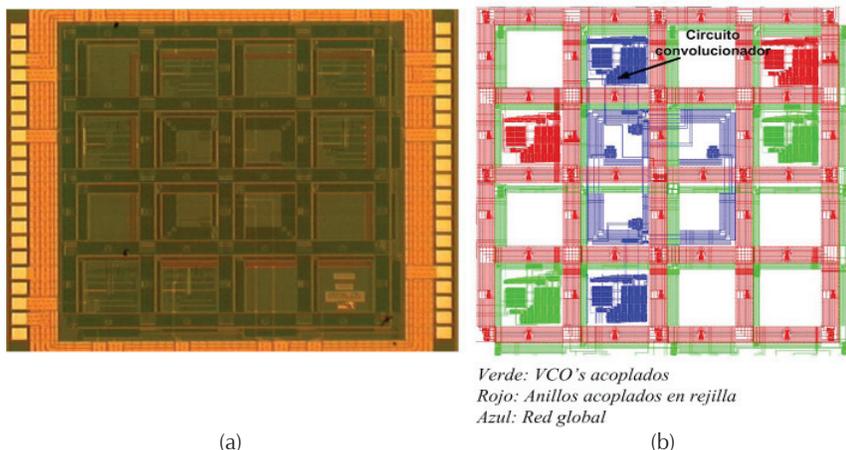


Figura 12. Circuito integrado RDR04: a) fotografía, b) patrón geométrico que muestra la distribución de diferentes redes de reloj

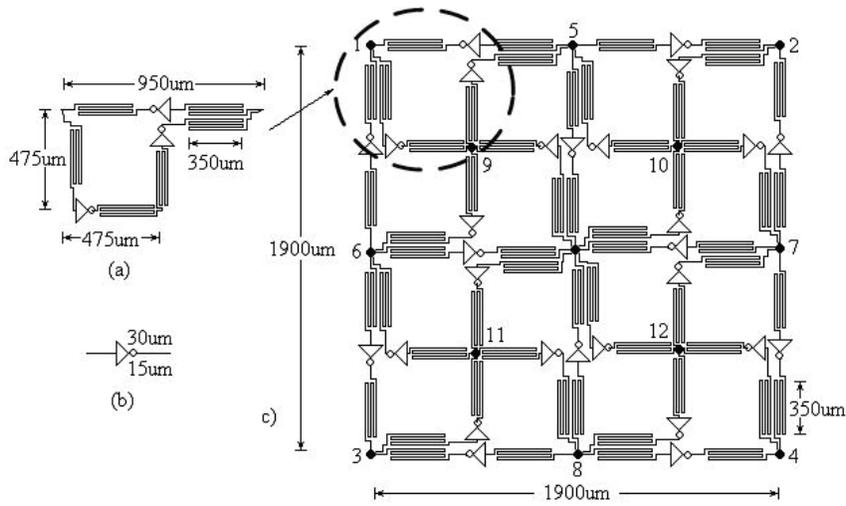


Figura 13. Arreglo de 16 osciladores de anillo interconectados y acoplados en modo rejilla: a) celda básica, b) inversor simple, c) arreglo expandido que muestra sus 12 salidas

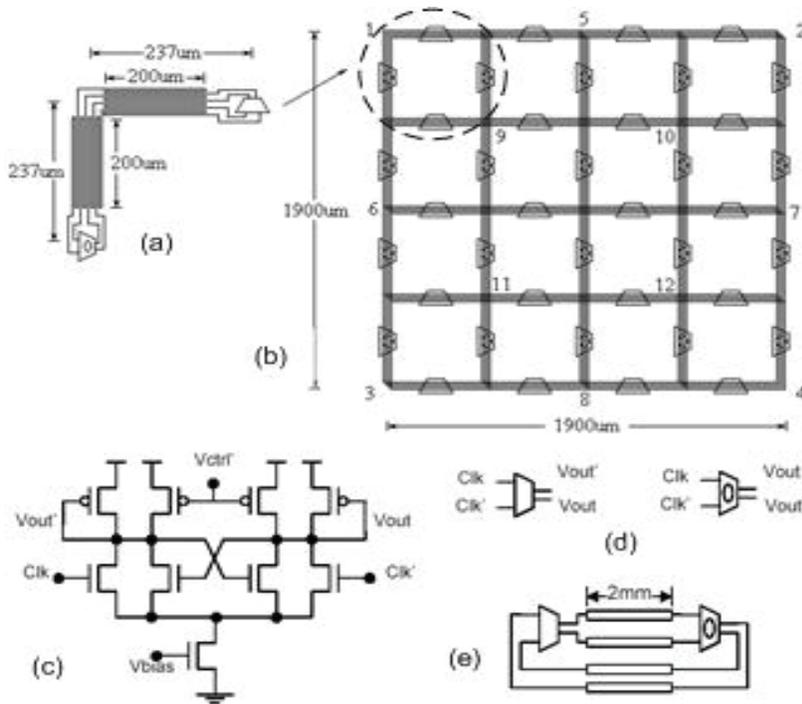


Figura 14. Arreglo de 4 × 4 VCO acoplados: a) celda básica, b) arreglo expandido, c) celda de retardo, d) símbolos de celda, e) un VCO expandido

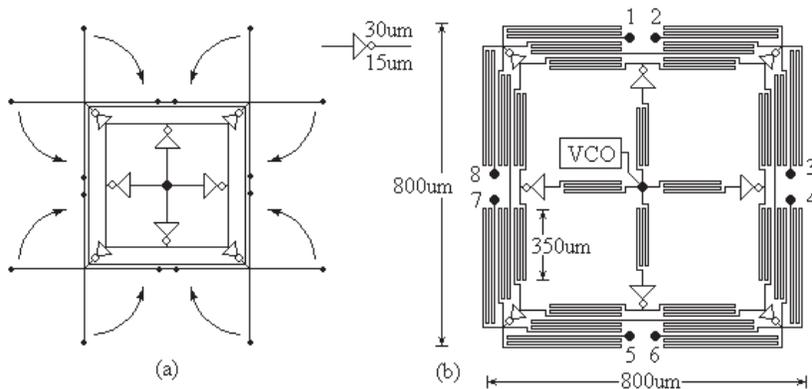


Figura 15. Red global: a) sus ocho brazos externos doblados hacia adentro, b) red junto con VCO (figura 14e) y sus 8 salidas

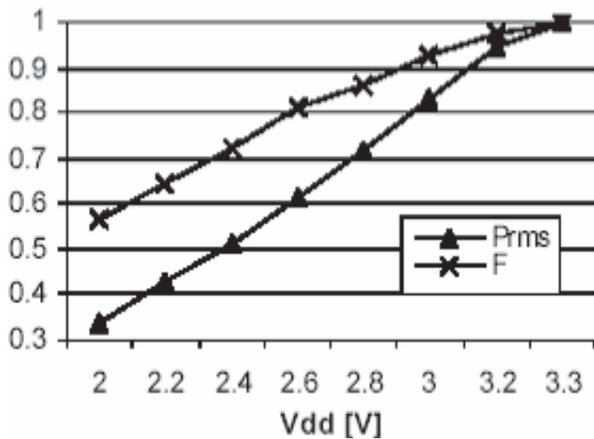


Figura 16. Comportamiento normalizado del consumo de potencia y frecuencia con V_{dd} para el arreglo de 16 osciladores de anillo interconectados y acoplados

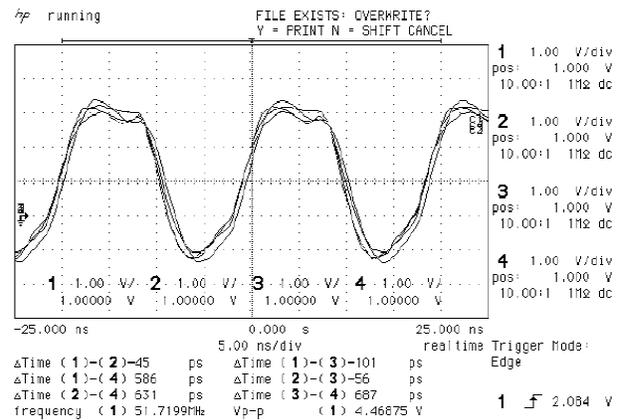


Figura 17. Formas de onda de salida de las esquinas del arreglo expandido de 16 anillos interconectados y acoplados en modo rejilla $V_{ddANILLO} = 3.3$ V

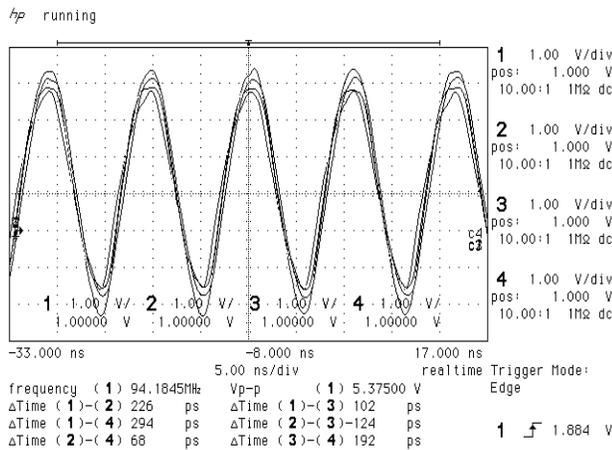


Figura 18. Formas de onda de salida de esquinas del arreglo de 4×4 VCO acoplados, $V_{dd} = 3.3$ V, $V_{PADS} = 3.3$ V

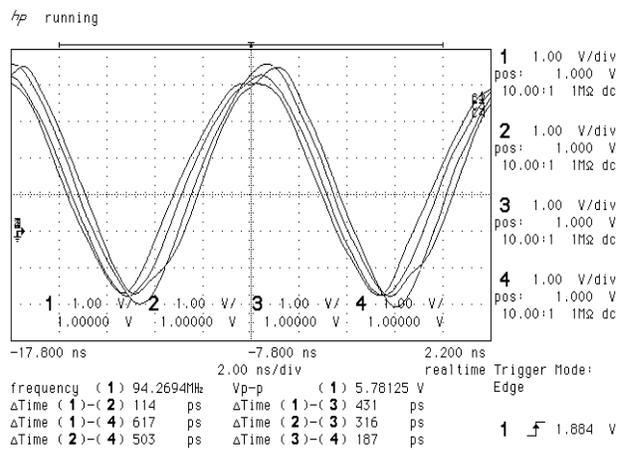


Figura 19. Formas de onda de salida en nodos 1, 3, 4 y 6 de la red global $V_{dd} = 3.3$ V, $V_{PADS} = 3.3$ V

Tabla 2. Figuras de mérito del arreglo de osciladores de anillo interconectados y acoplados no expandidos

V_{dd} (V)	2	3.3
f_{int} (GHz)	0.79	1.41
f_{ext} (MHz)	49.99	88.37
Skew (%)	0.24	17.6
P_{osc} (mW)	2.47	5.68

Tabla 3. Principales figuras de mérito de peor caso de arreglos expandidos de osciladores de anillo interconectados y acoplados

Chip	Clock Skew [Jitter (%)]			Promedio por Chip
	Esquinas	Lados	Internos	
1	46.9 [3.01]	27.19 [4.33]	17.75 [3.25]	30.61 [3.53]
2	32.02 [2.88]	32.85 [2.88]	3.1 [2.50]	22.66 [2.75]
3	31.16 [2.75]	36.42 [2.88]	9.0 [2.25]	25.53 [2.63]
Promedio	36.69 [2.88]	32.15 [3.36]	9.95 [2.67]	

Tabla 4. Figuras de mérito de arreglos de osciladores controlados por voltaje (VCO_s)

Chip	V _{dd} (V)	F _{ext} (MHz)	F _{int} (MHz)	I _{dd} (mA)	I _{E/S} (mA)	P _{vco} (mW)
1	3.3	44.7	715.2	74.6	55.08	246.2
2	1.4	30.6	489.6	1.8	51.26	2.6
3	2.7	37	592	89.92	46.55	242.8

Tabla 6. Figuras de mérito de la red global

Chip	V _{dd} (V)	f _{ext} (MHz)	f _{int} (GHz)	I _{dd} (mA)	I _{E/S} (mA)	P _{vco} (mW)	P _{E/S} (mW)
1	3.3	63	1.01	34.65	44.70	114.3	147.5
2	1.4	29	0.46	4.34	46.78	6.2	154.3
3	1.5	82	1.31	110	54.45	167.2	179.7

Comparación de resultados

De los resultados experimentales presentados y el resumen de las principales figuras de mérito mostrados en la tabla 8, se puede ver que los arreglos de anillos interconectados y acoplados presentan el *skew* (37%), *jitter* (3.4%) y S + J (40.4%) más bajos; no obstante, tienen el mayor consumo de potencia (298 mW). Por su parte, los arreglos basados en VCO diferenciales acoplados presentan la peor degradación de señal debido al reducido barrido de voltaje de las señales. Los arreglos de VCO sólo trabajaron adecuadamente a 592MHz y tienen el peor *skew* (54%). Finalmente, la red global alcanza la frecuencia más alta (1.3 GHz) con el menor consumo de potencia (167 mW). Esto da lugar a un mejor compromiso potencia/frecuencia (0.128 mW/MHz); sin embargo, tiene el peor *jitter* (37%) y el peor S + J (74%).

Se puede derivar de estos resultados que las redes de generación y distribución de señal de reloj con base en anillos interconectados y acoplados de etapas inversoras propuestas presentan características de desempeño (figuras de mérito) altamente deseables para sistemas de un solo chip, tales como temblor de la señal reducido y corrimiento de reloj relativamente bajo, alta robustez a fallas (principalmente de circuito abierto) y robustez a variaciones del proceso de fabricación. Si bien las redes de osciladores de anillo interconectados y acoplados presentan algunas características de desempeño relativamente aún inferiores a las de la red global utilizada para

Tabla 5. Principales figuras de mérito de peor caso de arreglos expandidos de VCO_s

Chip	Clock Skew [Jitter (%)]			
	Esquinas	Lados	Internos	Promedio por Chip
1	65 [4.6]	70 [2.9]	35 [1.4]	56.7 [2.9]
2	15 [14.7]	21 [6.8]	40.2 [9.4]	25.4 [10.3]
3	37 [14]	72 [13]	30 [15.4]	46.3 [14.2]
Promedio	39 [11.1]	54.3 [7.6]	35.1 [8.7]	

Tabla 7. Principales figuras de mérito de peor caso de la red global

"Chip"	"Clock skew" (%)	"Jitter" (%)	"Skew + Jitter" (%)
1	18	4	22
2	11	13	24
3	82	16	98
Promedio	37	11	48

su comparación, estas figuras de mérito pueden mejorarse utilizando arreglos matriciales mayores a 4×4 , tal como se ha podido verificar en las simulaciones. Asimismo, altamente atractivo es el consumo de potencia de arreglos de osciladores interconectados y acoplados (redes locales), pues éste crece linealmente conforme el tamaño de chip crece, como se observa en la figura 20 (Salim, 2005), comparado con el consumo exponencial que presentan las redes globales. El consumo de potencia disipada es función de la cantidad de metal (aluminio en este caso) utilizado por la RDSR.

Tabla 8. Figuras de mérito de las redes de distribución de reloj

Figura de mérito	Arreglo de osc. de anillo interconectados acoplados	VCOs acoplados	Red Global
Dimensiones (mm ²)	8 x 8	5.5 x 5.5	8 x 8
Frecuencia de Operación (GHz)	0.963	0.592	1.3
Potencia (mW)	298	243	167
"Clk Skw" (ps)	384	912	284
"Clk Skw" (%)	37	54	37
"Jitter" (ps)	35	248	284
"Jitter" (%)	3.4	14.7	37
"Skw+Jitter" (%)	40.4	68.7	74

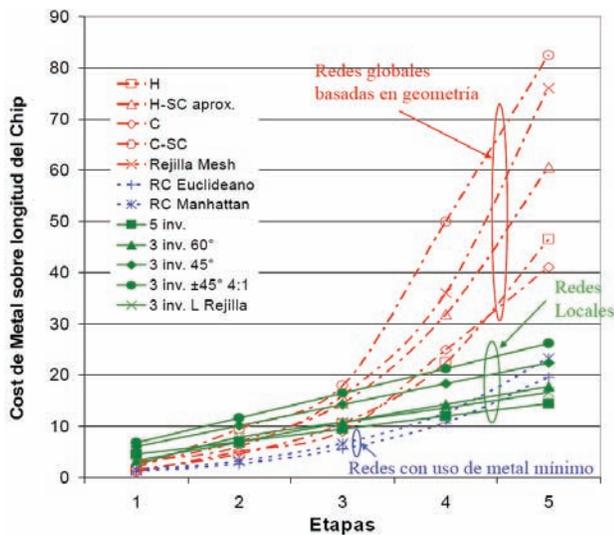


Figura 20. Comparación de costos de metal para las diferentes RDR globales y locales

Conclusiones

En este trabajo se han propuesto y verificado experimentalmente arreglos de osciladores de anillo interconectados y acoplados como una alternativa de redes de generación y distribución de reloj para sistemas en un solo chip (SoC). Las redes no resonantes propuestas presentan características altamente deseables para dar solución a los problemas de sincronización de grandes sistemas integrados, entre las que se encuentran: topología sencilla, alta regularidad, modularidad, altamente integrables y compatibles con la tecnología CMOS, generan frecuencias en el rango de los GHz, ocupan una área reducida, ya que no utilizan inductores y su diseño es sencillo y directo.

Las redes propuestas dependen altamente del oscilador de anillo básico por lo que su desempeño irá de la mano de los avances que se tengan del oscilador. En este aspecto, existe una amplia investigación de trabajos relacionados con el diseño de osciladores de anillo que generan señales con frecuencias en el rango de los GHz, y reducido consumo de potencia (Pacheco *et al.*, 2004; Salim *et al.*, 2004; Wei *et al.*, 2004; Tao *et al.*, 2004; Kim, 2006). Así, con el continuo escalamiento de las tecnologías (figura 21) y la constante propuesta de nuevas topologías para las etapas de retardo, la frecuencia y el consumo de potencia del oscilador de anillo básico podrán en un futuro hacer posible obtener redes de distribución de reloj con un desempeño mayor que el de redes del tipo global, incluso utilizando una mayor cantidad de etapas (figura 22).

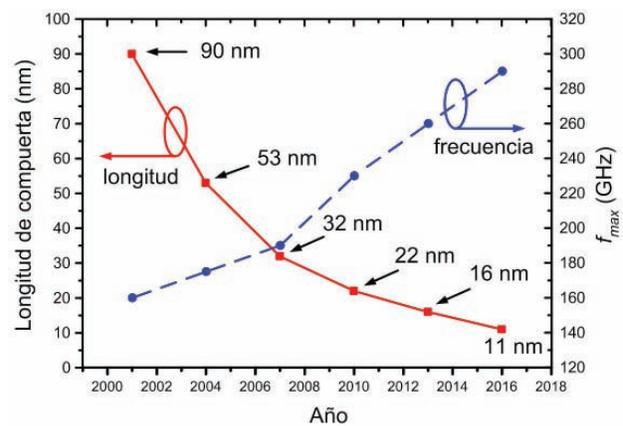


Figura 21. Tendencia de la longitud de compuerta del transistor y frecuencia máxima de operación en tecnologías CMOS

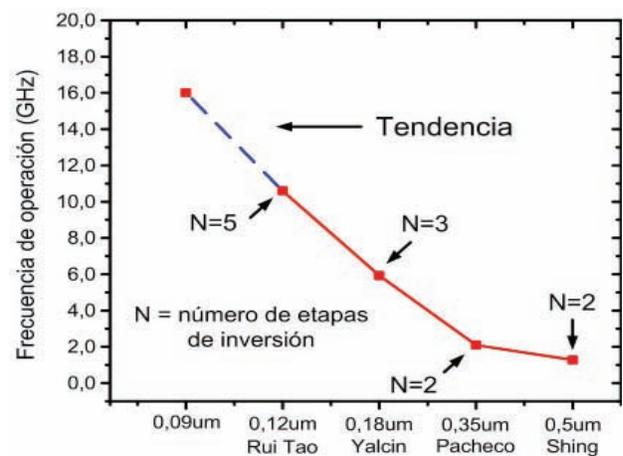


Figura 22. Frecuencia de operación de diferentes VCOs del estado del arte

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT-México) por el apoyo a través del proyecto 51511-Y.

Referencias

- Bakoglu H.B. *Circuits, Interconnections and Packaging for VLSI*, 1a ed., Addison-Wesley, 1990.
- Chen T., Huang L. World of Fractal [en línea] [Fecha de consulta 18 de Octubre de 2010]. Disponible en: http://www.math.nus.edu.sg/aslaksen/gemprojects/maa/World_of_Fractal.pdf
- Dennis S., Keutzer K. Impact of Small Process Geometries on Microarchitectures in System on a Chip. *Proceedings of the IEEE*, 89(4):467-489, 2005.

- Hall L., Clements M., Wentai L., Bilbro G. Clock Distribution Using Cooperative Ring Oscillators, en: *Seventeenth Conference on Advanced Research in VLSI*, 1997, pp. 62-75.
- ITRS: International Technology Roadmap for Semiconductors, 2009 [en línea] [fecha de consulta 18 de Octubre de 2010], edición: Process, Integration, Devices, and Structures. Disponible en: http://www.itrs.net/Links/2009ITRS/2009Chapters_2009Tables/2009_PIDS.pdf
- Kim K.H. U.S. Patent US 7,135,935 B2, November 14, 2006.
- Linares A.M., Salim M.M., Pacheco B.D. An Experimental Comparison of Clock Distribution Networks for Systems on Chip, en: *4th International Conference on Electrical and Electronics Engineering*, 2007, pp. 377-380.
- O'Mahony F., Patrick-Yue C., Horowitz M.A., Simon W.S. A 10-GHz Global Clock Distribution Using Coupled Standing-Wave Oscillators. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 38(11):1813-1820, 2003.
- Pacheco B.D., Linares A.M. A Low Power and High Speed CMOS Voltage-Controlled Ring Oscillator, en: *Proceedings of the IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, 2004, pp. 752-755.
- Rabaey J., Chandrakasan A., Nikolic B.J. *Digital Integrated Circuits: A Design Perspective*, 2a ed., Pearson Prentice Hall, 2004.
- Salim M., Linares M. Analysis and Verification of Clock Distribution Networks in Presence of Crosstalk and Groundbounce, en: *8th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems*, 2001, pp. 773-776.
- Salim M.M., Linares A.M. Interconnected Rings and Oscillators as Gigahertz Clock Distribution Nets, en: *Proceedings of the ACM Great Lakes Symposium on Very Large Scale Integration*, 2003, pp. 41-44.
- Salim M.M., Linares A.M. Analysis and Verification of Interconnected Rings as Clock Distribution Networks, en: *Proceedings of the ACM Great Lakes Symposium on Very Large Scale Integration*, 2004, pp. 312-315.
- Salim M., Aguirre M., Linares M. Fused Timing Analytical Model for Repeater Insertion and Optimization, en: *Proceedings of the IEEE 48th International Midwest Symposium on Circuits and Systems I*, 2005, pp. 720-723.
- Salim-Maza M. (tesis doctorado), México, INAOE, Junio de 2005.
- Salim M.M., Linares A.M. Redes de distribución de señal de reloj con robustez a fallas del proceso de fabricación de CI. *Proceedings Iberchip. XII*. 2007.
- Stefan-Rusu. Clock Generation and Distribution in High-Performance Processors, Enterprise Microprocessor Division, Intel Corporation, 2005 [en línea]. Disponible en: <http://www.tkt.cs.tut.fi/kurssit/8404941/S04/chapter5.pdf>
- Tao R., Berroth M. Low Power 10 GHz Ring VCO Using Source Capacitively Coupled Current Amplifier in 0.12 μm CMOS Technology. *Electronics Letters*, 40(23):1484-1486, 2004.
- Wei H.T., Jyh Y.Y., Hung C.T., Chong K.W. A 1.8V 2.5-5.2 GHz CMOS Dual-Input Two Stage Ring VCO, en: *Proceedings of the IEEE Asia-Pacific Conference on Advanced System Integrated Circuits*, 2004, pp. 134-137.
- Wood J., Edwards T.C., Lipa S. Rotary Traveling-Wave Oscillator Arrays: A New Clock Technology. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 36(11):1654-1665, 2001.
- Yalcin A.E. A 5.9-GHz Voltage-Controlled Ring Oscillator in 0.18- μm CMOS. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 39(1):230-233, 2004.

Semblanza de los autores

Mónico Linares-Aranda. Doctor en ciencias por el Centro de Investigaciones y de Estudios Avanzados del IPN, Departamento de Ingeniería Eléctrica, México DF en 1996. Desde 1986 es investigador/profesor titular en el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE) en el área de electrónica. Actualmente responsable del Laboratorio de Pruebas y Caracterización de circuitos integrados del INAOE. Sus áreas de interés son el diseño, fabricación y pruebas de circuitos integrados, integridad de señal y el desarrollo de sistemas en un solo chip (SoC).

Manuel Salim-Maza. Doctor en ciencias en electrónica por el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE), Puebla, México en 2005. Desde 2005 es ingeniero de diseño en Freescale Semiconductor, México y a partir de 2006 es líder técnico del equipo del transmisor y celdas especiales. Es profesor en la especialidad de diseño de CI en el Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Occidente (ITESO) desde 2006. Sus áreas de interés son diseño digital de alto desempeño, diseño automático y optimización.

Oscar González-Díaz. Obtuvo el grado de maestro en ciencias con especialidad en electrónica por el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE) en 2006. Actualmente realiza estudios de doctorado desarrollando el proyecto "Metodología de sincronización eficiente para sistemas en un solo chip (SoC)". Sus áreas de interés son diseño VLSI y diseño robusto de sistemas a altas frecuencias.

Wideband Indoor Radio Propagation Measurements at 5.4 GHz

Mediciones de propagación de ondas de radio en banda ancha en interiores para 5.4 Ghz

Aragón-Zavala A.

*Departamento de Electrónica y Mecatrónica
Tecnológico de Monterrey, Campus Querétaro
Correo: aaragon@itesm.mx*

Castañón G.

*Departamento de Ingeniería Eléctrica y Computación
Tecnológico de Monterrey, Campus Monterrey
Correo: gerardo.castanon@itesm.mx*

Mavrakis D.

*Informa Telecoms & Media plc
Mortimer House
Correo: D.Mavrakis@eim.surrey.ac.uk*

Cuevas-Ruiz J.L.

*Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
Tecnológico de Monterrey, Campus Estado de México
Correo: jose.cuevas@itesm.mx*

Información del artículo: recibido: septiembre de 2008, aceptado: junio de 2011

Abstract

Wideband indoor time domain measurements at 5.4 GHz are presented in this paper. A swept Time Delay Cross Correlator is used to measure the radio channel, and the measurements are performed using an autonomous robot that follows a predefined route line-of-sight and non-line-of-sight modern office buildings. Analysis shows that the RMS delay spread follows a normal distribution whose mean does not always increase with distance. Also, the global statistics of the RMS delay spread follow a truncated normal distribution with a better fit. Results are presented in the form of RMS delay spread and power delay profiles.

Resumen

En este trabajo se presentan mediciones de banda ancha de propagación de ondas de radio realizadas dentro de un edificio a 5.4 GHz. Un equipo que consiste en un medidor usando barrido del retardo de tiempos de correlación cruzada se utiliza para caracterizar el canal de radio y las mediciones se realizan utilizando un robot semi-autónomo móvil que sigue trayectorias claramente determinadas y repetibles, tanto en línea de vista como en ausencia de la misma, dentro de oficinas. Dicho análisis muestra que el retardo promedio RMS sigue una distribución normal, cuya media no siempre se incrementa con la distancia. Adicionalmente, las estadísticas globales del retardo promedio RMS siguen una distribución normal truncada usando un ajuste de curva mejor. Los resultados se presentan como retardo promedio RMS y perfil de retardo de potencia.

keywords

- broadband
- measurement
- propagation
- RMS-delay-spread

descriptores

- banda ancha
- mediciones
- propagación
- retardo RMS

Introduction

Wireless communications are the fastest growing market of all times, where a need for seamless connectivity and mobility is apparent, especially nowadays that broadband applications are becoming increasingly popular among users. In order to achieve this, the communication system, the designer has to plan carefully and take accurate account of propagation channel impairments. As modern digital cellular communication systems require larger bandwidths to support higher data rates, knowledge of the characteristics of the propagation channel becomes more significant. Moreover, accurate modelling of indoor propagation is very complicated. Wideband measurements equip the system designer with direct knowledge of the channel behaviour.

There is increased activity in the 5GHz band, not only for Wi-Fi networks, as was the initiative of HIPER-LAN a few years ago; but also for the use of unlicensed Wi-MAX backhaul to other networks, such as the Internet. Wi-MAX has been already deployed successfully for public and private networks around the world, and seems to be still a valuable option for broadband wireless access until LTE becomes fully operational. Although some of these networks are destined to provide coverage outdoors, others will be mostly used indoors, serving mobile and stationary users in environments where high bandwidth is needed. Hence there is a great need for knowledge of the wideband channel, and measurements help to identify these most important characteristics.

Various wideband measurements procedures have been presented so far (Parsons, 1992). The simplest of all is sounding the channel with a short duration pulse and sampling the received signal which is the convolution of the pulse with the channel impulse response. However, its main limitation is that it requires a high peak-to-mean power ratio to successfully detect low power echoes. Another common technique is to use a network analyzer to perform frequency domain measurements and treating the RF channel as a lossy filter. Time domain information is later obtained by inverse Fourier transform of the frequency domain data. The drawback of this measurement method is that both transmitter and receiver must be physically connected to the network analyzer and mobile measurements may not be feasible. There is also a limitation with the period of the frequency sweep, which has to be long enough to sample all multipath echoes in the channel. On the other hand, mobile measurements are difficult if the sweep time is long, but if the sweep time is kept low, the channel will not be correctly sampled, since

long echoes at the edges of the frequency range may belong to adjacent channels.

The technique chosen here to measure the channel is the Swept Time Delay Cross Correlator (STDCC) or sliding correlator, which is the easiest method to implement a wideband time sounder, since there is no need for fast sampling and data storage (Kivinen *et al.*, 1999). With this sounder, a carrier wave is modulated by a pseudo-random sequence, and is correlated at the receiver with a version of itself. This method shares the advantages of a spread spectrum communications system, where in-band interference is kept to a minimum, while the correlation process introduces processing gain (Cox, 1972).

Also, a significant advantage of the sliding correlator is that improved time resolution can be achieved by deconvolving the hardware impulse response from the received impulse response. Finally, the use of an autonomous robot platform to carry the measurements made the repeatability and traceability of the runs much easier and more accurate, a necessary requirement for the type of measurements we conducted here.

The paper is organized as follows. In section II the measurement setup, the robot platform and the measurement scenarios are presented in detail. In section III the analysis of the measurements are presented and the results are presented in section IV. Finally, the conclusions are presented in section V.

Measurement system definition

The sliding correlator is a popular method to study the mobile radio channel (Cox, 1972). The transmitter is a pseudo-random sequence generator with chip rate R_c and length m . The receiver consists of a correlator, which correlates the transmitted signal with a slightly delayed version of itself, sounding the channel every time the pseudo-codes sweep past each other. There is a need for high quality reference sources at both transmitter and receiver, since they are physically separated during each measurement. Hence, high accuracy atomic rubidium standards were employed in both ends, and were synchronized at the start of each measurement to ensure correct operation.

Time scaling or bandwidth compression is built in this sounding method, and defined from the scaling factor of the system, removing the need for fast sampling. The scaling factor is defined by the difference in clock rates as follows:

$$K = \frac{f}{f - f'} \quad (1)$$

where f and f' are the transmitter and receiver sequence frequencies. The scaling factor has to be chosen carefully to avoid severe distortion in the cross-correlation as a result of a low K -factor (Cox, 1972).

The dynamic range R of a STDCC sounder is solely dependent on the pseudo sequence length, only if system noise is ignored, and given by:

$$R = 20 \log_{10} m \tag{2}$$

In practice, however, this dynamic range is not achieved due to hardware limitations, but presents the best achievable dynamic range given a particular sequence length.

In order to study such a diverse and cluttered environment, high multipath resolution has to be employed. This is dependent on the m -sequence length and its clock rate. The highest bound of the clock rate has to be adequate to sample speed of logic circuitry (Parsons 1992).

Also, the maximum time delay that can be studied has to be taken into account, which is equal to $m\tau_0$, where m is the m -sequence length and τ_0 is its period.

Generally, the time resolution Δt is inversely proportional to the system bandwidth B , and again is limited by the hardware specifications:

$$\Delta t = \frac{1}{B} \tag{3}$$

The correlation between two correlations T can be expressed as a product of the m -sequence properties as follows:

$$T = m \times \tau \times K \tag{4}$$

where m and τ are the sequence length and period, while K is the scaling factor. From system simulations, it has been found that the optimal choice of scaling factor for $K=5m$, and (3) becomes:

$$T = 5m^2\tau \tag{5}$$

Measurement setup

As mentioned above, the setup consisted of a sliding correlator that probed the channel with 100MHz sequence rate.

The transmitter was entirely mobile, autonomous and took the part of a user walking around in a typical office environment using a wireless service. The following sections describe the operation of the transmitter and receiver.

Transmitter

A simple diagram of the transmitter is shown in figure 1. The 5.4 GHz carrier is modulated by the 100MHz m -sequence. The length of the m -sequence has been chosen as 2047 to maximize dynamic range for the given speed of the mobile and centre frequency, and the scale factor K has been chosen to be 10235. If one of the frequency standards is clocked at 100MHz, the second must therefore be at 100.0097MHz. Also, from (3) the time resolution of the sounder is calculated in 10ns, which is adequate to characterize the wideband indoor channel.

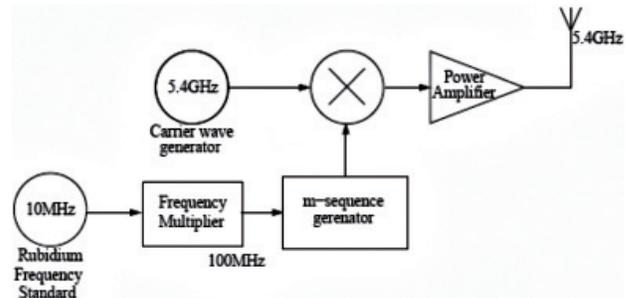


Figure 1. Sounder transmitter

Receiver

In the receiver, shown in figure 2, the signal is filtered and amplified with a low noise amplifier, and then down-converted to baseband. As mentioned previously, the signal is then multiplied with a similar m -sequence clocked at 100.0097MHz. The received signal $R_x(t)$ is the convolution of the impulse response $h(\tau, t)$ with the cross-correlation of the received and transmitted signals $R_x(t)$:

$$R_x(t) = h(\tau, t) \otimes R_{tx}(t) \tag{6}$$

where \otimes denotes convolution and τ is the delay of the impulse response and is dependent on tK .

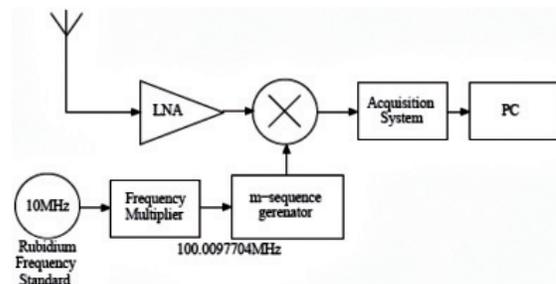


Figure 2. Sounder receiver

The outputs of the receiver were the I and Q channels of the received signal, and were connected to a computer acquisition system which performed 16-bit A/D conversion and stored the sampled data for further data processing.

Antennas

Two sets of antennas were used for the measurements. The first set consisted of omni-directional dipole antennas and the second set of a narrower beamwidth patch in the vertical plane, with a gain of 0dBi while the second had a 120 degree beamwidth with gain of 5dBi at boresight. In most of the measurements, the dipole was placed at the mobile transmitter with the nulls facing top and bottom, while the patch was placed at the receiver. This way the transmitter modelled a mobile user who requires an omni-directional antenna, while the receiver modelled the base station which uses more directional antennas with higher gain. With exception of one measurement, all the rest were performed with this antenna configuration. The transmitting antenna was placed at the height of 1.5m on the mobile platform, while the antenna at the receiving platform was placed at a height of about 1.8, on plastic poles.

Measurement procedure

The goal of these measurements was to measure the small scale effects of indoor propagation with a mobile transmitter. Three scenarios were chosen for the measurements, each investigating a different property of the channel. These were Line of sight (LOS), Non Line of Sight (NLOS) and Corridor environment. These three scenarios were performed in two different locations, one at the Centre of Communications Systems Research (CCSR) building in Guildford, UK, and the second at the Ericsson Telecommunications Centre in Burgess Hill, UK. All scenarios were performed in forward and backward directions to ensure repeatability of the measurements.

Finally, all measurements were performed in the same floor of the buildings, since floor-to-floor penetration measurements were not possible due to the limited dynamic range of the system.

The first environment was a medium-sized three storey office building at the University of Surrey (CCSR) that consists of office, corridors and some laboratory spaces. The offices were small rooms (typical room area 6m²) and larger areas (~20m²) occupied by desks and tall partitions, with light walls between the rooms. Measurements were performed on the second and third

floors, with antennas placed on the same floor during a measurement.

The ETL environment was similar to the first one, but at a much larger scale. The open plan office spaces were far larger (~100m²) and the walls reinforced, while there were more offices and open spaces. Also, the walls were far more reinforced and generally the building was more cluttered. These measurements provided characterization of two very different common office building types.

Autonomous mobile robot platform

The transmitting platform was mounted on a robot that followed a predefined track. This allowed measurement of the mobile radio channel without the interference of a human body near the transmitter or receiver, which has been shown to have significant effect on the channel (Ganesh *et al.*, 1993). The mobile platform is an advanced autonomous positioning system that has been designed and built in CCSR (Aragón *et al.*, 2000). It follows a track on the floor, performing forward, left and right steering actions. Three infrared transceivers are placed at the lowest deck and point to the floor, and are configured to sense the reflection of light from light-coloured tape. The robot corrects its position with the reading from these sensors.

The mobile platform also includes some intelligent processing to simplify its operation and allow for some powerful data processing. High resolution optical encoders were used in the wheels of the robot to accurately sample its position, along with a gyroscope to correct any errors from the simple odometry algorithm (Aragón *et al.*, 2000).

The position of the robot was transmitted wirelessly using a Digital Packet Radio Controller during each measurement. Ultrasonic sensors were included to provide a reference point for the measurements and all of the above were controlled by powerful micro-controllers.

The transmitter was mounted on the robot and the transmitting antenna was placed on top of the whole platform, on a polystyrene box to minimize interaction between the antenna and the metallic housing of the transmitter.

Measurement description

Measurements were performed in two dissimilar environments, but both classified as typical offices. This section presents the various scenarios performed for the measurements and their respective results.

CCSR measurements

The CCSR building was a π -shaped three storey building that mainly contained offices, soft partitioned cubicles, corridors and some laboratories. The majority of the CCSR measurements were performed on the third floor of this building, which mainly consisted of a long corridor which had single offices in one side, and partitioned cubicles on the other. Some measurements were performed on the first floor, which was similar to the second, except that the cubicles were replaced by laboratories and computer rooms.

Scenario 1. Line-of-Sight (LOS)

This scenario was performed in the second floor of CCSR, in a partitioned office full of desks, soft partitions and filing cabinets. The transmitter followed a π shaped route in the room, and both transmitter and receiver were equipped with the patch antennas. Figure 3 illustrates this scenario.

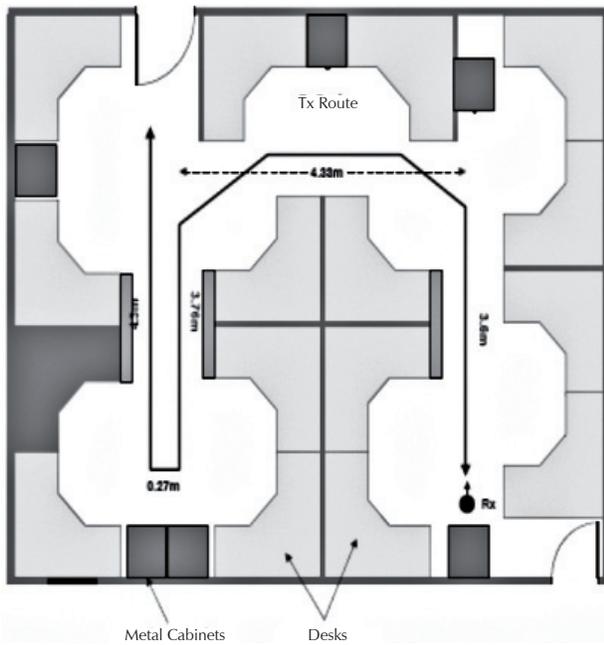


Figure 3. CCSR LOS scenario

Scenario 2. Non Line-of-Sight (NLOS)

Similar to the previous scenario, this scenario took place on the third floor of the CCSR building with the exception that the transmitter and receiver were placed in different rooms. Also, the transmitter was equipped with an omni-directional antenna. Figure 4 illustrates this scenario.

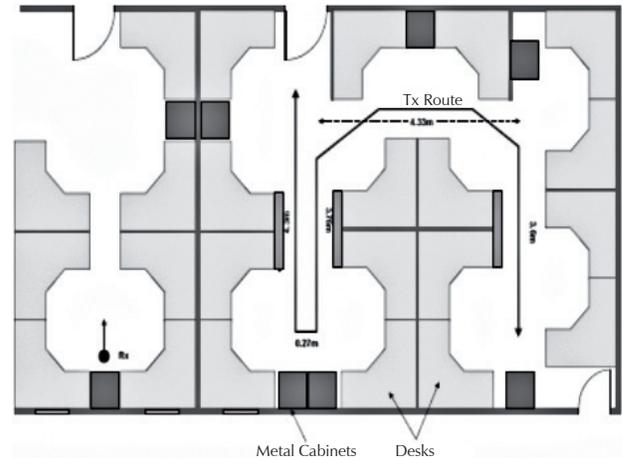


Figure 4. CCSR NLOS scenario

Scenario 3. Corridor

This scenario took place in the third floor of the CCSR Building, in the long corridor. The antennas were as in Scenario 2, omni-directional at the transmitter and patch at the receiver. Figure 5 illustrates the third floor of CCSR and the third scenario.

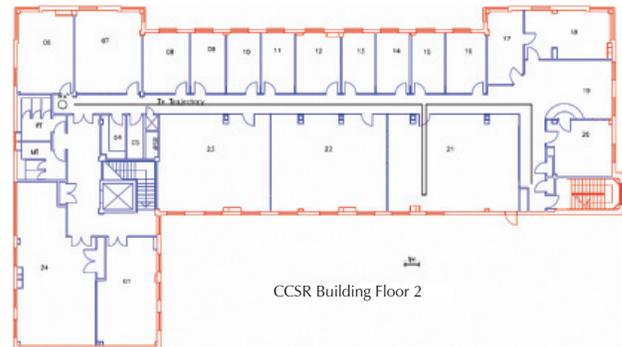


Figure 5. CCSR corridor scenario

Human effect

This scenario was performed on the second floor of CCSR, in a long corridor. The effect of people has been proven to affect the quality of the link dramatically, especially if they are present near the receiver or transmitter (Ganesh *et al.*, 1993). Also, it is reported that the worst case occurs when humans moving in the vicinity of the link randomly (Herradón *et al.*, 1999). The transmitter and receiver were stationary, while several people were placed across the link, to study the effect of mobile users. Measurement without people, with people walking across and along the link performed. Both antennas were patches and pointed at each other at a height of 1.5m.

ETL scenarios

As with the scenarios in CCSR, these were performed in the ground and first floors of the ETL building. The scenarios followed a similar pattern to those performed in CCSR, with a similar pattern of those performed in CCSR, with the exception of the NLOS case, where the receiver was placed in a small seminar room and the transmitter moved in a small seminar room and the transmitter moved in an area full of partitioned cubicles outside this seminar room.

The major differences from the CCSR environments were the lower height partitions, the more cluttered spaces in the LOS and NLOS scenarios, the thicker walls and the much wider corridors.

Data analysis

It is possible to improve time resolution with the sliding correlator, by deconvolving the system response out of the measurement with the transmitter and receiver connected with a cable and an attenuator in line. Compensation has been introduced later for this attenuator.

After a back to back measurement has been done, normal measurements can be calibrated with the following method.

Deconvolution analysis

Let the back to back received signal and the channel response to be measured be:

$$s(t) \Leftrightarrow S(f) \quad (7)$$

$$h(\tau) \Leftrightarrow H(f) \quad (8)$$

where t is time and τ is time delay. The arrow denotes that these two arguments are Fourier transform pairs. The received signal in the presence of noise in the receiver is:

$$u(t) = h(\tau) \otimes s(t) + n(t) \Leftrightarrow H(f)S(f) + N(f)$$

where \otimes denotes convolution. If we correlate with the back to back signal, we get:

$$v(t) = [h(t) \otimes s(t) + n(t)] \otimes s(-t) \Leftrightarrow [H(f)S(f) + N(f)]S^*(f) \quad (10)$$

where s^*f is the complex conjugate of $S(f)$. We can write $s(t) \otimes s(-t) = r(\tau) \Leftrightarrow R(f) = S(f)S^*(f)$. Then

$$v(t) = h(\tau) \otimes s(t) + n(t) \otimes s(-t) \Leftrightarrow V(f) = H(f)R(f) + N(f)S^*(f) \quad (11)$$

Convolution with $r(\tau)$ will reduce time resolution, but we can improve it by deconvolving the back to back impulse response. Hence:

$$Y(f) = \frac{H(f)R(f) + N(f)S^*(f)}{R(f) + \lambda} \quad (12)$$

From the previous equation we can see that in the absence of noise, this gives an exact estimate of the channel. However, if $S(f) \rightarrow 0$ at $\rightarrow f_{clk}$, noise in the region of f_{clk} is magnified hugely. This will potentially obliterate the measured impulse response when translating back to the time domain. Therefore, we must add a small offset to the denominator of (12) to compensate for this:

$$Y(f) = \frac{H(f)R(f) + N(f)S^*(f)}{R(f) + \lambda} \quad (13)$$

In the analysis, λ took values of 0.005 to 0.01. Ideally, delay resolution is maximized for a very small value of λ (Kivinen *et al.*, 1999), but noise is amplified as λ is made smaller.

RMS delay spread

The RMS delay spread is the most significant description of the mobile channel. It is defined as:

$$\tau_{rms} = \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{\infty} (t - \tau_m)^2 |h(t)|^2 dt}{\int_{-\infty}^{\infty} |h(t)|^2 dt}} \quad (14)$$

where $h(t)$ is the impulse response of the channel and τ_m is the mean delay:

$$\tau_{rms} = \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{\infty} t |h(t)|^2 dt}{\int_{-\infty}^{\infty} |h(t)|^2 dt}} \quad (15)$$

The mobile channel is very sensitive to the value of the RMS delay spread, since it is an indication of the multipath severity and potential Inter Symbol Interference (ISI) on the channel. It has been mentioned in the literature that communications system can support data rates of up to a few percent of the inverse of the RMS delay spread without RAKE reception or equalization (Hashemi *et al.*, 1994). However, it has also been reported that RMS delay spread is an important parameter in certain cases (Glance *et al.*, 1983).

Goodness of fit tests

Goodness of fit tests are used to estimate whether a given signal follows a given distribution function. There

are several tests suitable for the task, but the most important ones are Kolmogorov-Smirnov and Anderson-Darling tests.

The Kolmogorov-Smirnov test has widely been used in mobile communications for goodness of fit tests. It is based on the following formula (Kraft *et al.*, 1968):

$$D_n = \sup |F_n(t) - F(t)| \tag{16}$$

where D_n is the sample distribution defined by:

$$F_n(t) = \frac{\text{no.of } x_i \leq t}{n} \tag{17}$$

where F is the hypothetical distribution function and n is the number of measured samples.

The Anderson-Darling test is based on the following equation (Stephens, 1974):

$$A^2 = \frac{\left\{ \sum_n^{n-1} \ln(F) + \ln(1 - F_{n+1-i}) \right\}}{n} - n \tag{18}$$

Both statistics are then compared to tables found in literature, and the measured data either fail or pass the given tests. The Kolmogorov-Smirnov is less powerful than the Anderson-Darling test, since it concentrates on the centre of the distribution, but not at the tails. Also, it performs well up to a sample size of 50, after which it performs poorly compared to the Anderson-Darling test.

The latter also is not limited to the centre of the distribution. Both tests have been performed on the RMS delay spreads of the measured data.

Results

This section presents some of the results from the measurements in most common formats. In almost every case, there is strong correlation in the forward and backward cases.

Power delay profiles

Sample Power Delay Profiles are shown in figures 6 and 7. It can clearly be seen that the cross polar component is in all cases lower than the co-polar, as expected. It is interesting to note though, that especially in the CCSR scenarios, that the cross-polar LOS component is attenuated or does not even exist, but scattered paths are strong and almost equal to the co-polar ones. However, this does not apply to the second pair of PDPs shown, since the first PSP is from a pure LOS case, where most of the power of the impulse response is in the LOS component, while the second is from ETL corridor which remains empty. Finally, it has been confirmed that the scattering objects are displayed as an exponentially decaying impulse in the impulse response (Saleh *et al.*, 1987), for a variety of reasons. These can be diffuse or multiple reflections near the transmitter or receiver.

Figure 8 shows the Power Profile (PDP) of a forward corridor measurement in CCSR. A significant secondary reflection is present which exhibits decaying delay since the transmitter is traveling towards the scattering object. Since the measurements were performed in such a cluttered environment with scatterers always near the transmitter and receiver, it was not always possible to correctly identify different clusters in the PDPs, unless

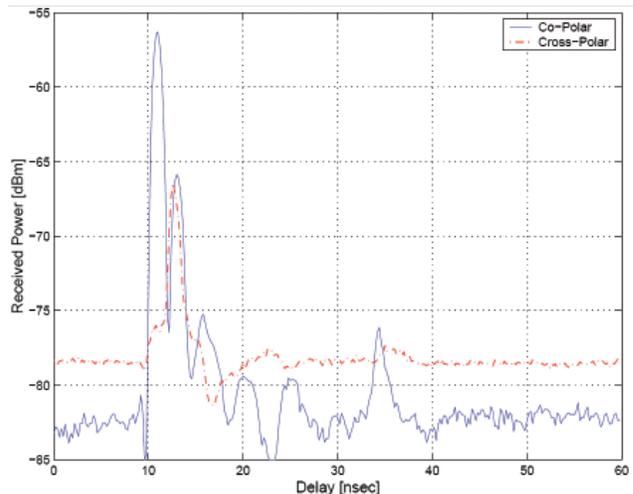
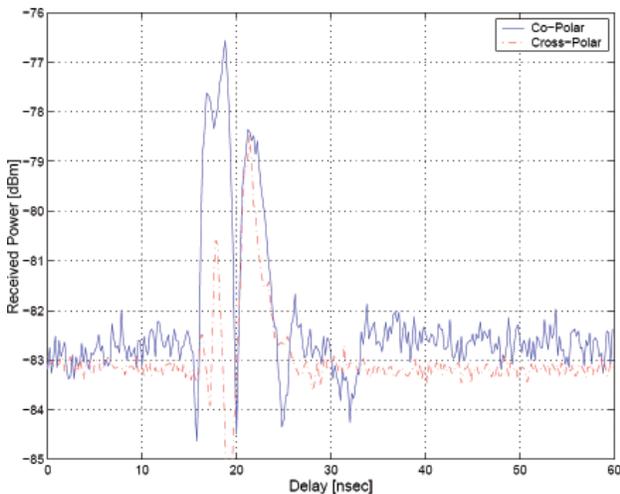


Figure 6. PDPs of NLOS and corridor measurements in CCSR

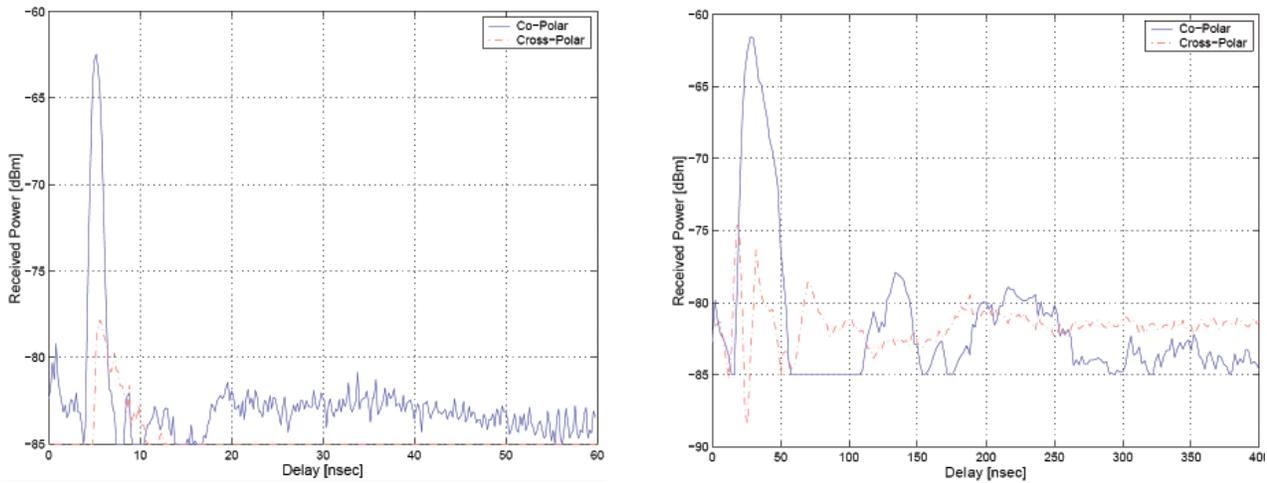


Figure 7. PDPs of LOS and corridor measurements in ETL

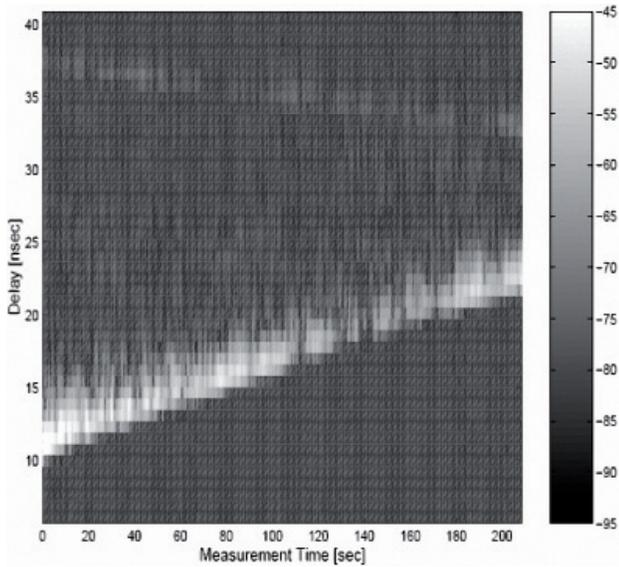


Figure 8. PDP of corridor measurement in CCSR

strong scatterers existed in the path of the transmitter, like the one shown in figure 9.

Effect of humans

This test studied the effect of people in a 5m link setup on a corridor. The results were compared with the free space case, and with people walking across and along the link, or just being stationary. The excess attenuation is not significant when only one person is walking across the link, but severe fluctuations appear when all four people were walking across the link randomly. Excess attenuation for this case is up to 15dB. However, it is interesting to note that the worst case is when one person is walking along the link, causing excess attenuation of up to 20dB.

A sample PDP is shown in figure 10, where all humans were walking across the link during the measurements.

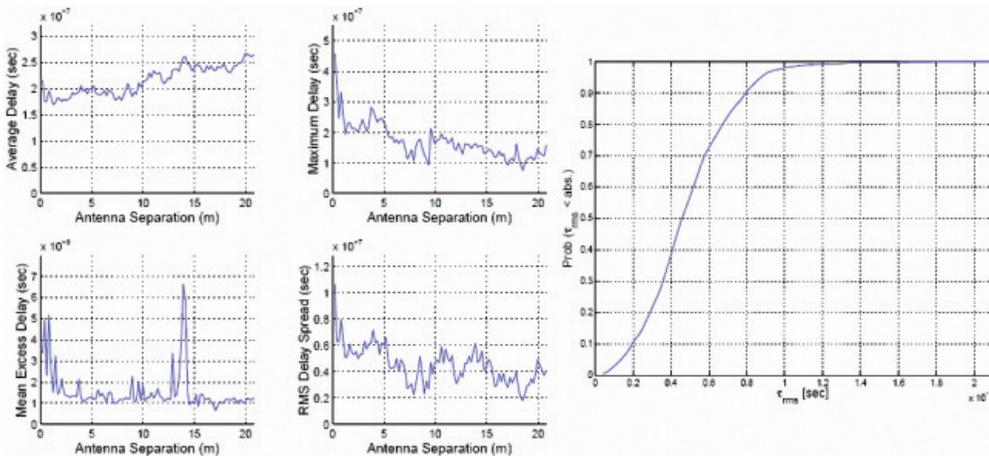


Figure 9. CCSR corridor co-polar delay statistics

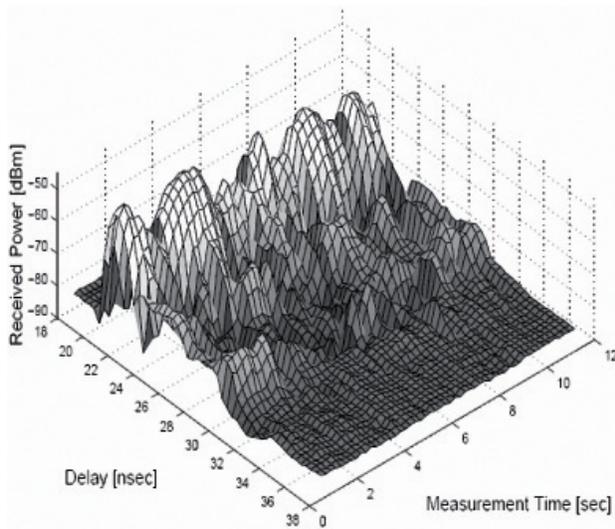


Figure 10. Human effect PDP

Local statistics of the RMS delay spread

Local statistics are defined as the results of a single scenario or a single measurement within a scenario. The significance of the results is quite important since they give information about each case separately, and help distinguish which case is suitable for communication.

Figures 11 and 13 illustrate the delay statistics for the CCSR and ETL LOS and NLOS scenarios, for both polarizations received. In the LOS cases, the mean delay is increasing, since the transmitter is moving away from the receiver. On the other hand, the RMS delay spread is decreasing. The antennas used for this scena-

rio were both patches, and pointed away from each other. Hence, at the beginning of the measurement there was no direct path between the two antennas, but as the measurement progressed, the transmitter and receiver came into line-of-sight. On the other hand, in the NLOS case, the RMS delay spread is increasing, since a dipole was used at the transmitter.

It is interesting to note that in some of the measurements, the cross-polar. This is explained as the lack of dynamic range of the system which is not able to always analyze the higher delay and attenuated paths that contribute to the RMS delay spread.

The RMS delay spread has previously been found to follow a normal distribution with mean that increases with antenna separation (Hashemi, 1993), (Sexton *et al.*, 1989) or even that it stays constant due to equipment limitations (Varela *et al.*, 2001). In our analysis, it has been confirmed that indeed local characteristics of the RMS delay spread follow closely a normal distribution. Also, in the mobile measurements performed, the mean of the RMS delay spread does not always increase with distance, especially in the corridor scenario in CCSR, where it decreases with the antenna separation. This was confirmed with both forward and backward cases. The area near the receiver was more cluttered than the rest of the run, which may account for the decreased delay spread as the transmitter moves away from the receiver. Also, the reflected paths from the walls start to group up as the transmitter moves away from the receiver, resulting in a lower delay spread. Finally, due to the limited dynamic range of the measurement system, higher delay paths which are attenuated further are not

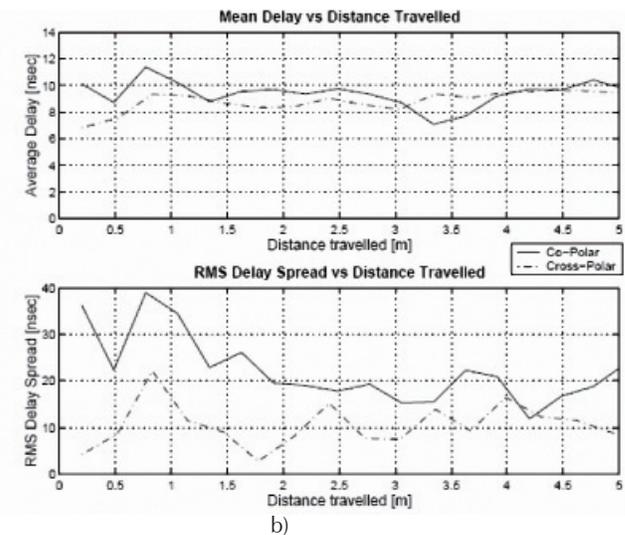
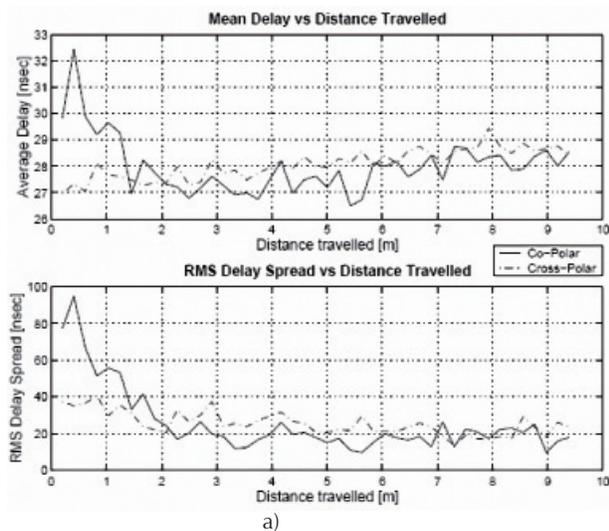


Figure 11. LOS co- and cross-polar delay statistics, a) CCSR and b) ETL

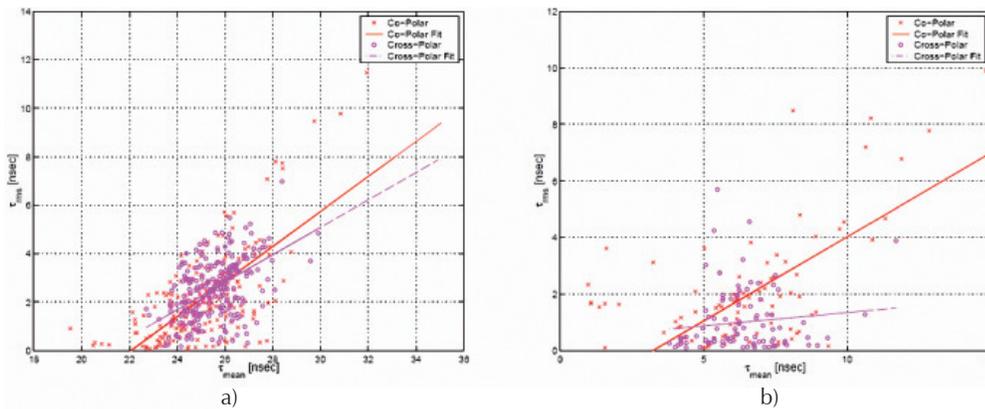


Figure 12. LOS co-and cross-polar RMS delay spread vs. mean delay, a) CCSR and b) ETL

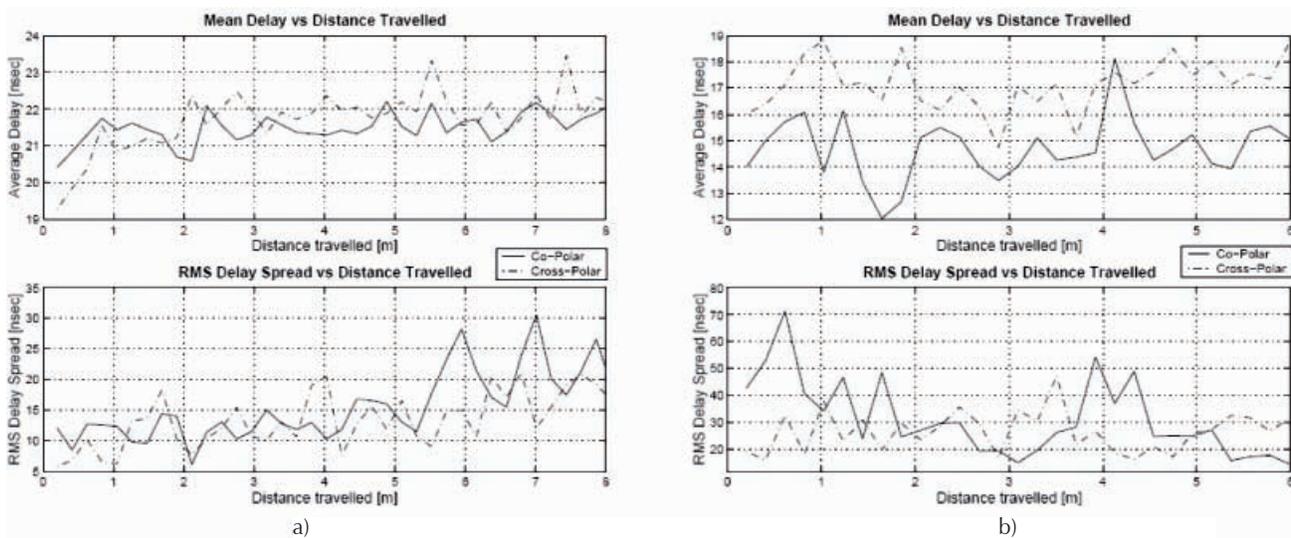


Figure 13. NLOS cross-polar delay statistics, a) CCSR and b) ETL

distinguishable and do not contribute to RMS delay spread.

As seen from figure 12 the transmitter is moving away from the receiver, resulting in increasing mean delay throughout the measurement. However, the RMS delay spread decreases with antenna separation. The cdf of the RMS delay spread follows a normal distribution as can be seen from the same figure.

The local statistics have been checked against a normal distribution with the goodness of fit tests mentioned above. The results passed both tests for 90% confidence interval and fit closely a normal distribution.

Global statistics

Global statistics are defined as the results of a full site measurement, these being in CCSR or ETL. In global

statistics, the RMS delay spread follows a truncated normal distribution. This is in contrast with various publications (Hashemi *et al.*, 1994) which mention that the RMS delay spread always follows a normal distribution for both global and local statistics. As before, the results were tested against a truncated interval of 90% with both the Kolmogorov-Smirnov and Anderson-Darling tests.

It is also interesting to note that the RMS delay spread is highly dependent on the environment of the measurements. In the CCSR building, minimum RMS delay spread was observed in the LOS scenario, moderate at the NLOS case, and maximum at the corridor scenario. On the other hand, these were quite different for the ETL building. Minimum RMS delay spread was observed for the LOS case, moderate for the corridor case, and maximum for the NLOS case. This can be easily explained since the corridor scenario in the CCSR

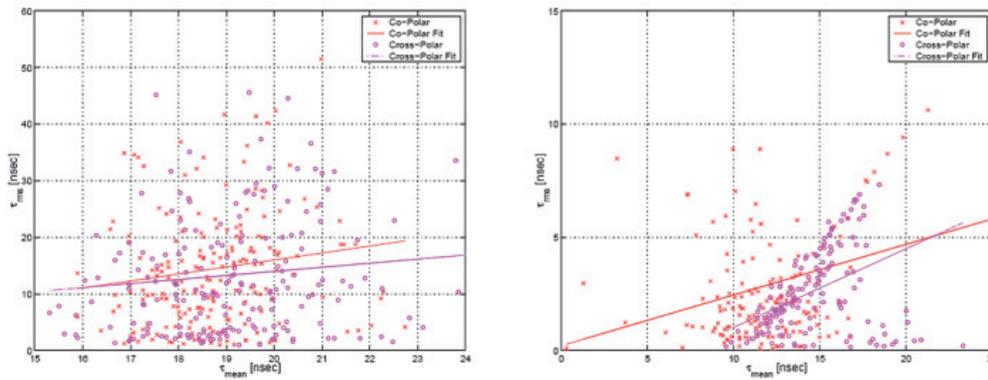


Figure 14. NLOS co-and cross-polar RMS delay spread vs. mean delay, a) CCSR and b) ETL

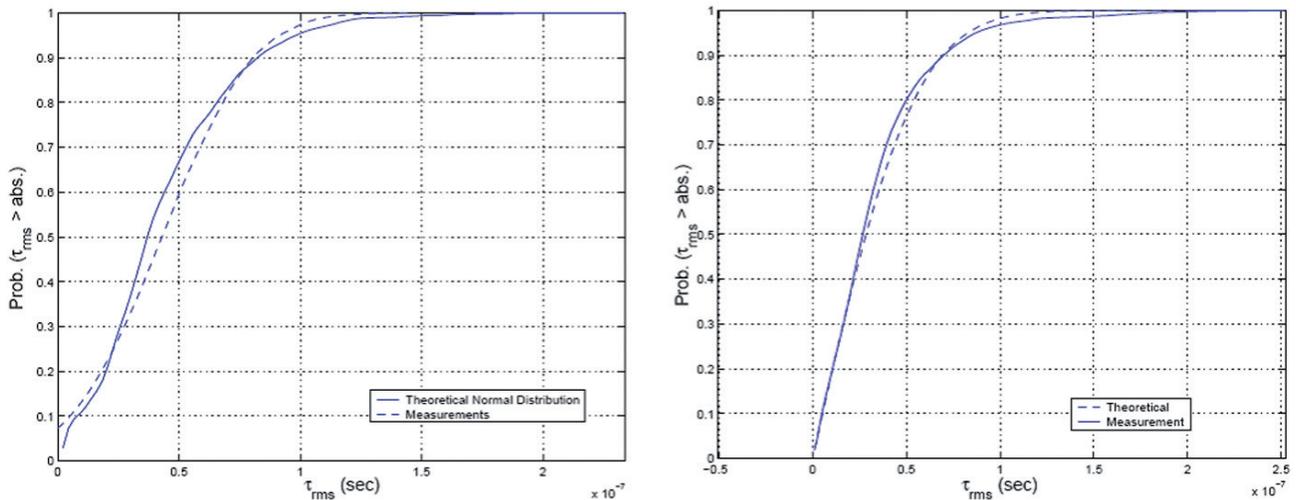


Figure 15. CCSR statistics, a) Local and b) Global

building was a quite cluttered environment, where in ETL it was a wide empty corridor. Also, in the ETL building, the NLOS case was performed in a much bigger open plan office than the corresponding CCSR scenario, resulting in increased RMS delay spread, (figures 14, 15).

Summary and conclusions

Analysis of wideband radio measurements at 5.4GHz in two different building was presented. Time-domain analysis using the sliding was presented, which gave impulse response estimates of the radio channel. Using this data, local and global analysis spread variations in these environments. Results have been presented in the form of Power Delay Profiles and delay statistics.

The RMS delay spread showed good fit to a normal distribution in local statistics, but a truncated normal

distribution was a better fit for global statistics, being a disagreement with various publications. Also, the mean of the RMS delay spread did not always increase with distance, and in some cases decreased with distance. The environment of the measurements had a significant impact on the RMS delay spread, especially when the measurements were performed in a cluttered or an empty environment.

Finally, temporal measurements with humans interfering with the link were performed, showing that significant fading occurs when there are random movements in the vicinity of the link.

Acknowledgments

The authors would like to acknowledge the help of Dr. Mauro Fiacco and Dr. Stravros Stavrou for their help with the measurement analysis and hardware.

References

- Aragón A., Saunders S.R. Mobile Robots for Indoor Radio Propagation Measurements, on: *European Advanced Robotics Systems Masterclass and Conference—Robotics 2000*, April 2000, vol. 2, p. 8.
- Cox D. Delay Doppler Characteristics of Multipath Propagations at 910 MHz in a Suburban Mobile Radio Environment. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, AP-20(5):625-635, September 1972.
- Ganesh R., Pahlavan K. Statistics of Short Time and Spatial Variations Measured in Wideband Indoor Radio Channels. *IEEE Proceedings H: Microwaves Antennas and Propagation*, 140(4):297-302, August 1993.
- Glance B., Greenstein L.J. Frequency-Selective Fading Effects in Digital Mobile Radio with Diversity Combining. *IEEE Trans. Commun.*, 31(9):1085-1094, 1983.
- Hashemi H. Impulse Response Modeling of Indoor Radio Propagation Channels. *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, 11(7):967-978, September 1993.
- Hashemi H., Tholl D. Statistical Modeling and Simulation of the RMS Delay Spread of Indoor Radio Propagation Channel. *IEEE Trans Vehic. Technol. Conference*, 43(1):110-120, 1994.
- Herradón-García R., Jiménez F., Hernando J.M. Spatial and Time Variations of Wideband Indoor Radio Propagation, on: *VTC 99: IEEE 49th Vehic. Technology Conference*, 1999, vol. 1, pp. 194-198.
- Kivinen J., Korhonen T.O., Aikio P., Gruber R., Vainikainen P., Häggman S.G. Wideband Radio Channel Measurement System at 2 GHz. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 48(1):39-44, February 1999.
- Kraft C.H., Van-Eeden C. *A Nonparametric Introduction to Statistics*, The Macmillan Company, 1968.
- Parsons J.D. *The mobile radio propagation channel*, Halsted Press, 1992.
- Saleh A.A.M., Valenzuela R.A. A Statistical Model for Indoor Multipath Propagation. *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, SAC-5(2):128-137, February 1987.
- Sexton T.A., Pahlavan K. Channel Modeling and Adaptive Equalization of Indoor Radio Channels. *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 7, January 1989.
- Stephens M.A. EDF Statistics for Goodness of Fit and Comparisons. *J. Amer. Stat. Assoc.*, 69(347):730-737, September 1974.
- Varela M.S., Sánchez M.G. RMS Delay and Coherence Bandwidth Measurements in Indoor Radio Channels in the UHF Band. *IEEE Trans. Veh. Technology*, 50(2):515-525, March 2001.

Bibliography

- Bultitude-Melançon R.J.C., Zeaghloul H., Morrison G., Prokki M. The Dependence of Indoor Radio Channel Multipath Characteristics on Transmit/Receive Ranges. *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, 11(7):979-990, September 1993
- ETSI Technical Specification 101475 v 1.1.1. Broadband Radio Access Networks, HIPERLAN Type 2, Physical Layer. Technical report, April 2000.
- Honcharenko W., Bertoni H.L., Dailing J.L., Qian J., Yee H.D. Mechanisms Governing UHF Propagation on Single Floors in Modern Office Building. *IEEE Trans. Veh. Technology*, 41(4):496-504, November 1992.
- Lafortune J.F., Lecours M. Measurement and Modeling of Propagation Losses in a Building at 900 MHz. *IEEE Trans. Veh. Technology*, 39(2):101-108, May 1990.
- Santamaría A., López-Hernández F.J. *Wireless LAN Systems*, Artech House, 1993.

About the authors

Alejandro Aragón-Zavala. He completed a BSc in Electronics and Communications Engineering at Tecnológico de Monterrey, Campus Querétaro México, in 1991. In 1998, he obtained an MSc with distinction from the University of Surrey, UK, in Satellite Communication Engineering, and in 2003 a PhD in Mobile Communication Systems, with a major in indoor propagation at the University of Surrey, in the UK. He worked as a project manager for Hylsa, Puebla, Mexico, for five years, as well as a part-time lecturer for Universidad Iberoamericana, also in Puebla, Mexico. In 1998, he joined Cellular Design Services Ltd. (now Red-M) as a Research Fellow, and in 2000 he became In-building Radio Consultant within the same company. In 2002 he was promoted to Senior In-building Consultant, working as a member of the Radio Technology Group. Currently, is working as Head of Electronics-Mechatronics Department at Tecnológico de Monterrey, Campus Querétaro. He is also an associate consultant for Real Wireless Ltd. in the United Kingdom. He is SNI level 1 researcher. He is the author of two books and more than 25 international papers.

Dimitris Mavrakis. is a freelance partner of Informa Telecoms & Media and specialises in telecoms development. He is the leading or co-author of several strategic reports, including IMS Opportunities and Challenges, Future Mobile Computing and Wireless Automation. He has over five years' experience in the telecoms market and has previously played a leading role in several UK and global research contracts during his academic career. He holds a BSc in Electronics from the University of Kent, United Kingdom, in 1998; an MSc in Satellite Engineering from the University of Surrey, UK, in 1999 and a PhD in Mobile Communications from the same University, in 2003. He was the marketing director of Solar Photon, in 2008; and associate analyst for Vision Mobile Ltd., in 2007; project manager for Waveplan, Ltd. from 2003 to 2005 and research fellow at the University of Surrey in 2002.

Gerardo Castañón. He is associate professor, investigador nacional nivel 1 (SNI I) in Mexico. Member of the Academy of Science in Mexico, He received the Bachelor of Science in Physics Engineering from the Monterrey Institute of Technology and Higher Education (ITESM), México in 1987. He received the Master of Science degree in Physics (Optics) from the Ensenada Research Centre and Higher Education, México in 1989. He also received the Master and PhD degrees in Electrical and Computer Engineering from the State University of New York (SUNY) at Buffalo in 1995 and 1997 respectively. He was supported by the Fulbright scholarship through his PhD studies. From January of 1998 to November of 2000 he was a research scientist working with Alcatel USA Corporate Research Center in Richardson TX, USA. From December of 2000 to August of 2002 he was a senior researcher with ujjitsu Network communications doing research on ultra high speed transmission systems. He is now working in the Center of Electronics and Telecommunications at ITESM since September of 2002. Has over 50 publications in journals and conferences and 2 international patents. He frequently acts as a reviewer for IEEE journals. He is a senior member of the IEEE Communications and Photonics societies.

José Luis Cuevas-Ruiz. Received his PhD from Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Spain, in 2005, where he was involved in the HeliNet and CAPANINA projects related to high-altitude platform systems. His research interests include High Altitude Platforms (HAPS), wireless communications and channel modelling. He is the author of the book "High Altitude Platforms for Wireless Communications", Wiley, 2008, and has published more than twenty international research papers in radiocommunications. He has been with Tecnológico de Monterrey Campus Estado de México since 1999, and currently he is Head of the Mobile Communications Research Group at Campus Estado de México.

Avances tecnológicos en la producción de alginatos en México

Technological Advance for Alginate Production in Mexico

Hernández-Carmona G.

*Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas
Instituto Politécnico Nacional
Correo: gcarmona@ipn.mx*

Rodríguez-Montesinos Y.E.

*Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas
Instituto Politécnico Nacional
Correo: yrodriguez@ipn.mx*

Arvizu-Higuera D.L.

*Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas
Instituto Politécnico Nacional
Correo: darvizu@ipn.mx*

Reyes-Tisnado R.

*Centro Regional de Investigaciones Pesqueras de La Paz
La Paz, Baja California Sur
Correo: rulreyes@prodigy.net.mx*

Murillo-Álvarez J.I.

*Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas
Instituto Politécnico Nacional
Correo: jmurilloa@ipn.mx*

Muñoz-Ochoa M.

*Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas
Instituto Politécnico Nacional
Correo: mmunozo@ipn.mx*

Información del artículo: recibido: marzo de 2009, reevaluado: octubre de 2010, aceptado: mayo de 2011

Resumen

Los alginatos son polisacáridos que se extraen de las algas cafés. Estos tienen propiedades para formar geles y soluciones altamente viscosas, por lo que se emplean en la industria alimenticia, farmacéutica y textil, entre otras. Este trabajo de revisión describe las etapas optimizadas a nivel planta piloto para la producción de alginatos. El proceso consiste en tratar las algas con solución de HCl a pH 4, extraer el alginato con una solución de Na_2CO_3 a pH 10 calentando a 80°C y diluir la pasta y separar las partículas insolubles en un filtro rotatorio al vacío. El alginato en solución se precipita con una solución de CaCl_2 para obtener fibras insolubles. Estas fibras se tratan con HCl para obtener el ácido alginico y finalmente se neutralizan con Na_2CO_3 para obtener alginato de sodio. El alginato se seca con aire caliente, se pulveriza y se tamiza a diferentes tamaños de malla. Se describen los diferentes productos obtenidos y sus propiedades físicas y químicas. Finalmente se resumen los costos de producción y se discuten las barreras que han limitado la producción de alginatos a nivel comercial en México, entre las que se incluyen la falta de un diseño industrial, el costo internacional de los alginatos, las políticas para otorgar las concesiones de los mantos de algas explotables y el papel de los inversionistas.

Descriptores

- algas
- alginatos
- costos
- polisacáridos
- producción

Abstract

Alginates are polysaccharides extracted from brown seaweeds. They are used in food industry, pharmaceutical, textile, among other, because of their properties to give high viscous solution and gel forming. This review describes the optimized process at pilot plant level for alginate production. The process includes washing the algae with HCl at pH 4, extraction of the alginate in Na_2CO_3 solution at pH 10 and heating to 80°C , dilution of the paste and filtration with a vacuum rotary filter. Alginate precipitation is carried out by adding CaCl_2 filtration. The fibers obtained are treated with HCl to obtain alginic acid. The product is neutralized with Na_2CO_3 to obtain sodium alginate. The product is dried with hot air, milled, and screened at different mesh sizes. We described the different products obtained and their physical and chemical properties. Finally, costs and barriers found that limit the alginate production at commercial level in Mexico are discussed, including the lack of the industrial design, the international cost of the alginates, the policy to give the seaweeds beds concessions, and the role of the investors.

Keywords

- algae
- alginates
- costs
- polysaccharides
- production

Introducción

Las algas marinas son recursos valiosos que se han utilizado de dos formas diferentes en la alimentación. Directamente en su forma natural (Nirmal *et al.*, 2009) o bien, pueden ser procesadas para obtener compuestos químicos, que a su vez, se emplean en diversos tipos de industrias. A los compuestos extraídos de las algas que tienen la propiedad de formar soluciones viscosas o geles, se les llama ficocoloides. Los principales ficocoloides de importancia comercial son el alginato, que se extrae de las algas café; el agar y la carragenina que se extraen de las algas rojas (McHugh, 1987). Los alginatos son sales del ácido algínico que forman parte de la pared celular y de las regiones intercelulares de las feofitas. En su estado natural, se encuentran formando geles con iones Ca^{+2} , Na^+ , Mg^{+2} , Sr^{+2} y Ba^{+2} (Haug, 1964). Su función es conferir fuerza y flexibilidad al tejido del alga. El alginato es un polímero del ácido β -D-manurónico y el ácido α -L-gulurónico, unidos por enlaces glucosídicos (1-4), agrupados en tres tipos de segmentos: D-manurónico (M), L-gulurónico (G) y un tercer segmento de diadas con ambos ácidos alternados (MM, GG, MG). Estudios de resonancia magnética nuclear han demostrado que también hay secuencias de triadas (GGG, MGG, MGM) (Smidsrod y Draget, 1996; Muriello y Hernández, 2007; Yabur *et al.*, 2007).

Los alginatos se utilizan ampliamente en la industria para darle consistencia y un aspecto adecuado a productos lácteos y productos enlatados; la textura es mejorada y la humedad es retenida con alginatos en productos de pastelería, como las mezclas para pasteles y los merengues. En alimentos congelados las propiedades de los alginatos aseguran la textura suave y el descongelamiento uniforme. La estabilización de la es-

puma de la cerveza es una de las funciones más usuales de los alginatos. Para las impresiones en tela, se usan como espesante de la pasta que contiene la tinta. En la fabricación del papel produce una película suave y continua y una superficie con menos pelusa. Los alginatos también encuentran uso en la fabricación de varillas para soldar. En el campo de la medicina, el alginato se utiliza como agente desintegrador de tabletas y en la elaboración de vendas para heridas que son absorbidas por el cuerpo y no tienen que ser removidas (Hernández y Rodríguez, 1990). Los alginatos se usan para tratar úlceras gástricas, disminuyen el nivel de colesterol plasmático, inhiben las granulaciones y mastocitos, que están implicados en las reacciones de alergia (Nagaoka, *et al.*, 2000). La elaboración de material de impresión dental (Reyes *et al.*, 2004) y la inmovilización de organismos benéficos para el tratamiento de aguas residuales y como promotores del crecimiento de plantas (Yabur *et al.*, 2007), son tecnologías que ya se encuentran estudiadas en México. Cada día se descubren más usos para estos compuestos en diferentes industrias y la mayoría de los estudios recientes sobre el tema de los alginatos se ha concentrado en nuevas aplicaciones como: acarreadores de proteínas (Coppi *et al.*, 2001); intercambiadores de metales (Davis *et al.*, 2004; De Stefano *et al.*, 2005); incorporación en textiles (Gorenšek y Bukošek, 2006); inmovilización de levaduras (Pajic *et al.*, 2007); micro encapsulados (Schuldt y Hunkeler, 2007; Mørc, 2008); absorción de radiación ultravioleta (Tavares, 2007); control de la colitis ulcerativa (Alireza *et al.*, 2008), promotor del crecimiento de las raíces de las plantas terrestres (Iwasaki y Matsubara, 2000). Entre los usos indirectos, se encuentra que los residuos del proceso de extracción de alginatos, pueden ser utilizados como fertilizante, ya que la bacteria *Gracilibacillus*

(A7) degrada el alginato a oligosacáridos durante el proceso de composta (Tang *et al.*, 2009). Estudios recientes describen el potencial económico de la producción de bioetanol a partir de algas, basados en el hecho de que la materia prima puede derivarse de los residuos producidos por la industria de alginato, que está altamente enriquecida en azúcares como manitol y laminaran, de tal modo que los costos iniciales se reducen drásticamente (Moen *et al.*, 1997; Horn *et al.*, 2000). En el tema de producción sólo se han abordado las líneas generales del proceso (Dragnet *et al.*, 2005; Mchugh, 2003) y la etapa de extracción (Vauchel *et al.*, 2008a, 2008b y 2009).

Durante el año correspondiente al segundo semestre de 2007 al primer semestre del 2008, México importó 535 toneladas de alginatos de 12 países diferentes, entre los que destacan Estados Unidos, Francia, Reino Unido, Irlanda, Chile, Japón y Noruega. Un 80% de la importación fue realizada por 17 empresas y se reporta un exportador, que probablemente revende lo que importa, ya que en México no hay fábricas de producción de alginatos. El costo de importación anual de alginatos fue de 6.2 millones de dólares (11.6 dólares por kg). Los tipos de alginatos que se importaron fueron: 49.7% de alginato de propilenglicol (266 t a 11.7 USD kg⁻¹), 45.3% de alginato de sodio (242.5 t a 10.2 USD kg⁻¹), 2.94% de alginato de magnesio, calcio y amonio (2.9 t a 29 USD kg⁻¹), 1.44% de alginato de potasio (7.7 t a 12.8 USD kg⁻¹) y 0.5% de ácido alginico (2.8 t a 19 USD kg⁻¹) (Secretaría de Economía, 2009).

La especie más importante para la producción de alginatos en México es el Sargazo Gigante (*Macrocystis pyrifera*) por su alto contenido de este ficocoloide y su abundancia (Hernández, 1985; Rodríguez y Hernández, 1991). Esta especie se distribuye en la costa noroccidental de la península de Baja California, desde la frontera con Estados Unidos hasta Punta San Hipólito, BCS. Se ha estimado que existe un potencial cosechable entre 35,812 t (invierno) a 97,803 t (verano) (en peso fresco) (Casas *et al.*, 1985; Hernández *et al.*, 1989a, 1989b, 1991). Esta especie tiene el ritmo de crecimiento más rápido que cualquier otro organismo marino. Cuando la temperatura es baja, existe una amplia disponibilidad de nutrientes y la cantidad de luz es abundante, sus frondas pueden llegar a crecer hasta 50 cm por día⁻¹ (Reed, 1994). En México, su crecimiento promedio es 14.7 cm día⁻¹ (verano) y 23.3 cm día⁻¹ (invierno). Esto sugiere que las algas podrían cosecharse dos veces al año con una regeneración de 70%, sin que se presentaran efectos adversos para la planta o los organismos que viven asociados al Sargazo (Hernández, 1996). *Macrocystis pyrifera* se empezó a cosechar en 1958 con una

producción promedio de 40,000 de toneladas anuales (peso fresco), la cual se vende a la compañía Kelco en California, EU para la extracción de alginatos; sin embargo, esta empresa cerró en 2006 y ahora se cosecha una pequeña porción para la elaboración de fertilizantes y como alimento para el abulón (Productos del Pacífico, com. pers.). Esta situación crea una oportunidad de inversión en la que se tiene una amplia disponibilidad de recurso sin explotar y además se cuenta con el proceso tecnológico para la obtención de alginatos.

El presente es un trabajo de revisión sobre lo que se ha desarrollado del tema de la producción de alginatos, a pesar de que ya se tienen algunas publicaciones científicas sobre las etapas independientes del proceso de producción (Hernández *et al.*, 1989a, 1989b, 2002; McHugh *et al.*, 2001), la comunidad científica e industrial no ha tenido acceso a la información de este proceso de forma completa y detallada, prueba de ello es que aún se publican trabajos en los que se emplean procesos menos eficientes o que son de uso en laboratorio y no son aplicables en la industria. De acuerdo con la revisión de la literatura, se ha encontrado que los procesos de extracción de alginatos que han utilizado otros autores, usan soluciones de reactivos que se preparan en ciertas concentraciones normales o porcentuales y se adicionan al proceso, por ejemplo: carbonato de sodio al 1%. Esta forma de añadir los reactivos no considera el pH al que se llega en las diferentes etapas del proceso (Nishigawa, 1985; Younis *et al.*, 2000; Fenoradosa *et al.*, 2010). Al no llevar las diferentes etapas al pH correcto de reacción, se puede ver afectado el rendimiento y la calidad del alginato obtenido, como se verá en las siguientes descripciones. Las etapas que se describen a continuación, contienen detalles que no habían sido publicados anteriormente.

Proceso de producción de alginato de sodio a nivel planta piloto

El fundamento de la extracción de alginato de las algas es convertir todas las sales de alginato en sales de sodio, disolver éstas en agua y eliminar los residuos insolubles por medio de una filtración. El proceso continúa con la adición de una sal de calcio para formar alginato de calcio, el cual tiene una textura fibrosa que no se disuelve en agua, y pueden ser separados del agua residual. El alginato de calcio se suspende en agua y se añade ácido para convertirlo en ácido alginico. Este ácido alginico fibroso se separa fácilmente. Después se coloca en un mezclador de tipo planetario con el alcohol y se añade poco a poco carbonato de sodio a la pasta, hasta que el ácido alginico se convierte en alginato de so-

dio. La pasta de alginato de sodio se extrude en forma de pellets, que luego se secan y se muelen (McHugh, 2003).

Reducción del tamaño de la materia prima

Es necesario reducir el tamaño de las algas para favorecer las reacciones químicas del proceso y facilitar el transporte del material algal. Las algas pueden ser procesadas frescas o secas. La norma para el tamaño de las algas secas y molidas es la siguiente: 100% debajo de 6 mm; 95% debajo de 3.3 mm; 2% máximo debajo de 0.3 mm. Las algas deben contener al menos 83% de materia seca (17% de humedad) y menos del 3% de arena (Kelco, com. pers.). Para la molienda se emplea un molino de martillos convencional.

Hidratación de las algas

Para ablandar los tejidos y evitar la pigmentación del alginato, las algas se hidratan con una solución de formaldehído al 0.1% (mínimo 15 min, máximo 12 h). Este tiempo depende de la especie. Algunas son más blandas que otras. Las especies con estipe grueso requieren hasta 12 h. El formaldehído reacciona con los compuestos fenólicos que se encuentran dentro del alga para producir productos insolubles. La proporción de alga seca con respecto al agua es de 1:9. Esta proporción se debe minimizar a un nivel al que las algas absorban toda el agua posible y que al final de la hidratación no quede sobrenadante. Para el caso de *Macrocystis pyrifera*, a nivel planta piloto se procesaron 10 kg de alga con 90 L de solución de formaldehído al 0.1% con una pureza comercial de 37.5%. Las algas se colocaron en un tanque de acero inoxidable de 87 cm de alto x 72 cm de diámetro. Se acopló al tanque un

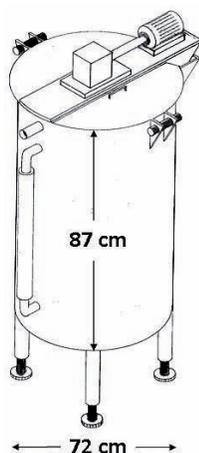


Figura 1. Tanque de hidratación y pre-extracción

motor de $\frac{3}{4}$ de HP y un motorreductor con una velocidad de salida de 120 rpm. Se empleó un eje con aspas de tipo paleta inclinadas. Estas condiciones de proceso fueron suficientes para mover el volumen de agua y las algas durante el tratamiento (figura 1, foto 1A), (Hernández *et al.*, 1999a).

El incremento en rendimiento de alginato, cuando se emplea el tratamiento con formaldehído, ha sido probado para algunas especies del género *Sargassum* (Davis *et al.*, 2004)



Foto 1. Plata piloto de producción de alginatos, A) tanque de hidratación y pre-extracción, B) marmita de extracción, C) tanque de dilución, D) filtro rotatorio al vacío marca Alar

Pre-extracción ácida

Algunos autores mencionan que este tratamiento ácido se usa para convertir las sales de alginato de calcio y otros iones (Na^+ , K^+ , etc.), en ácido algínico insoluble (Haug, 1964; Myklestad, 1968). Este intercambio no es necesario para la mayoría de las especies y el lavado sólo es para eliminar sales externas. Contrariamente, un tratamiento a pH menor a 4, como proponen otros autores (Haug, 1964; Myklestad, 1968) puede producir depolimerización del alginato y bajar su viscosidad (Hernández *et al.*, 1999a), así las algas hidratadas se drenan. La solución residual contiene laminaran y fucoidano, que se pueden separar por medio de precipitación con etanol. El drenado de las algas se puede llevar a cabo fácilmente si se tiene en el interior del tanque una malla. Las algas se dejan en el mismo tanque para el tratamiento con ácido clorhídrico (figura 1, foto 1A). Se adiciona agua al tanque con las algas hidratadas en una proporción de 10 partes de agua por una parte del alga seca inicial. Esta cantidad debe ser suficiente para que las algas se agiten libremente. Se agrega HCl industrial (con 24-28% de pureza) hasta un pH de 4 en la solución.

Las algas se agitan en el tanque por 15 min a temperatura ambiente y se drena la solución ácida residual. Las algas se lavan por 15 min con un volumen igual de agua (1:10) (McHugh, 1987; Hernández y Aguirre, 1987; Arvizu *et al.*, 1995; Hernández *et al.*, 1999a).

Extracción

Para extraer el alginato de la pared celular y la matriz intercelular de las algas, éstas se transportan por bombeo a un tanque encaquetado con suministro de vapor. Para ello se empleó una marmita encaquetada de acero inoxidable de 70 cm de altura máxima x 110 cm de diámetro, un motor de $\frac{3}{4}$ de HP y un motorreductor con una velocidad de salida de 120 rpm. Se empleó un aspa con tres paletas inclinadas, que fueron suficientes para mover eficientemente la pasta de alginato de sodio que se forma (figura 2, foto 1B). El alga pretratada se coloca en 16.6 partes de agua por una parte de algas (con base en el peso seco del alga inicial). Este volumen puede variar con la especie; las algas que producen baja viscosidad (ej. *Sargassum*) requieren menos agua (Rodríguez *et al.*, 2008). Las algas que producen mayor viscosidad requieren más agua. Se calienta la solución a 80°C y se agrega suficiente carbonato de sodio en polvo para llegar a un pH 10. El volumen de agua debe ajustarse para formar una pasta que se pueda agitar, pero lo suficientemente espesa para que la fricción entre el líquido y las algas favorezca la extracción del alginato. Para estudiar esta etapa se diseñó un experimento en el que se midió la viscosidad de la solución a diferentes tiempos. La premisa era hacer la medición aún con las algas dentro de la solución (sin filtrar) a lo largo del tiempo de extracción para encontrar el máximo valor de viscosidad que se presenta en el proceso, ya que coincide con el máximo rendimiento posible. Esta viscosidad se denominó viscosidad de proceso o viscosidad aparente (Hernández *et al.*, 1999b). Las mediciones de viscosidad aparente se realizaron en un viscosímetro Brookfield modelo LVT, con la aguja 4, que es la que se emplea para productos de alta viscosidad. Se sabe que las soluciones de alginato exhiben un comportamiento de carácter no-newtoniano, donde la viscosidad depende de la velocidad de deformación (*shear rate*), por lo que las mediciones se realizaron a la misma velocidad de rotación de la aguja (60 rpm) para que estas fueran comparativas. Estas condiciones corresponden a una velocidad de corte o "*shear rate*" de 12.5 seg^{-1} . Esta forma de medición es la que comúnmente se emplea por la industria de los alginatos para evaluar su calidad en términos de viscosidad (Kelco, 1984), un valor final de viscosidad de proceso adecuado al final de la etapa es

entre 3000 a 4000 $\text{mPa}\cdot\text{s}$ y se logra después de 2 h de agitación. El pH de la solución puede disminuir a medida que el alginato se extrae del alga y se debe ajustar nuevamente a 10. En esta etapa se puede controlar la viscosidad del alginato a obtener. Las temperaturas elevadas y tiempos de agitación prolongados producirán alginatos de menor viscosidad, a diferencia de cuando se emplean menores temperaturas y tiempos de agitación, debido a la degradación del alginato por rompimiento de las cadenas de los ácidos urónicos que lo conforman. Es conveniente preparar una curva de variación de la viscosidad del alginato obtenido en función de los parámetros de tiempo y temperatura para cada especie a procesar, ya que las propiedades reológicas dependen de las condiciones de proceso, puesto que la cadena polimérica del alginato es especialmente sensible a temperaturas altas de extracción (Truss *et al.*, 2001). Al final de la extracción el alga debe quedar prácticamente desintegrada (McHugh, 1987; Arvizu *et al.*, 1996; Hernández *et al.*, 1999b). El tiempo de extracción (2 h) también fue confirmado para *Laminaria digitata* (Vauchel *et al.*, 2008b). Se ha propuesto una nueva alternativa para esta etapa llamada extrusión reactiva, en la que se reduce el consumo de agua y reactivo y se incrementa el rendimiento en 15% (Vauchel *et al.*, 2008a). Este grupo de investigadores franceses también desarrollaron un modelo que describe la cinética de esta etapa, en la que resalta el incremento del rendimiento a medida que se reduce el tamaño de partículas de algas (Vauchel *et al.*, 2009). El incremento en rendimiento de alginatos a la temperatura de 80°C ha sido confirmado para especies del género *Sargassum* (Davis *et al.*, 2004).

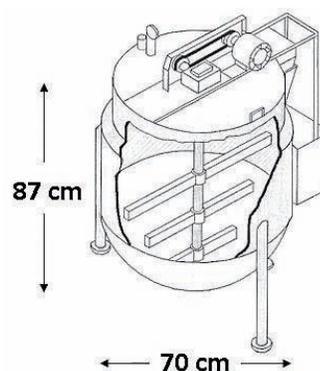


Figura 2. Marmita de extracción

Dilución y filtración

Después de la extracción, la pasta de alginato se bombea a un tanque con agitador y se combina con suficien-

te agua para que la viscosidad se reduzca a 45 mPa•s. Se empleó un tanque de fibra de vidrio de 120 cm de diámetro x 150 cm de alto, con un serpentín en el interior. Se acopló al tanque un motor de 1 HP y un agitador tipo propela, con velocidad de agitación de 1750 rpm (figura 3).

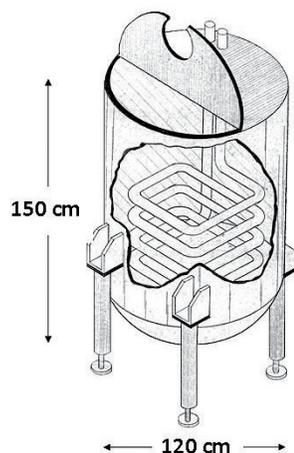


Figura 3. Tanque de dilución

El agua de lavado del tanque de extracción puede servir para bombear la pasta y diluir la solución a filtrar. El serpentín en el interior del tanque sirve para mantener la solución a una temperatura de 75°C, lo que evita que aumente su viscosidad sin problemas de degradación. Para una especie como *Macrocystis pyrifera*, el volumen de agua para llegar a 45 mPa•s y 75°C es de una parte de alga seca por 55 partes de agua.

Cuando la solución se ha ajustado a la viscosidad y temperatura mencionada, se bombea hacia un filtro rotatorio al vacío. Se puede emplear un equipo de la compañía ALAR (foto 2).



Foto 2. Filtro rotatorio al vacío empleado para la clarificación de la solución de alginato. Se observa el tambor giratorio y la capa de partículas de algas que se pegan a la cama de tierras de diatomeas por el efecto del vacío

El equipo se alimenta con la solución del tanque de dilución, bombeándola hacia la cuna receptora. El equipo cuenta al frente con una navaja que se mueve lentamente de manera automática a una velocidad de desplazamiento programada por el usuario, de manera que corta una pequeña cantidad del material filtrante a medida que el tambor está en rotación. A nivel planta piloto la navaja se mueve intermitentemente 1 mm cada 3.5 segundos y se mantiene una rotación del tambor de 2 rpm. El mejor material filtrante es la tierra de diatomeas (Celite 545). La lava expandida o perlita es la otra opción, la cual generalmente es más económica. Este dato es importante, porque se estima que se empleará 1 kg de material filtrante por kg de alginato producido (McHugh, 1987; Hernández *et al.*, 1999b).

Precipitación del alginato de calcio

La solución de alginato sale a presión del filtro y llega a un tanque de precipitación a una temperatura de 50-60°C. Al final de la tubería de descarga se instala un dispositivo tipo regadera para que la solución se descargue en el tanque de precipitación en forma de gotas. Se empleó un tanque de fibra de vidrio de 120 cm de diámetro x 150 cm de alto, el cual fue equipado con un motor de 1 HP, con un reductor de velocidad variable y un aspa tipo propela para agitar la mezcla (figura 4). En un tanque independiente se prepara una solución de CaCl₂ al 10% (p/v). En la descarga también se tiene una salida en forma de regadera, de manera que la solución de CaCl₂ también se descarga en forma de gotas. La cantidad total de reactivo a emplear corresponde a dos veces la cantidad de alginato a precipitar. Por ejemplo, si se va a precipitar una solución que contiene 2 kg de alginato, se emplearán 4 kg de CaCl₂. La solución clarificada de alginato de sodio y la solución de CaCl₂ se añaden a una velocidad sincronizada, de tal manera que ambas soluciones terminen de añadirse simultáneamente. Esta velocidad estará determinada por la velocidad de filtración. La velocidad de agitación debe ser controlada de tal manera que permita la formación de fibras pequeñas que puedan ser filtradas fácilmente. Si la agitación es muy débil, se formarán coágulos que son difíciles de filtrar. Si por el contrario, la agitación es muy fuerte, se formarán fibras muy pequeñas que serán difíciles de recuperar. La velocidad de agitación se debe acelerar a medida que el volumen en el tanque va aumentando, por eso es importante que el motor tenga velocidad variable. Es recomendable dejar las fibras dentro del tanque por lo menos 15 min antes de pasar a la siguiente etapa para que éstas terminen de reaccionar con el calcio y sea más fácil separarlas (McHugh, 1987; Hernán-

dez y Casas, 1985; Arvizu *et al.*, 1997; McHugh *et al.*, 2001).

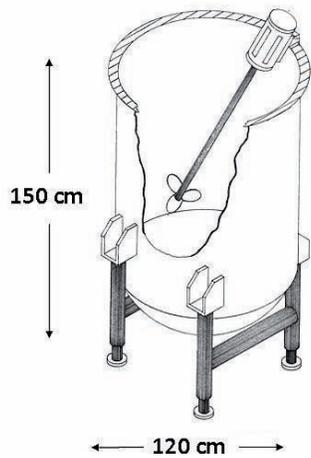


Figura 4. Tanque de precipitación

Conversión del alginato de calcio en ácido algínico

Las fibras de alginato de calcio se transforman en ácido algínico mediante lavados ácidos. Se pueden prensar, secar y moler para su venta como alginato de calcio, pero este producto tiene poco mercado, por lo que se transforma en ácido algínico u otra de sus sales. Las fibras de alginato de calcio se descargan por gravedad a una malla metálica (tipo mosquitero), si la precipitación se realizó bajo las condiciones adecuadas, el líquido podrá ser separado fácilmente. Las fibras no se deben comprimir para evitar interferencia en la siguiente reacción.

Se empleó un tanque de 100 cm de diámetro × 105 cm de alto, con un motor de 1 HP y un agitador con tres aspas tipo paleta (figura 5). Las fibras se depositan en el tanque y se adiciona suficiente agua para que se puedan agitar libremente, se adiciona HCl industrial hasta lograr un pH de 2 y se agita durante 15 min. Las fibras se descargan sobre una malla, se llena nuevamente el tanque con agua, se regresan las fibras al tanque y se adiciona suficiente ácido para llegar a un pH de 1.8. Se agitan nuevamente por 15 min y se descargan las fibras. El procedimiento se repite para un tercer lavado con ácido a pH 1.8. A nivel industrial esta etapa se lleva a cabo en un sistema en contracorriente bajo el siguiente esquema, se usan tres tanques cuadrados que tienen un cuadro menor adicionado a un extremo, desde donde se suben las fibras a un transportador helicoidal. El alginato de calcio se agrega al primer tanque que contiene ácido previamente usado en el segundo tanque, después de agitar por 15 min, el sólido (ahora una mezcla de ácido algínico y alginato de calcio) se transporta

por medio de un gusano sin fin, que tiene una malla en el fondo, hacia el segundo tanque, el cual contiene ácido previamente usado en el tercer tanque. La agitación se repite y el sólido se alimenta al tercer tanque que contiene ácido sin usar. Después de agitar y separar el sólido, ahora como ácido algínico, se lava con agua; si ésta es abundante o si el agua es escasa, se manda sin lavar a la siguiente etapa. En esta etapa se puede controlar la viscosidad final del alginato, variando los pHs para limitar el intercambio iónico. Si se deja más calcio, se tendrá una mayor viscosidad aparente en el alginato, pero el límite de reducción de viscosidad del alginato en solución a 1% (después de agregar hexametáfosfato de sodio para secuestrar el calcio residual), debe ser menor a 40%. Esta etapa se puede realizar lavando las fibras dos veces, solamente a pH 1.6, o posiblemente a pH 1.8, pero debe esperarse un poco de degradación del producto, con la consecuente reducción de viscosidad (Arvizu *et al.*, 1997; Hernández *et al.*, 2001; Rodríguez *et al.*, 2005).

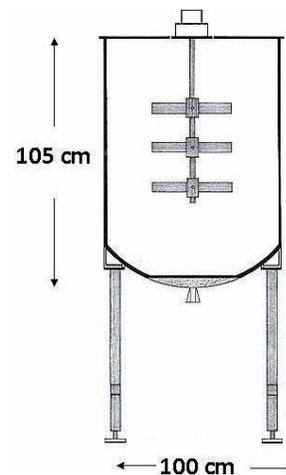


Figura 5. Tanque de lavados ácidos

Prensado

A nivel planta piloto, se empleó una prensa hidráulica con una canasta perforada. Las fibras se envuelven en una lona resistente y se someten a una presión de 8-10 toneladas. Se libera la presión, se revuelven las fibras y se prensan nuevamente. El proceso se repite hasta que ya no es posible eliminar más agua. A nivel industrial se puede emplear una prensa de tornillo o *Screw Press*, de la marca "Rietz S-Press" (<http://www.bepex.com/spress.htm>), en donde el líquido se elimina en tres áreas de la prensa para maximizar su salida y la recuperación del sólido. Está equipado con un motor independiente en el tornillo, que permite variar el tiempo de retención del

producto. Este equipo permite reducir la humedad en las fibras hasta obtener un 25% de sólidos.

Conversión del ácido algínico en alginato de sodio

Esta es una de las etapas que más celosamente guardan las industrias. Las fibras prensadas de ácido algínico se colocan en un mezclador de doble planetario de 29 litros, con una compuerta para la adición de reactivos y otra para la toma de muestras (fibras de alginato) (foto 3); se agrega suficiente alcohol etílico al 96%, de manera que la mezcla alcohol y agua, remanente en el ácido algínico, sea 55:45. Para la estimación de alcohol que se empleará durante la neutralización, se determina primero la cantidad de agua que se encuentra en las fibras de ácido algínico. Esto se obtiene restando el peso del ácido algínico húmedo menos el peso del alginato seco esperado, basado en un análisis previo a nivel laboratorio. Una opción adicional es determinar la humedad del ácido algínico.

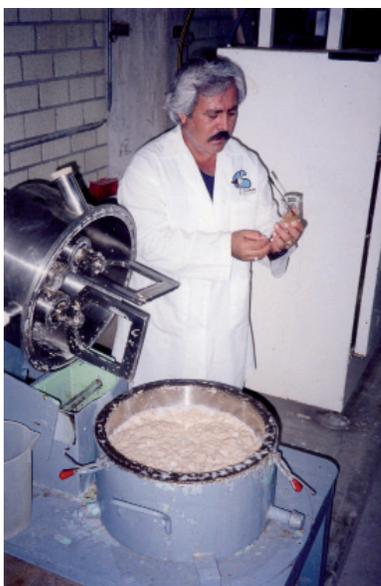


Foto 3. Mezclador de doble planetario para la conversión de ácido algínico en alginato de sodio

Ejemplificando lo anterior, si partimos de 23 kg de ácido algínico prensado (húmedo), que contiene 2.3 kg de alginato de sodio, se calcula que contiene 20.7 L de agua, que representa 55%, por lo tanto, el volumen de alcohol para obtener una proporción de 45% es: $V = (45 \times 20.7) / 55 = 16.9$ L de alcohol, mismo que será adicionado a las fibras. A continuación, se agrega una cantidad suficiente de Na_2CO_3 en polvo, hasta alcanzar un pH de 8 en las fibras después de agitar por 15 min. Para medir el pH se toma una muestra de las fibras, se di-

suelven en agua y se mide con papel indicador en la solución. La cantidad aproximada de Na_2CO_3 a emplear es de 0.25 partes por una de alginato de sodio a obtener. En esta etapa se puede sustituir el Na_2CO_3 por K_2CO_3 y obtener alginato de potasio. El alcohol puede causar cierta interferencia en la medición del pH. Generalmente el pH del alginato en solución tendrá un grado menos del pH medido en la mezcla. La función del alcohol en esta etapa es evitar que cuando se convierta el ácido algínico en alginato de sodio, éste no se solubilice en el agua residual. Como el alcohol es caro, debe recuperarse en un destilador para reducir los costos; se estima que sólo 2% del alcohol se debe perder en la operación de recuperación. El alginato de sodio también se puede obtener sin el uso de alcohol, para lo cual se mezcla directamente con el carbonato de sodio, pero en este caso, se pierde la consistencia fibrosa y se tiene que introducir la pasta a un extrusor y obtener pelets, que posteriormente se pueden secar y pulverizar (McHugh, 1987; Arvizu *et al.*, 2002; Hernández *et al.*, 2002).

Secado

Para esta etapa se puede emplear un secador de aire caliente. Las fibras se prensan para eliminar los líquidos residuales, se desmenuzan y se colocan sobre charolas con bastidores de acero inoxidable y fondo de malla Núm. 40, que permite la circulación del aire. Con este sistema, la temperatura óptima de secado es de 60°C durante 2.5 h, con lo que se obtiene una humedad en el alginato de 12% o menos. La máxima humedad recomendada para almacenar el alginato es de 12%. Existen en el mercado secadores más eficientes. Lo más adecuado es enviar muestras del producto a los proveedores y determinar la cantidad de producto a procesar.

Molienda, tamizado y mezclado

Es necesario estandarizar el tamaño de partículas, de acuerdo a las especificaciones del mercado. El alginato de sodio seco se puede moler en un molino de turbina, también conocido como de martillos fijos. La mayoría de los alginatos requieren un tamaño de partícula menor a 60 mallas, lo cual se logra moliendo con una malla de 3 mm. Para lograr productos de grano más fino se separa el polvo obtenido de la primera molienda y se vuelve a moler lo restante más grueso con una malla de 0.5 mm. Es posible que algunos productos de tamaño muy fino requieran una tercera molienda. Para separar el alginato por tamaños se usa un tamizador con cinco tamices: 30 (0.594 mm), 60 (0.250 mm), 80 (0.177 mm), 100 (0.149 mm) y 120 (0.125 mm) mallas. Es difícil obte-

ner partículas finas si el alginato es esponjoso, incluso después de tres moliendas se puede tener hasta un 16% de partículas que aún superan la malla 30 (Hernández *et al.*, 2002). Existen en el mercado equipos muy sofisticados y eficientes que secan, muelen y clasifican en un solo aparato, pero son muy costosos.

El alginato obtenido se analiza en laboratorio para conocer la viscosidad del producto en solución al 1%. La calidad de los alginatos (en términos de viscosidad) varía en función de diversos factores biológicos, ecológicos y de proceso. Por lo tanto, los productos que se obtengan tendrán una viscosidad diferente y deberán ser mezclados para ofrecer un producto de calidad constante. Para hacer las mezclas se usa un mezclador tipo pantalón y las viscosidades de los productos a combinar tienen que estar dentro del rango que se especifica entre paréntesis en mPa•s: para 800 (> 600); 400 (150 a 600); 80 (40 a 150) y 30 (10 a 80). El producto final se empaqueta en cuñetes de cartón de 22.5 kg con una bolsa de plástico. La figura 6 muestra el diagrama de flujo para la producción de alginatos y las reacciones que están involucradas.

Control de calidad

A los alginatos obtenidos se les analizan las siguientes propiedades:

- Viscosidad en solución al 1% antes y después de agregar 0.5% de hexametáfosfato de sodio, con relación al peso seco del alginato para secuestrar el calcio residual que queda ligado al alginato. La viscosidad se mide con un viscosímetro Brookfield LVT Modelo DV-I. Los productos se separan para su venta por su viscosidad de acuerdo con la siguiente clasificación medida en mPa•s: muy baja (25-35); baja (70-100); media (340-460) y alta (680-920).
- pH de la solución a 1%.
- Distribución del tamaño de partículas, en donde los productos regulares se venden entre 30-60 mallas y los refinados entre 100-150 mallas.
- Humedad, que debe ser menos de 12%.
- Cenizas, el estándar se encuentra entre 18-27%.
- Contenido de calcio, el estándar se encuentra entre 0.3-1%.
- Pureza, entre 96-98%.

Costos de producción

La estimación de costos de producción se realizó considerando que una sola empresa cosechara todas las algas disponibles en la península (100,000 toneladas

frescas) y que podrían obtener 25% de rendimiento promedio de alginato (base seca) (2,500 toneladas de alginato) con el proceso descrito. Los costos fueron calculados por kilo de alginato producido (datos en centavos de dólar), basados en la asesoría de un experto de la FAO, Com. Pers.). Como los datos no provienen de un análisis formal con una memoria de cálculo, deben ser considerados como una primera aproximación.

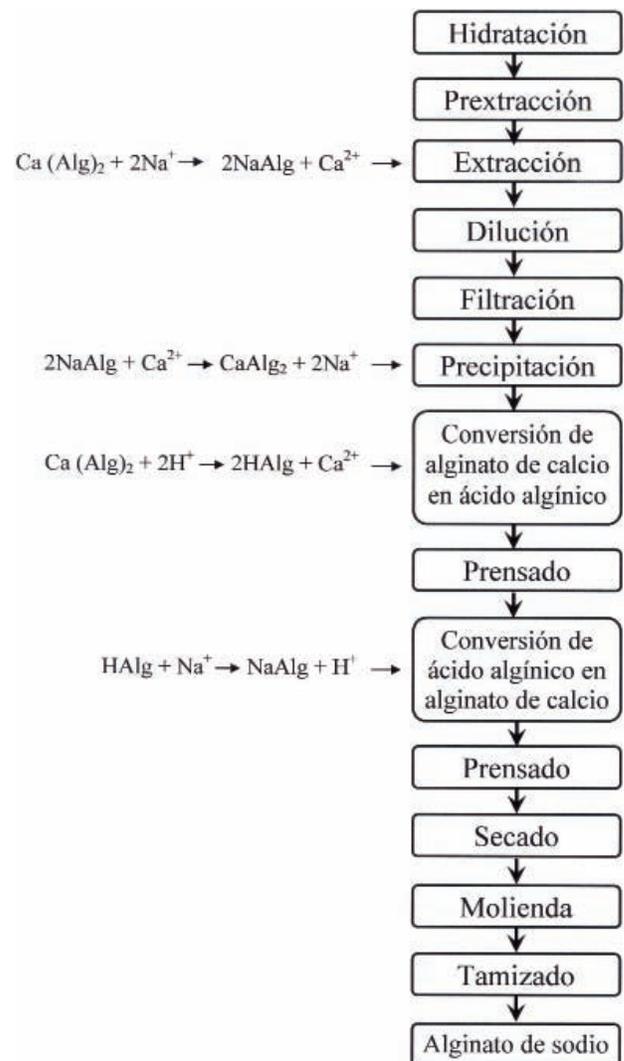


Figura 6. Diagrama de flujo del proceso de producción de alginatos

Concepto	Centavos de dólar Americano
Materias primas: considerando un barco tipo Sargacero como el que operaba la empresa productos del Pacífico en Ensenada, BC (Casas <i>et al.</i> , 1996), más los reactivos (formaldehído, ácido clorhídrico, carbonato de sodio, tierra de diatomeas, cloruro de calcio, hipoclorito de sodio y etanol).	194.44
Suministros: agua, electricidad y producción de vapor.	40
Mano de obra: para una fábrica en su mayor parte automatizada, con seis obreros y un supervisor por turno y que opera en cuatro turnos, en total 14 obreros y cuatro supervisores.	15.36
Mantenimiento: calculado en 6 % de la inversión (2.5 millones de dólares), 50% en materiales y 50% en mano de obra.	24
Seguros e impuestos: se calculó en un 2% de la inversión inicial.	8
Empaques: se calcularon 111,111 unidades de 22.5 kg.	2.2
Ventas, gastos generales y administración; se calculó con base a 15% de los ingresos por ventas.	135
Investigación y desarrollo: se consideró 5% de las ventas.	45
Depreciación: se calculó sobre un tiempo de vida de los equipos de 11 años (Baca, 1990).	36
TOTAL	\$ 5 USD

Tabla 1. Costos de producción de alginatos en una fábrica instalada en México

Barreras identificadas para la producción industrial de alginatos

A pesar de que en México existe la tecnología para la producción de alginatos, esta industria no se ha desarrollado, por lo que consideramos que está relacionado con los siguientes factores principales:

- Esta tecnología no ha sido escalada a nivel industrial, por lo que se desconocen con precisión los costos de instalación.
- Los mantos explotables se encuentran concesionados en dos regiones: 50% se encuentra en Baja California, aunque el nivel de explotación disminuyó, la compañía mantiene la concesión y el otro 50% se encuentra concesionado a cinco cooperativas pesqueras del estado de Baja California Sur, pero ellos tampoco cosechan la biomasa disponible. En ambas regiones, se cosecha sólo una mínima parte que emplean como alimento para el cultivo de abulón.
- Los costos de venta de los alginatos se han incrementado recientemente, actualmente el alginato de sodio se vende en promedio a 11.6 USD por kilo, por lo que si se produjera en México, la venta dejaría un margen de ganancia moderado (6.6 USD por kilo). El problema es convencer a los inversionistas de que ésta es una industria rentable.
- Otro factor son los inversionistas. Ellos quieren recibir las tecnologías desarrolladas sin costo y de tipo llave en mano, sin tener que invertir más en investigaciones previas al inicio de la producción. Consideramos que esta actitud debe cambiar, para que las tecnologías desarrolladas en las instituciones lleguen a aplicarse a nivel industrial.
- Un último factor es que el proceso de producción de alginatos consume grandes cantidades de agua dulce (1000 m³ por tonelada de producto final), por lo que la ubicación de la planta deberá pensarse en un lugar con abundante agua dulce y aplicar los procesos de recirculación que se han propuesto (Hernández *et al.*, 1992; Reyes *et al.*, 1992; Rodríguez *et al.*, 2005).

En conclusión, en México existe la tecnología para la producción de alginatos y se encuentra disponible para su uso de manera gratuita, ya que las bases científicas del proceso han sido publicadas en beneficio de la comunidad internacional. La siguiente etapa que se debe abordar es el diseño industrial. Éste debe estar lleno de ingenio, de manera que nos permita reducir al máximo los costos de producción y producir con alta calidad. También es conveniente involucrar a contadores que apliquen sus conocimientos en la búsqueda de una producción rentable. Con esta información, será factible

hacer una campaña para fomentar la explotación de las algas entre los concesionarios, invitándolos a que unificaran esfuerzos y ofreciéndoles la asesoría que requieren para la instalación de esta industria.

Agradecimientos

Los autores agradecen las becas otorgadas por exclusividad a la COFAA-IPN y el Estímulo al Desempeño de los investigadores del IPN. Agradecemos a la FAO, Instituto Politécnico Nacional, CONACYT y SEMARNAT, los apoyos económicos recibidos para el desarrollo de este proyecto.

Referencias

- Alireza-Razavi A., Khodadadi A., Bagher-Eslami M., Eshraghi S., Mirshafiey A. Therapeutic Effect of Sodium Alginate in Experimental Chronic Ulcerative Colitis. *Iranian Journal of Allergy, Asthma and Immunology*, 7(1):13-18, marzo, 2008.
- Arvizu-Higuera D.L., Hernández-Carmona G., Rodríguez-Montesinos Y.E. Sistemas de carga y de flujo continuo durante la etapa de preextracción ácida en el proceso de extracción de alginatos. *Ciencias Marinas*, 21(1):25-37, marzo 1995.
- Arvizu-Higuera D.L., Hernández-Carmona G., Rodríguez-Montesinos Y.E. Efecto de la temperatura y el tiempo de extracción en el proceso de extracción de alginato de sodio a partir de *Macrocystis Pyrifera*. *Ciencias Marinas*, 22(4):511-521, diciembre 1996.
- Arvizu-Higuera D.L., Hernández-Carmona G., Rodríguez-Montesinos Y.E. Efecto del tipo de precipitación en el proceso de obtención de alginato de sodio: método de alginato de calcio y método de ácido algínico. *Ciencias Marinas*, 23(2):195-207, junio 1997.
- Arvizu-Higuera D.L., Hernández-Carmona G., Rodríguez-Montesinos Y.E. Parámetros que afectan la conversión de ácido algínico a alginato de sodio. *Ciencias Marinas*, 28(1):27-36, marzo 2002.
- Baca-Urbina G. *Evaluación de proyectos: análisis y administración de riesgo*, McGraw Hill, México, 1990.
- Casas-Valdez M.M., Hernández-Carmona G., Torres-Villegas J.R., Sánchez-Rodríguez I. Evaluación de mantos de *Macrocystis Pyrifera* "Sargazo Gigante" en la Península de Baja California (Verano de 1982). *Investigaciones Marinas CICIMAR*, 2(1):1-17, marzo 1985.
- Casas-Valdez M., Hernández-Carmona G., Hernández-Guerrero C.J. Recurso *Macrocystis Pyrifera*, en: Casas-Valdez M., Ponce-Díaz G. (eds.), Estudio Potencial Pesquero y Acuícola de Baja California Sur II. Secretaría del Medio Ambiente Recursos Naturales y Pesca, Baja California Sur, México, 1996. pp. 431-444.
- Coppi G., Iannuccelli V., Leo E., Bernabei M.T., Cameroni R. Chitosan-Alginate Microparticles as a Protein Carrier. *Drug Development and Industrial Pharmacy*, 27(5):393-400, enero 2001.
- Davis T.A., Ramirez M., Mucci A., Larsen B. Extraction, Isolation and Cadmium Binding of Alginate From *Sargassum* spp. *Journal of Applied Phycology*, 16(4):275-284, agosto 2004.
- De Stefano C., Gianguzza A., Piazzese D., Sammartano S. Modeling of Proton and Metal Exchange in the Alginate Biopolymer. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 383(4):587-596, octubre 2005.
- Draget K.I., Smidsrod O., Skjak-Braek G. Alginates from Algae, en: Steinbüchel A., Rhee S.K. (eds.), *Polysaccharides and Polyamides in the food Industry: Properties, Production and Patents I*. Wiley-VCH, Weinheim, 2005, pp. 1-30.
- Fenoradosa T.A., Ali G., Delattre C., Laroche C., Petit E., Wadouchi A., Michaud P. Extraction and Characterization of an Alginate from the Brown Seaweed *Sargassum Turbinarioides* Grunow. *J Appl Phycol*, 22:131-137, mayo 2010.
- Gorenšek M., Bukošek V. Zinc and Alginate for Multipurpose Textiles. *Acta Chimica Slovenica*, 53(2):223-228. Diciembre 2006.
- Haug A. *Composition and Properties of Alginates*. Report 30. Norwegian Institute Seaweed Research, Thondheim, Noruega, 1964, pp 123.
- Hernández-Carmona G., Casas-Valdez M.M. Precipitación del ácido algínico y su conversión a alginato de sodio en muestras de *Macrocystis Pyrifera*. *Investigaciones Marinas. CICIMAR*, 2(1):18-28, marzo 1985.
- Hernández-Carmona G. Variación estacional del contenido de alginatos en tres especies de feofitas de Baja California Sur, México. *Investigaciones Marinas. CICIMAR*, 2(1):29-45, marzo 1985.
- Hernández-Carmona G., Aguirre-Vilchis M. Propiedades de intercambio iónico de *Macrocystis Pyrifera* durante la pre-extracción ácida, para la extracción de alginatos. *Investigaciones Marinas. CICIMAR*, 3(2):53-64, 1987.
- Hernández-Carmona G., Rodríguez-Montesinos Y.E., Torres-Villegas J.R., Sánchez-Rodríguez I., Vilchis M.A. Evaluación de los mantos de *Macrocystis Pyrifera* (Phaeophyta, Laminariales) en Baja California, México, I. Invierno 1985-1986. *Ciencias Marinas*, 15(2):1-27, junio 1989a.
- Hernández-Carmona G., Rodríguez-Montesinos Y.E., Torres-Villegas J.R., Sánchez-Rodríguez I., Vilchis M.A., García-de-La-Rosa O. Evaluación de los mantos de *Macrocystis Pyrifera* (Phaeophyta Laminariales) en Baja California, México. II Primavera 1986. *Ciencias Marinas*, 15(4):117-140, 1989b.
- Hernández-Carmona G., Rodríguez-Montesinos Y.E. Los alginatos: Un producto útil a partir de algas marinas. *CICIMAR Boletín* 4:1-1, 1990.
- Hernández-Carmona G., Rodríguez-Montesinos Y.E., Casas-Valdez M.M., Vilchis M.A., Sánchez-Rodríguez I. Evaluación de los mantos de *Macrocystis Pyrifera* (Phaeophyta, Laminariales) en la península de Baja California Sur, México. III. Verano de 1986 y variación estacional. *Ciencias Marinas*, 17(4):121-145, diciembre 1991.
- Hernández-Carmona G., Vilchis M.A., Rodríguez-Montesinos Y.E. Recirculación del ácido residual de la etapa de pre-extrac-

- ción en el proceso de obtención de alginato de sodio. *Ciencias Marinas*, 18(1):125-137, marzo 1992.
- Hernández-Carmona G. Tasas de elongación de frondas de *Macrocystis pyrifera* en Bahía Tortugas, Baja California. *Ciencias Marinas*, 22(1):57-72, febrero 1996.
- Hernández-Carmona G., McHugh D.J., Arvizu-Higuera D.L., Rodríguez-Montesinos Y.E. Pilot Plant Scale Extraction of Alginate from *Macrocystis Pyrifera*. Part 1. The Effect of Pre Extraction Treatments on the Yield and Quality of Alginate. *Journal of Applied. Phycology*, 10(6):507-513, diciembre 1999a.
- Hernández-Carmona G., McHugh D.J., López-Gutiérrez F. Pilot Plant Scale Extraction of Alginates from *Macrocystis Pyrifera*. 2. Studies on Extraction Conditions and Methods of Separating the Alkaline-Insoluble Residue. *Journal of Applied Phycology*, 11(6):493-502, diciembre 1999b.
- Hernández-Carmona G., Robledo D., Serviere-Zaragoza E. Effect of Nutrient Availability on *Macrocystis Pyrifera* Recruitment Survival Near its Southern Limit of Baja California. *Botanica Marina*, 44(3):221-229, junio 2001.
- Hernández-Carmona G., McHugh D.J., Arvizu-Higuera D.L., Rodríguez-Montesinos Y.E. Pilot Plant Scale Extraction of Alginates from *Macrocystis Pyrifera* 4. Conversion of Alginic Acid to Sodium Alginate, Drying and Milling. *Journal of Applied Phycology*, 14(6):445-451, diciembre 2002.
- Horn S.J., Aasen I.M., Østgaard K. Ethanol Production from Seaweed Extract. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 25: 249-254, noviembre 2000.
- Iwasaki K., Matsubara Y. Purification of Alginate Oligosaccharides with Root Growth-Promoting Activity Toward Lettuce. *Biosci Biotechnol Biochem.*, 64: 1067-1070, mayo 2000.
- Kelco. Algin/Hydrophilic Derivatives of Alginic Acid for Scientific Water Control. 50 pp. 1984.
- McHugh D.J. *Production and Utilization of Products from Commercial Seaweeds*, FAO Fisheries Technical Paper 288, Roma, 1987, pp. 58-115.
- McHugh D.J., Hernández-Carmona G., Arvizu-Higuera D.L., Rodríguez Montesinos Y.E. Pilot Plant Scale Extraction of Alginates from *Macrocystis Pyrifera*. 3. Precipitation, Bleaching and Conversion of Calcium Alginate to Alginic Acid. *Journal of Applied Phycology*, 13(6):471-479, diciembre 2001.
- McHugh D.J. *A Guide to the Seaweed Industry*, FAO Fisheries Technical Paper, Núm.441, Rome, FAO, 2003, 105 pp.
- Moen E., Horn S., Ostgaard K. Alginate Degradation During Anaerobic Digestion of *Laminaria Hyperborea* Stipes. *Journal of Applied Phycology*, 9: 157-166, mayo 1997.
- Mørk Ý.A. *Novel Alginate Microcapsules for Cell Therapy*. Tesis (Ph. D.), Norwegian University of Science and Technology, 2008, Pp. 74.
- Murillo-Álvarez J.I., Hernández-Carmona G. Monomer Composition and Sequence of Sodium Alginate Extracted at Pilot Plant Scales from three Commercially Important Seaweeds from México. *Journal of Applied Phycology*, 19(5):545-548, octubre 2007.
- Myklestad S. Ion-Exchange of Brown Algae. Determination of Rate Mechanism for Calcium Hydrogen Ion Exchange for Particles from *Laminaria hyperborea* and *Laminaria digitata*. *Journal of Applied Chemistry*, 18:30-36, 1968.
- Nagaoka M., Shibata H., Kimura-Takagi I., Hashimoto S. Anti-Ulcer Effects and Biological Activities of Polysaccharides from Marine Algae. *BioFactors*, 12: 267-274, enero 2000.
- Nirmal-Kumar J.I., Kumar R.N., Patell K., Viyol S., Bhoi R. Nutrient Composition and Calorific Value of Some Seaweeds from Bet Dwarka, West Coast of Gujarat, India. *Our Nature*, 7:18-25, mayo 2009.
- Nishigawa K. Extract Method of Alginic Acid, en: Research Methods of Algae. Nishigawa K., Chthara M., 1985, pp. 624-626.
- Pajic-Lijakovic I., Plavsic M., Nedovic V., Bugarski B. Investigation of Ca-Alginate Hydrogel Rheological Behavior in Conjunction with Immobilized Yeast Cell Growth Dynamics. *Journal of Microencapsulation*, 24(5):420-429, agosto 2007.
- Reyes-Tisnado R., López-Gutiérrez F., Hernández-Carmona G., Vernon-Carter J., Castro Moroyoqui P. Sodium and Potassium Alginates Extracted from *Macrocystis Pyrifera* Algae for Use in Dental Impression Materials. *Ciencias Marinas*, 30(3):189-199, 2004.
- Reyes-Tisnado R., Hernández-Carmona G., Rodríguez-Montesinos Y.E., Arvizu-Higuera, D.L. Food Grade Alginates Extracted from the Giant Kelp *Macrocystis Pyrifera* at Pilot Plant Scale. *Revista de Investigaciones Marinas*, 26:185-192, 2005.
- Rodríguez-Montesinos Y.E., Hernández-Carmona G. Variación estacional y geográfica de la composición química de *Macrocystis Pyrifera* en la Costa Occidental de Baja California. *Ciencias Marinas*, 17(3):91-107, septiembre 1991.
- Rodríguez-Montesinos Y.E., Hernández-Carmona G., Arvizu-Higuera D.L. Aprovechamiento de los líquidos residuales en la etapa de conversión de alginato de calcio en ácido alginico durante el proceso de producción de alginatos. *Océanides*, 20(1,2): 1-7, diciembre 2005.
- Rodríguez-Montesinos Y.E., Arvizu-Higuera D.L., Hernández-Carmona G. Seasonal Variation on Size and Chemical Constituents of *Sargassum Sinicola* Setchel et Gardner from Bahía de La Paz, Baja California Sur, México. *Phycological Research*, 56(1): 34-39, marzo 2008.
- Schuldts U., Hunkeler D. Alginate-Cellulose Sulphate-Oligocation Microcapsules: Optimization of Mass Transport and Mechanical Properties. *Journal of Microencapsulation*, 24(1):1-10, marzo 2007.
- Secretaría de Economía, Negociaciones comerciales [en línea]. 2009. Disponible en: <http://www.economia-snci.gob.mx>.
- Smidsrod O., Draget K.I. Chemistry and Physical Properties of Alginates. *Carbohydrate in Europe*, 14:6-13, mayo 1996.
- Tang J.C., Taniguchi H., Chu H., Zhou Q., Nagata S. Isolation and Characterization of Alginate Degrading Bacteria for Disposal of Seaweeds Waste. *Letters in Applied Microbiology*, 48:38-43, enero 2009. DOI: 10.1111/j.1472-765X.2008.02481.x.

- Tavares-Salgado L., Tomazetto R., Paes-Cinelli L., Farina M., Menezes-Amado-Filho G. The Influence of Brown Algae Alginates on Phenolic Compounds Capability of Ultraviolet Radiation Absorption in Vitro. *Brazilian Journal of Oceanography*, 55(2):145-154, abril-junio 2007.
- Truus K., Vaheer M., Taure I. Algal Biomass from *Fucus Vesiculosus* (Phaeophyta): Investigation of the Mineral and Alginate Components. *Proc. Estonian Acad. Sci. Chem.*, 50(2):95-103, junio 2001.
- Vauchel P., Arhaliass A., Legrand J., Kaas R., Baron R. Decrease in Dynamic Viscosity and Average Molecular Weight of Alginate from *Laminaria digitata* During Alkaline Extraction. *Journal of Phycology*, 44(2):515-517, abril 2008a.
- Vauchel P., Kaas R., Arhaliass A., Baron R., Legrand J. A New Process for Extracting Alginates from *Laminaria Digitata*: Reactive Extrusion. *Food and Bioprocess Technology*, 1(3):297-300, septiembre 2008b.
- Vauchel P., Leroux K., Kaas R., Arhaliass A., Baron R., Legrand J. Kinetics Modeling of Alginate Alkaline Extraction from *Laminaria Digitata*. *Bioresource Technology*, 100(3):1291-1296, febrero 2009.
- Yabur R., Bashan Y., Hernández-Carmona G. Alginate from the Macroalgae *Sargassum Sinicola* as a Novel Source for Microbial Immobilization Material in Wastewater Treatment and Plant Growth Promotion. *Journal of Applied Phycology*, 19(1):43-53, febrero 2007.
- Younis Y.M.H., Tecleab S., Gheza T., Rahama I.H. Determination of the Biomass and Phycocolloid Contents of some Marine Algae from Eritrea. *J. KAU: Mar. Sci.*, 11:19-25, 2000.

Bibliografía

- Edwards M.S., Hernández-Carmona G. Delayed Recovery of Giant Kelp Near its Southern Range Limit in the North Pacific Following "El Niño". *Marine Biology*, 147(1):273-279, mayo 2005.
- Hernández-Carmona G., García O., Robledo D., Foster M. Restoration Techniques for *Macrocystis Pyrifera* Populations at the Southern Limit of their Distribution in Mexico. *Botanica Marina*, 43(3):273-284, junio 2000.
- Hernández-Carmona G., Hughes B., Graham M. Reproductive Longevity of Drifting Kelp *Macrocystis pyrifera* (Phaeophyceae) in Monterey Bay. *Journal of Phycology*, 42(6):1199-1207, diciembre 2006.
- Istini S., Ohno, Kusunose M. Methods of Analysis of Agar, Carrageenan and Alginates in Seaweeds. *Bull. Mar. Sci. Fish. Kochi Univ.*, 14:49-55, diciembre 1994.
- Lada L., Zertuche-González J.A., Hernández-Carmona G. Giant kelp (*Macrocystis pyrifera*, Phaeophyceae) Recruitment near its Southern Limit in Baja California After Mass Disappearance During ENSO 1997-98. *Journal of Phycology*, 35(6):1106-1112, diciembre 1999.
- Reed D.C. Giant Forest of the Sea. *Natural Science*, pp. 202-207, 1994. Reyes-Tisnado R., Hernández-Carmona G., Hernández-Valenzuela R. Reducción del consumo de agua dulce en el proceso de extracción de alginatos a partir de *Macrocystis Pyrifera* (Phaeophyta, Laminariales), mediante recirculación de los líquidos residuales de la pre-extracción y precipitado. *Ciencias Marinas*, 18: 105-124. 1992.

Semblanza de los autores

Gustavo Hernández-Carmona. Biólogo marino por el CICIMAR-IPN, doctorado en ciencias por el Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste. Realizó una estancia de investigación en los laboratorios marinos de Moss Landing, California. Profesor-investigador de tiempo completo del CICIMAR. Ha dirigido 5 tesis de licenciatura, 13 de maestría y 3 de doctorado. Ha publicado 39 artículos científicos en revistas internacionales, 4 memorias de congresos, 3 capítulos de libros y 13 artículos de divulgación. Ha participado con 44 ponencias en congresos nacionales y 45 internacionales. Su investigación está orientada a la química y ecología de las macroalgas, con énfasis en la producción de ficocoloides y uso de las macroalgas y sus productos.

Yoloxochitl Elizabeth Rodríguez-Montesinos. Se graduó como bióloga marina en la Universidad Autónoma de Baja California Sur, México. Obtuvo la maestría en ciencias marinas en el Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas-IPN, México. Es profesor desde 1990. Su línea de investigación es la química de algas marinas. Ha participado en proyectos encaminados al estudio de extracción de polisacáridos algales de interés comercial y en el diseño de una planta piloto para la extracción de alginatos, así como el estudio de polisacáridos con actividad biológica. Ha dirigido una tesis de maestría y publicado 19 artículos científicos y 2 de divulgación. Ha participado en 25 congresos nacionales e internacionales.

Dora Luz Arvizu-Higuera. Es ingeniero bioquímico egresada del Instituto Tecnológico de La Paz; realizó su maestría en ciencias marinas en el Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas del IPN. Cuenta con 11 publicaciones científicas internacionales, en revistas indexadas. Labora en el CICIMAR-IPN desde 1994, en el área de química de macroalgas, con experiencia en la extracción de polisacáridos algales. Actualmente es profesor-investigador con categoría titular C. Ha participado en diversos proyectos de investigación sobre alginatos, agar y búsqueda de compuestos bioactivos.

Raúl Reyes-Tisnado. Ingeniero bioquímico en ciencias marítimas y tecnología de alimentos del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. Doctorado en ciencias marinas del CICIMAR-IPN. Laboró como profesor de tiempo completo en el ITESM-Mazatlán. Desde 1985 a la fecha es investigador titular en el Instituto Nacional de Pesca. Su perfil profesional incluye las áreas de química y extracción de ficocoloides, legislación pesquera, economía pesquera, biología pesquera, biología marina, métodos de pesca, acuicultura, oceanografía, contaminación marina, biotecnología marina, ingeniería y procesado de alimentos, administración de recursos humanos, negociación y manejo de conflictos, administración de recursos marinos, formulación e implementación de proyectos de investigación de desarrollo tecnológico marino-pesquero.

Jesús Iván Murillo-Álvarez. Ingeniero bioquímico en alimentos por el Instituto Tecnológico de La Paz. Doctorado en ciencias por el Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste. Ha realizado estancias de investigación en Copenhague y USA. Es profesor titular del CICIMAR-IPN. Ha escrito 10 artículos científicos en revistas internacionales. Ha participado en 6 congresos nacionales y 11 congresos internacionales. Es miembro de la American Society of Pharmacognosy, la Sociedad de Ficología de Latinoamérica y el Caribe. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores, Nivel I. Su investigación está orientada al estudio de los organismos marinos como fuente de sustancias activas.

Mauricio Muñoz-Ochoa. Ingeniero bioquímico por el Instituto Tecnológico de la Paz. Doctor en ciencias por el Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas del IPN. Es profesor asociado del CICIMAR-IPN. Ha participado con 6 ponencias en congresos nacionales y 13 ponencias en congresos internacionales. Ha participado en 9 proyectos de investigación. La línea de investigación que realiza está enfocada al aislamiento y purificación de sustancias bioactivas a partir de organismos marinos.

Aplicación inversa del método de Krylov para obtener una matriz de orden tres

Inverse Application of Krylov's Method to Obtain an Order-Three Matrix

Cortés-Rosas J.J.

*Departamento de Ciencias Aplicadas
Facultad de Ingeniería
Universidad Nacional Autónoma de México
Correo: ma_an_di@yahoo.com.mx*

Arganis-Juárez M.L.

*Instituto de Ingeniería
Coordinación de Hidráulica
Universidad Nacional Autónoma de México
Correo: MArganisJ@iingen.unam.mx*

Información del artículo: recibido: septiembre de 2009, aceptado: marzo de 2011

Abstract

En este artículo se presenta un procedimiento para obtener una matriz cuadrada A de orden tres a partir de su ecuación característica, utilizando el método de Krylov, que tradicionalmente realiza el procedimiento contrario. Los elementos de la matriz A finalmente son encontrados a partir de resolver un sistema de ecuaciones no lineales.

Abstract

In this article a procedure is presented to obtain a square order-three matrix A given its characteristic equation, by means of Krylov's method, that traditionally performs the opposite problem. Finally, the elements of matrix A are found by solving a non-linear equation system.

Descriptores

- ecuación característica
- matriz cuadrada
- método de Krylov
- sistema de ecuaciones no lineales
- Cayley-Hamilton
- Solver

Keywords

- characteristic equation
- square matrix
- Krylov's method
- non-linear equation system
- Cayley-Hamilton
- Solver

Introducción

La determinación de la ecuación característica y de los valores característicos de una matriz cuadrada A es un problema con numerosas aplicaciones en la ingeniería, sobre todo si los modelos matemáticos son ecuaciones diferenciales; ejemplo de ello son las determinaciones

de las frecuencias naturales de oscilación de un sistema hidráulico, cuyo modelo matemático es un sistema de ecuaciones lineales (figura 1). Otro problema que se resuelve es la determinación de la mayor frecuencia natural real de oscilación de sistemas masa resorte con o sin amortiguamiento (figuras 2 y 3), (Torres y Czitrom, 1980).

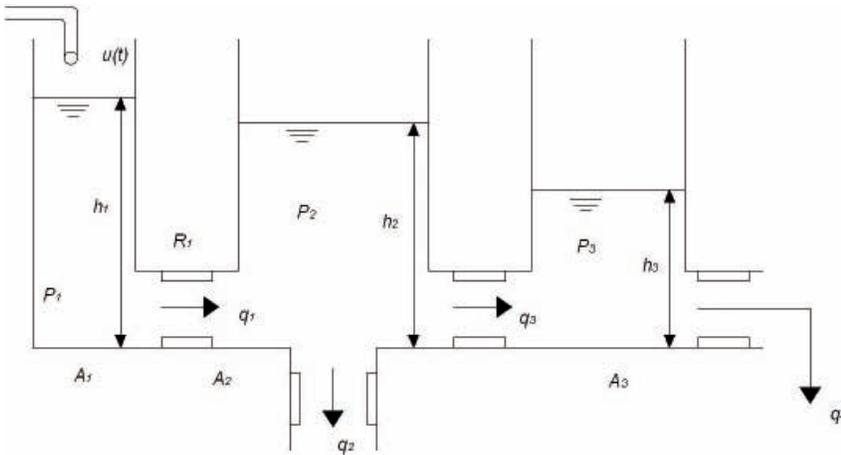


Figura 1. Sistema hidráulico en donde las frecuencias naturales de vibración son valores característicos

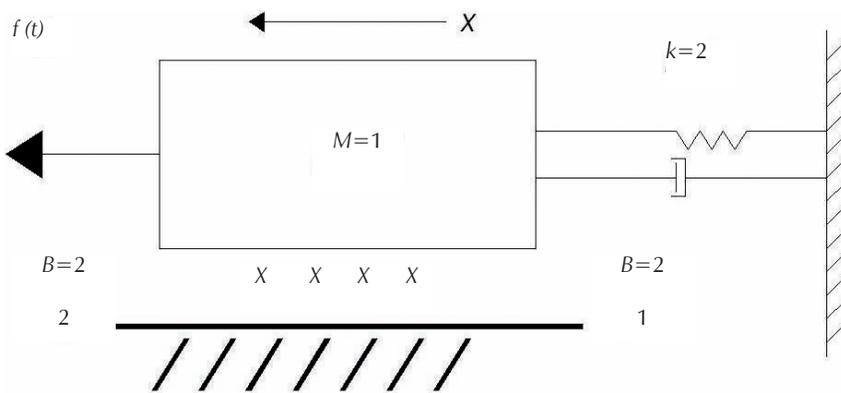


Figura 2. Sistema mecánico en donde las frecuencias naturales de oscilación son valores característicos

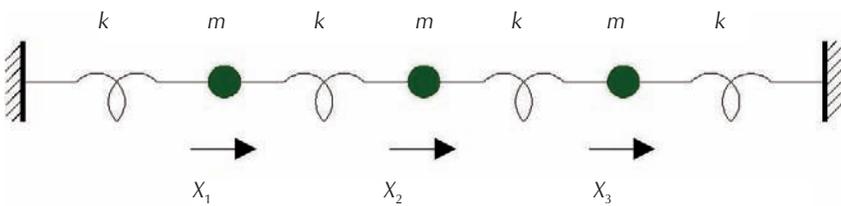


Figura 3. Sistema de masas y resortes en donde las frecuencias naturales de vibración son valores característicos

El método directo del cálculo del determinante de $A-\lambda I$ (Solar y Speziale, 2001) resulta muy laborioso cuando la matriz A es de orden mayor que 3 y la matriz no es del tipo porosa o diagonal. El método de Krylov (Torres *et al.*, 1980, Luthe *et al.*, 1984, Iriarte, 1990) es un procedimiento numérico que evita el problema del cálculo del determinante, pero tiene la particularidad de que debe seleccionarse un valor adecuado de un vector auxiliar y .

Se puede afirmar que toda matriz cuadrada n tiene una sola ecuación característica, pero no se puede decir que dada una ecuación característica existe una sola matriz cuadrada que le da origen; lo anterior se puede ilustrar de manera relativamente sencilla en el caso de matrices de orden dos, por ejemplo, las matrices:

$$A = \begin{bmatrix} 4 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ y } B = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -6 & 4 \end{bmatrix}$$

tienen como ecuación característica a:

$$\lambda^2 - 5\lambda + 4 = 0$$

Encontrar matrices con ecuaciones características iguales se vuelve un problema elaborado a medida que se incrementa el orden de la matriz.

Existen procedimientos del álgebra lineal para estimar distintas matrices A con la misma ecuación característica, pero con la particularidad de que se toma como base una matriz con una forma en particular (muchos ceros o unos entre sus elementos) tal es el caso del llamado método de la matriz compañera (Chen, 1970, Marcus *et al.*, 1964) que considera una matriz porosa A de la forma:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -b_n & -b_{n-1} & b_{n-2} & \dots & -b_1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Donde $b_1, \dots, b_{n-2}, b_{n-1}, b_n$ son los coeficientes de la ecuación característica con la forma dada en la ecuación 3.

La transpuesta de la matriz A tiene la misma ecuación característica.

Adicionalmente se puede encontrar una matriz similar a la matriz A , cuya ecuación característica se conoce. Dicho concepto toma en cuenta el producto de matrices, la igualdad de matrices, así como la definición de matriz inversa, al considerar que la matriz similar C se puede calcular como (Chen, 1970, Marcus *et al.*, 1964):

$$C = BAB^{-1} \quad (2)$$

donde B es una matriz no singular que se puede proponer.

En estos métodos debe conocerse previamente la matriz A , cuya ecuación característica es conocida. Si se propone una matriz B , los elementos de C se pueden calcular con un sistema de ecuaciones lineales.

El método de Givens (Givens, 1954, Scheid, 1968) y su modificación a partir del reordenamiento de las operaciones de transformación hecha por Johansen (1961) para disminuir tiempos de cálculo, resuelve el problema de obtener los valores característicos de una matriz simétrica A , transformándola en una forma tridiagonal con ayuda de una secuencia de matrices rotadas. Pero de nueva cuenta se parte de conocer la matriz A .

Si el método de Krylov se utiliza a la inversa para abordar el problema de la obtención de la matriz A , conocida la ecuación característica, se presentan requerimientos de métodos numéricos adicionales para el caso de matrices de órdenes superiores a dos, en este caso, la resolución de sistemas de ecuaciones no lineales. En este artículo se presenta la determinación de una matriz cuadrada A de orden 3, a partir de que se conoce su ecuación característica.

Metodología

Método de Krylov

Este método permite obtener la ecuación característica de una matriz cuadrada A , sea:

$$a_0 \lambda^n + a_1 \lambda^{n-1} + a_2 \lambda^{n-2} + \dots + a_{n-1} \lambda + a_n = 0 \quad (3)$$

la ecuación característica de una matriz cuadrada A de orden n .

Si la matriz es de orden n , la ecuación característica es de grado n y por lo tanto $a_0 \neq 0$. Definiendo los coeficientes b_i :

$$b_i = \frac{a_i}{a_0} \quad i=0,1,2,\dots,n \quad (4)$$

Sustituyendo en (1):

$$\lambda^n + b_1 \lambda^{n-1} + b_2 \lambda^{n-2} + \dots + b_{n-1} \lambda + b_n = 0 \quad (5)$$

Aplicando el teorema de Cayley-Hamilton que establece que: "Toda matriz cuadrada A satisface su ecuación característica expresada como una ecuación matricial".

$$A^n + b_1 A^{n-1} + b_2 A^{n-2} + \dots + b_{n-1} A + b_n I = 0 \quad (6)$$

En la ecuación anterior se suman matrices de $n \times n$ y las incógnitas son los coeficientes b_i . Para sumar vectores y no matrices el método propone posmultiplicar por un vector \bar{y} compatible con A , diferente de cero y normalizado:

$$A^n \bar{y} + b_1 A^{n-1} \bar{y} + b_2 A^{n-2} \bar{y} + \dots + b_{n-1} A \bar{y} + b_n I \bar{y} = \bar{0} \quad (7)$$

El vector \bar{y} debe seleccionarse adecuadamente de manera que al final se logre obtener un sistema de ecuaciones lineales compatible determinado, cuyas incógnitas son los coeficientes b_i . Algunas propuestas para este vector son aquellos que tengan un uno entre sus elementos y los restantes sean cero, o bien, el vector de sólo unos:

$$\bar{y} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ 0 \end{bmatrix}; \quad \bar{y} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ 1 \end{bmatrix}; \quad \bar{y} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ 0 \end{bmatrix}$$

El sistema de ecuaciones lineales dado por la ecuación 4 se resuelve y los coeficientes b_i obtenidos se sustituyen en la ecuación 5 obteniendo con ello la ecuación característica buscada.

Solver© en ambiente Excel para resolver sistemas de ecuaciones no lineales

La herramienta Microsoft Excel Solver© utiliza el código de optimización no lineal (GRG2) desarrollado por la Universidad Leon Lasdon de Austin (Texas) y la Universidad Allan Waren (Cleveland).

Los problemas lineales y enteros utilizan el método más simple con límites en las variables y el método de ramificación y límite, implantado por John Watson y Dan Fylstra de Frontline Systems, Inc. (Microsoft Office Excel, 2003).

El procedimiento para su empleo consiste en generar una hoja en Excel en la que se indican las celdas incógnitas y las ecuaciones que las relacionan (puede ser una ecuación o todo un sistema de ecuaciones lineales o no lineales); se indica en otra celda la función objetivo que puede maximizarse, minimizarse o buscar los valores de las incógnitas que la hacen cero. También se pueden añadir ecuaciones de restricción al problema.

Dentro de Excel al invocar a la herramienta Solver© se indican las celdas incógnitas, a las que se les asignan valores iniciales dados por el usuario como primera aproximación; se debe proporcionar también la celda

que contiene la función a optimizar y el algoritmo encuentra una solución al problema.

Método de Krylov a la inversa

El método de Krylov se puede aplicar para determinar una matriz cuadrada de orden n , si se conoce su ecuación característica de grado n . Los pasos a seguir en este caso son:

- 1) Proponer un vector auxiliar \bar{y} , compatible con A diferente de cero y normalizado.
- 2) Se propone la forma de la matriz A ; según el orden se determinarán $n \times n$ elementos.
- 3) Se aplica el Teorema de Cayley-Hamilton, con la forma de la ecuación 5, lo anterior implica hacer los productos correspondientes de la matriz por el vector columna y los coeficientes de la ecuación característica conocida.
- 4) Se resuelve el sistema de ecuaciones no lineales resultante, obteniendo los elementos de la matriz A .

Aplicación

Se plantea el siguiente problema:

La ecuación característica de la matriz cuadrada A está dada por: $\lambda^3 - 9\lambda^2 + 18\lambda - 6 = 0$.

- a) Use el método de Krylov para obtener a la matriz A . Proponga el vector auxiliar para resolver el problema.
- b) Con la matriz A obtenida en el inciso a), compruebe la ecuación característica usando el método directo.

Para resolverlo se propuso un vector auxiliar $\bar{y} = [100]^T$ y la matriz incógnita con

$$\text{elementos } A = \begin{bmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & i \end{bmatrix}$$

Se aplicó el método de Krylov a partir de la ecuación (7), por lo que se determinó:

$$AY = \begin{bmatrix} a \\ d \\ g \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$A^2Y = A(AY) = \begin{bmatrix} a^2 + bd + cg \\ ad + ed + fg \\ ag + dh + ig \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$A^3Y = A(A^2Y) = \begin{bmatrix} a^3 + abd + acg + abd + bed + bfg + acg + cdh + cig \\ a^2d + bd^2 + dcg + aed + e^2d + efg + afg + dfh + ifg \\ a^2g + bdg + cg^2 + adh + ehd + fgh + agi + dhi + i^2g \end{bmatrix} \quad (10)$$

Sustituyendo en la ecuación (7):

$$\begin{bmatrix} a^3 + abd + acg + abd + bed + bfg + acg + cdh + cig \\ a^2d + bd^2 + dcg + aed + e^2d + efg + afg + dfh + ifg \\ a^2g + bdg + cg^2 + adh + ehd + fgh + agi + dhi + i^2g \end{bmatrix} - 9 \begin{bmatrix} a^2 + bd + g \\ ad + ed + fg \\ ag + dh + ig \end{bmatrix} + 18 \begin{bmatrix} a \\ d \\ g \end{bmatrix} - 6 \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Se obtiene el sistema de ecuaciones no lineales:

$$\begin{aligned} a^3 + 2abd + 2acg + bfg + acg + cdh + cig - 9a^2 - 9bd - 9g + 18a - 6 &= 0 \\ a^2d + bd^2 + dcg + aed + e^2d + efg + afg + dfh + ifg - 9ad - 9ed - 9fg + 18d &= 0 \\ a^2g + bdg + cg^2 + adh + ehd + fgh + agi + dhi + i^2g - 9ag - 9dh - 9ig + 18g &= 0 \end{aligned} \quad (12)$$

Es un sistema de tres ecuaciones con nueve incógnitas, es indeterminado y tendrían que fijarse 6 incógnitas para resolverlo; un camino para agregar ecuaciones al sistema es proponer otros dos vectores auxiliares y compatibles con A , diferentes de cero y normalizados. Otro camino es fijar seis de las incógnitas y resolver para las tres restantes, y encontrar una de las múltiples soluciones del sistema.

En este artículo se presenta el segundo caso, en donde se propone por sencillez que la matriz A sea una matriz diagonal, es decir, proponiendo como ceros los elementos b, c, f, d, g, h , el sistema de ecuaciones se reduce a

$$a^3 - 9a^2 + 18a - 6 = 0 \quad (13)$$

De nueva cuenta se tendría una ecuación y tres incógnitas: a, e, i , y tiene la forma de la ecuación característica original.

Resultados

Si se encuentran todas las raíces del polinomio usando la herramienta Solver y buscando los valores de A que hacen cero a la función, se determina una raíz del polinomio y las otras dos se encuentran con la fórmula general para resolver ecuaciones de segundo grado.

Finalmente las tres raíces encontradas son:

$$a_1 = 0.415774508387036; a_2 = 6.28994506 \text{ y } a_3 = 2.29428043$$

y se podrían obtener seis matrices A diagonales, que tienen la ecuación característica indicada, quedando condicionados los valores de los elementos e, i , como sigue:

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0.415774508387036 & 0 & 0 \\ 0 & 6.28994506 & 0 \\ 0 & 0 & 2.29428043 \end{bmatrix};$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 6.28994506 & 0 & 0 \\ 0 & 0.415774508387036 & 0 \\ 0 & 0 & 2.29428043 \end{bmatrix};$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} 2.29428043 & 0 & 0 \\ 0 & 0.415774508387036 & 0 \\ 0 & 0 & 6.28994506 \end{bmatrix}$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} 0.415774508387036 & 0 & 0 \\ 0 & 2.29428043 & 0 \\ 0 & 0 & 6.28994506 \end{bmatrix}$$

$$A_5 = \begin{bmatrix} 6.28994506 & 0 & 0 \\ 0 & 2.29428043 & 0 \\ 0 & 0 & 0.415774508387036 \end{bmatrix}$$

$$A_6 = \begin{bmatrix} 2.29428043 & 0 & 0 \\ 0 & 6.28994506 & 0 \\ 0 & 0 & 0.415774508387036 \end{bmatrix}$$

Las matrices A_1 a la A_6 tienen el mismo valor del determinante $A - \lambda I$ y por lo tanto, la misma ecuación característica:

$$\lambda^3 - 9\lambda^2 + 18\lambda - 6 = 0$$

Se puede aseverar entonces, que dada una ecuación característica puede provenir de más de una matriz cuadrada A .

Conclusiones

La determinación de una matriz cuadrada de orden superior a dos a partir de conocer su ecuación característica se vuelve un problema con requerimientos algebraicos y de algoritmos numéricos para resolver sistemas de ecuaciones que pueden ser no lineales, debido a que en este caso la matriz buscada no es única.

Se aplicó el método de Krylov a la inversa en la búsqueda de una matriz cuadrada, cuya ecuación característica es conocida y con la propuesta de un vector columna auxiliar Y ; al aplicar el procedimiento se obtuvo un sistema de ecuaciones no lineales indeterminado por lo que se fijaron algunas incógnitas con la propuesta por simplicidad de que A fuera una matriz diagonal; con este planteamiento se determinó que existe más de una matriz A con la ecuación característica buscada, en este caso, se encontraron seis matrices A diagonales que tienen la ecuación característica buscada.

Adicionalmente se determinó la herramienta Solver© que permite resolver un sistema de ecuaciones no lineales, en este caso particular el sistema se redujo a una ecuación tipo polinomial de tercer grado.

Se pudo concluir que la aplicación del método de Krylov a la inversa permite la obtención de matrices cuadradas, conocida su ecuación característica y la forma de

la matriz que se desea encontrar dependerá de la interpretación física o matemática del problema analizado.

Referencias

- Chapra S., Canale. *Métodos numéricos para ingenieros*, México, Mc Graw Hill, 2000, pp. 982.
- Chen C.T. *Introduction To Linear Systems Theory*, New York, Holt, Rinehart And Wiston Inc., 1970.
- Givens W. Numerical Computation of the Characteristic Values of a Real Symmetric Matrix. Oak Ridge National Laboratory. Report No. ONRL 1574, 1954.
- Iriarte V.B.R. *Métodos numéricos*, México, Facultad de Ingeniería, UNAM, Trillas, 1990, pp. 269.
- Johansen D.E. Modified Givens Method for the Eigenvalue Evaluation of Large Matrices. *Journal of the ACM (JACM)*, 8(3):331-335. July 1961 [en línea]. Disponible en: <http://portal.acm.org/citation.cfm?id=321077>
- Luthe R., Olivera A., Schutz F. *Métodos numéricos*, México, Limusa, 1984, pp. 443.
- Marcus M., Minc H. *A Survey of Matrix Theory and Matrix Inequalities*, Prindle, Boston, MA, Weber & Smith, Inc., 1964.
- Microsoft Office Excel. Temas de ayuda del Software Excel versión 2003.
- Scheid F. *Numerical Analysis*. Schaum's Outline Series. London, McGraw-Hill, 1968.
- Solar G.E., Speziale De G.L. *Apuntes de álgebra lineal*, México, Limusa-Noriega Editores, Facultad de Ingeniería, UNAM, 2001, pp. 291-866.
- Torres F.J.A., Czitrom De G.V. *Métodos para la solución de problemas con computadora digital*. México. Impresiones y Servicios de Ingeniería, SA de CV, 1980, pp. 579.

Semblanza de los autores

Jesús Javier Cortés-Rosas. Es ingeniero mecánico electricista egresado de la Facultad de Ingeniería de la UNAM y maestro en administración por la Facultad de Contaduría y Administración, con diplomado en planeación y administración de recursos humanos y en desarrollo humano. Tiene todos los créditos de la maestría en administración de organizaciones. Es profesor de carrera de la Facultad de Ingeniería en el área de matemáticas aplicadas. Actualmente es jefe del Departamento de Matemáticas Avanzadas, Análisis Numérico y Dibujo. Fue jefe de servicio de campo en Equipos de Construcción e Industria, SA de CV de la División Bienes de Capital del Grupo ICA y fue auditor técnico externo, entre otros cargos.

Maritza Lilitiana Arganis-Juárez. Egresada de la Facultad de Ingeniería, con maestría y doctorado por la misma institución. Actualmente es investigadora asociada de la Coordinación de Hidráulica del Instituto de Ingeniería y profesora de asignatura definitiva de análisis numérico y de cinemática y dinámica, asignaturas que imparte en la Facultad de Ingeniería de la UNAM en el Departamento de Ciencias Aplicadas. En 1993, inició su colaboración con la UNAM como profesora de física en la Escuela Nacional Preparatoria. Actualmente realiza investigaciones en el área de aprovechamientos hidráulicos e hidrología, incluyendo el cómputo evolutivo aplicado a la hidrología y a la hidráulica.

Control neuronal auto-ajustable en tiempo real de un proceso de producción de fibra óptica polimérica

Real Time Self-Adjusting Neuro Control of a Polymeric Optical Fiber Production Process

Fuentes-Silva C.

Universidad Autónoma de Querétaro, México
Correo: ingcfsqro@hotmail.com

Noriega-Ponce A.

Universidad Autónoma de Querétaro, México
Correo: anoriega@uaq.mx

Ocampo-Mortera M.A.

Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada, UNAM
Campus Juriquilla, Querétaro, México
Correo: oca@fata.unam.mx

Serroukh I.

Universidad Autónoma de Querétaro, México
Correo: ibraser@hotmail.com

Información del artículo: recibido: enero de 2010, reevaluado: octubre de 2010, aceptado: abril de 2011

Resumen

En este trabajo se presenta un control neuronal auto ajustable en tiempo real para la fabricación de fibras ópticas poliméricas mediante el estirado de preformas, enfocado a controlar las variaciones de baja frecuencia del diámetro de las fibras producidas. Aunque el estirado de fibras ópticas es un proceso de variables extendidas, y el sistema propuesto sólo emplea 7 neuronas con parámetros ajustables, los resultados obtenidos muestran la posibilidad de reducir la máxima variación de diámetro en 50%, respecto a la observada cuando no se emplea un control del proceso y el diámetro de las fibras obtenidas se mantiene con variaciones menores a 4% del diámetro promedio, con lo que se pueden cumplir las especificaciones comerciales y normativas internacionales.

Abstract

A real time self-adjusting neuro control scheme for optical fiber drawing is presented in this paper. The fiber presents high and low frequency variations in the obtained diameter, being these last ones caused by variations in the preform diameter and the distribution of the molecular weight which affects the rheologic behavior during the drawing process of the material. In order to control these variations an algorithm of self-adjusting control based on a three layers perceptron type neural network is proposed.

Descriptores

- fibra óptica polimérica
- red neuronal
- control autoajustable

Keywords

- optic fiber
- polymeric neural network
- self-tuning control

Introducción

La obtención de fibras ópticas poliméricas mediante el estirado de preformas es un proceso no-lineal, cuyo comportamiento obedece a una dinámica de parámetros continuamente distribuidos. Los modelos matemáticos para representar su comportamiento son complejos, requieren la solución de las ecuaciones de balance de masa y de energía en una región de dimensiones considerables y, salvo por la ecuación que representa la conservación global de masa bajo condiciones estacionarias, no pueden ser sustituidos por expresiones representativas suficientemente simples para incorporarse en un sistema de control convencional (Reeve *et al.*, 2003). Debido a esto, el control del proceso requiere de herramientas eficientes con capacidad adaptativa para representar la dinámica del sistema bajo condiciones que varían de forma impredecible. En el presente trabajo exploramos la utilidad de las redes neuronales para abordar este problema (Colmenares *et al.*, 2001).

El estirado de fibras ópticas, principalmente de óxido de silicio, ha sido abordado con múltiples enfoques. Desde 1978, Nakahara propuso que al estudiar los efectos de diferentes condiciones térmicas y mecánicas sobre la estabilidad en el diámetro de las fibras producidas y sobre su resistencia a la tensión, las variaciones de temperatura en el horno son el principal factor que afecta las variaciones de alta frecuencia en el diámetro de la fibra. También sugirió que las variaciones de baja frecuencia son ocasionadas por variaciones longitudinales en el diámetro de la preforma y propuso un control basado en el ajuste retroalimentado de la velocidad de estirado para reducir estas últimas.

Otros autores han propuesto el control de la temperatura de los gases alimentados al horno de estirado, mediante el control de la proporción de gas frío y caliente introducida al proceso. Bajo este esquema se pueden compensar las variaciones de diámetro de mediana frecuencia de la fibra producida mediante el enfriamiento local del cuello de estirado, aunque se ve afectada su resistencia mecánica por el almacenamiento de esfuerzos producidos por una mayor velocidad de enfriamiento del material (Imoto *et al.*, 1989).

En el caso de las fibras ópticas poliméricas, las variaciones locales del peso molecular manifiestan su impacto tanto en el comportamiento reológico durante el proceso de estirado del material, como en las características mecánicas y dimensionales de la fibra producida (Valenzuela, 2006). El control del proceso se ve complicado por la mayor variabilidad de las características termomecánicas del material. Adicionalmente, el mayor diámetro típico de las fibras poliméricas introduce

una mayor velocidad del flujo de material con una consecuente mayor inestabilidad del proceso.

Como ya se ha mencionado, en el presente trabajo se aborda el problema de controlar el diámetro de fibras ópticas de Poli-metil-metacrilato (PMMA) producidas mediante el estirado de preformas, empleando un sistema que retroalimenta la velocidad de extracción de la fibra producida y usa como controlador una red neuronal de tres capas tipo perceptrón, que ajusta sus parámetros en cada ciclo de operación, en tiempo real firme (Noriega *et al.*, 2004). El sistema de control se desarrolló en una plataforma LabVIEW, sobre la que se integró la instrumentación de la torre de estirado empleada para monitorear el diámetro de la fibra y para efectuar los ajustes necesarios en la velocidad de estirado. Los resultados son comparados con los obtenidos mediante un sistema que fija los parámetros de proceso en los valores necesarios para producir una fibra con las características deseadas. El esquema de control propuesto tiene la capacidad de retropropagar el error de regulación en lugar del error de salida de la red, por lo que es posible sustituir los coeficientes de la red neuronal obtenidos durante el entrenamiento previo de la red por los valores generados por un proceso de adaptación subsecuente en tiempo real.

Descripción del sistema de estirado de preformas y del modelo de proceso. Planteamiento experimental

Descripción de la torre de estirado

La torre de estirado consta de un subsistema para la alimentación de la preforma, de un subsistema para la extracción de la fibra estirada, de un horno tubular de dos zonas para el reblandecimiento de la preforma con obturadores en ambos extremos para limitar el flujo convectivo de aire entre la cámara de calentamiento y el exterior, y de un monitor ZUMBACH XY18, que mide el diámetro de la fibra producida con una precisión de ± 1 micra. Los sistemas de alimentación de la preforma y de extracción de la fibra se encuentran conectados a un controlador de movimiento de dos ejes, GALIL DMC1425, que controla la velocidad de los motores correspondientes con estabilidades de ± 0.001 rev/min y de ± 0.01 rev/min, respectivamente. Las dos secciones del horno son controladas mediante controladores independientes de temperatura OMRON E5EN tipo PID, con una estabilidad de $\pm 0.1^\circ\text{C}$ en la zona superior y de $\pm 0.2^\circ\text{C}$ en la zona inferior. Estos subsistemas se encuentran comunicados mediante conexiones RS-232 y Ethernet con una PC de control central que establece los

parámetros de proceso mediante el programa LabVIEW desarrollado. La figura 1 muestra en forma esquemática el diagrama de la torre de estirado y la figura 2 muestra una foto del sistema empleado en este trabajo, desarrollado en el CFATA-UNAM.

La operación rutinaria de la torre de estirado inicia calentando cada zona del horno de reblandecimiento a las temperaturas establecidas. Una vez estabilizada la temperatura del horno se instala la preforma en el sistema de alimentación y se inicia su descenso a la velocidad establecida para el proceso. En algún momento, después de introducida la preforma al horno, ésta alcanza su temperatura de reblandecimiento y empieza a fluir por gravedad. Se forma así un cuello de estirado que se alarga hasta que el extremo inferior de la preforma sale por el extremo inferior del horno. Se corta la parte gruesa del material extraído y se instala la fibra obtenida en el sistema de extracción de fibra, que la sigue jalando mientras dura el proceso. Durante la etapa inicial del estirado, la fibra obtenida se mantiene cambiando su diámetro hasta que se estabiliza el proceso, después de lo cual, las variaciones de diámetro observadas corresponden a las perturbaciones inherentes que sufre el proceso. El control desarrollado modifica la velocidad de estirado para controlar las variaciones de diámetro de la fibra mediante el algoritmo de control alimentado al programa, que toma como entrada los valores de diámetro reportados por el monitor de diámetro.

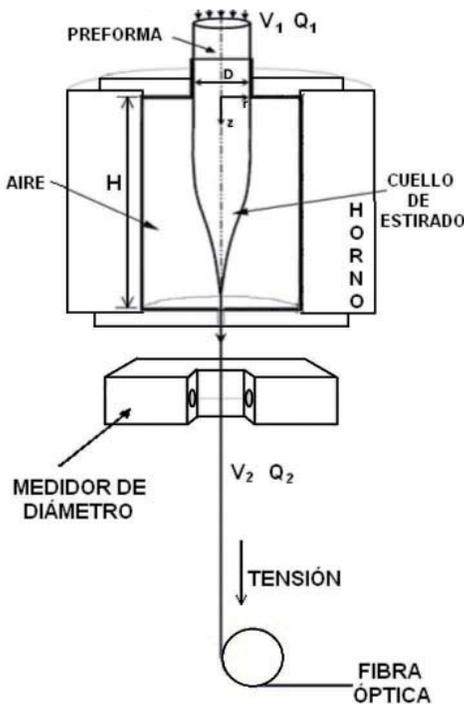


Figura 1. Esquema de la torre de estirado

Modelos del proceso

La descripción matemática del flujo de los materiales que constituyen una preforma durante el proceso de obtención de una fibra óptica ha sido modelada, entre otros, por Reeve *et al.* (2003) y Lee *et al.* (2006), mediante modelos genéricos que consideran los flujos radiativo y convectivo de calor entre la superficie interna del horno y la preforma, y los concomitantes flujos de calor por conducción y masa en el interior de la preforma. La aproximada simetría cilíndrica del problema permite reducir el número de variables a determinar como una función de la posición y del tiempo, de manera que sólo las componentes radial y axial de los flujos correspondientes son introducidas en los modelos.

Las ecuaciones que gobiernan los flujos de masa, momento y energía, se pueden escribir en coordenadas cilíndricas de la siguiente manera:

Conservación de la masa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho u) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho v) = 0 \quad (1)$$

Conservación del momento:

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \sigma_{rz}) + \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial z} - 2\mu \frac{u}{r^2}, \quad y \quad (2)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \sigma_{rz}) + \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial z} + \rho g, \quad y \quad (2')$$

Flujo de calor:

$$\rho c_p \frac{DT}{Dt} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(k_m r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_m \frac{\partial T}{\partial z} \right) + W_i + \mu \Phi. \quad (3)$$

Donde:

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial r} + v \frac{\partial}{\partial z}, \quad \sigma_{rr} = -P + 2\mu \frac{\partial u}{\partial r},$$

$$\sigma_{zz} = -P + 2\mu \frac{\partial v}{\partial z}, \quad \sigma_{rz} = 2\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial r} \right), \quad y$$

$$\Phi = 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{u}{r} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial r} \right)^2.$$

Las variables a determinar como una función de la posición y del tiempo son la presión, P , la temperatura, T , y las componentes radial y axial de la velocidad, u y v , respectivamente. ρ es la viscosidad, μ es la viscosidad, k_m es la conductividad térmica y C_p es el calor específico del fluido en consideración (aire o material de la preforma); g es la aceleración de la gravedad, y W_i es la generación de calor por unidad de tiempo y de volumen.

Las condiciones en la frontera deben considerar la distribución de temperaturas en la superficie cilíndrica del horno y sus tapas, y los modelos para las correspondientes emisión radiativa y transferencia convectiva. Asimismo, se deben incluir las distribuciones de temperatura en la sección transversal de la preforma entrante al horno y de la fibra saliente, así como sus velocidades. Comúnmente, la velocidad de salida de la fibra no coincide con la velocidad de extracción, pues ésta aun no se ha consolidado a la salida del horno. La superficie de la preforma, desde el punto de introducción hasta su salida como fibra, pasando por el cuello de estirado, es una variable del proceso que debe ser determinada de manera autoconsistente con la solución de las ecuaciones de conservación planteadas.

Dado que la viscosidad del material de la preforma es fuertemente dependiente de la temperatura, llegando a tener variaciones de 10% con un grado de variación en la temperatura bajo las condiciones normales de procesamiento, el flujo del material para formar la fibra se encuentra fuertemente acoplado con el flujo térmico en todo el sistema, incluso con la historia térmica de la preforma, que además de depender de la manera en que se realiza su calentamiento inicial, es calentada por el flujo convectivo en el exterior del horno antes de ingresar.

Siendo la principal contribución al flujo de calor entre el horno y la superficie de la preforma el flujo radiativo, las dificultades para evaluar los factores dependientes de la orientación de las superficies y las respuestas espectrales dependientes de la absorción y emisión en las superficies relevantes, complican aún más el cálculo de las soluciones buscadas.

Las soluciones a las ecuaciones de conservación presentadas para determinar el flujo de materiales durante el estirado de una preforma se han obtenido numéricamente y comparado con observaciones experimentales. En el caso de las fibras de óxido de silicio, las diferencias prevaletentes entre los modelos y lo observado muestran a las variaciones de diámetro de alta frecuencia como un comportamiento difícil de modelar, ya que éstas son consecuencia del establecimiento de regímenes oscilatorios complejos en las corrientes convectivas alrededor del cuello de estirado que promueven cambios

rápidos de la viscosidad del material en las regiones de formación final de las fibras. De igual importancia son las diferencias dimensionales de la preforma con las predicciones del modelo, que aunque en las regiones de baja deformación se mantienen por debajo de 5%, en la región de formación de la fibra pueden alcanzar diferencias cercanas a 100%.

En el caso del estirado de fibras ópticas poliméricas, el modelado del proceso presenta problemas adicionales, debido a las inhomogeneidades del peso molecular de los materiales que conforman a las preformas, que pueden ocurrir con variaciones del orden de 5% o mayores, a lo largo del eje de la preforma en materiales convencionales (García *et al.*, 2010). Tales irregularidades en los materiales se manifiestan comúnmente como variaciones del diámetro de frecuencias intermedias y bajas, que pueden tornar incontrolable el proceso si se desea aumentar la velocidad de producción, ya que en estas condiciones el cuello de estirado tiende a aumentar en longitud, pudiendo contener regiones de diferente fluidez, difícilmente controlables por los parámetros de proceso comúnmente disponibles para tal efecto.

Independientemente de las dificultades para resolver los problemas involucrados en el modelado del proceso de estirado, la descripción de algunos aspectos generales del estado estacionario son importantes para establecer las condiciones de referencia sobre la que se pueden identificar las variables que juegan un papel central en el control del proceso.

Una vez que se ha formado el cuello de estirado y que el proceso ha evolucionado por un tiempo sin modificaciones en la temperatura del horno y en las velocidades de alimentación de la preforma, V_1 , y de extracción de la fibra, V_2 , el sistema alcanza, en términos generales y de manera natural, un estado estacionario en el que el flujo del material de la preforma a la entrada del horno compensa su salida en forma de fibra en el extremo inferior del horno, reflejando el balance de masa en tales condiciones.

Refiriéndonos a la figura 1, que representa de manera esquemática el proceso estudiado, los flujos de masa de la preforma en la entrada del horno, Q_1 , y de la fibra a la salida obtenida, Q_2 , están dados por:

$$Q_1 = \pi D^2 V_1 \rho_1 / 4 \quad \text{y} \quad Q_2 = \pi d^2 V_2 \rho_2 / 4,$$

donde D y d son los diámetros de la preforma y de la fibra, respectivamente, y ρ_1 , ρ_2 son las densidades correspondientes. En estado estacionario, y considerando que no hay diferencia significativa en la densidad del polímero a la entrada contra la densidad del mismo polímero a la salida del horno, tenemos que la velocidad

de salida de la fibra (V_2) está relacionada con la velocidad de alimentación (V_1) de la preforma de la siguiente manera:

$$v_2 = \left(\frac{D}{d}\right)^2 v_1 \quad (4)$$

Para lograr un estado estacionario en el proceso de estirado deben equilibrarse las transferencias de calor y de masa en cada punto del interior del horno. En el estirado real de una fibra polimérica se tienen múltiples fuentes de fluctuación de tales variables, por lo que el estado estacionario sólo se consigue de manera aproximada. El control del proceso requiere así que las desviaciones observadas sean corregidas mediante esquemas que consideren sus principales causas y tomen en cuenta los complejos comportamientos del sistema.

Considerando que la estabilidad de los movimientos controlados de la preforma y de la fibra, así como de la temperatura de las paredes del horno es bastante buena, los principales factores a considerar para controlar el proceso son las heterogeneidades de la fluidez del material de la preforma, asociadas con distribuciones irregulares del peso molecular, la alta sensibilidad del flujo de calor a los cambios dimensionales de la preforma, la presencia de celdas de convección alrededor del cuello de estirado y en la zona de consolidación de la fibra producida (Reeve *et al.*, 2003). Estas dificultades y el carácter no-lineal de las ecuaciones que determinan el flujo de los materiales confieren una gran dificultad a la obtención de una descripción simple del sistema que permita representar el proceso por expresiones matemáticas cerradas para simplificar los algoritmos de control.

En este trabajo, nos hemos enfocado a minimizar las variaciones de diámetro de baja frecuencia, de particular importancia en el estirado de fibras ópticas poliméricas, pues limitan la posibilidad de cumplir con la normatividad existente y con los estándares establecidos. Para ello, se decidió explorar la habilidad de un controlador neuronal auto-ajutable para controlar el proceso mediante la modificación de la velocidad de estirado en respuesta a las fluctuaciones de diámetro monitoreadas en línea.

Planteamiento experimental

Para evaluar el sistema de control estudiado, se estiraron 10 preformas de PMMA, de 25.0 mm de diámetro y aproximadamente 30 cm de longitud. Se ajustaron las condiciones de proceso para obtener fibras de ópticas de 500 micras de diámetro. En todos los casos, las pre-

formas se alimentaron al horno con una velocidad de 1.5 mm/min. La velocidad de extracción de la fibra se alternó entre dos regímenes; uno de velocidad constante, a 3.75 m/min, apropiado para obtener el diámetro de fibra deseado, y otro en el que la velocidad fue determinada por el control neuronal a partir de los diámetros monitoreados en tiempo real. Para los parámetros escogidos, el control limitaba la velocidad de producción entre 2.6 y 5.8 m/min. Las fluctuaciones de diámetro obtenidas fueron analizadas para determinar el grado de control alcanzado.

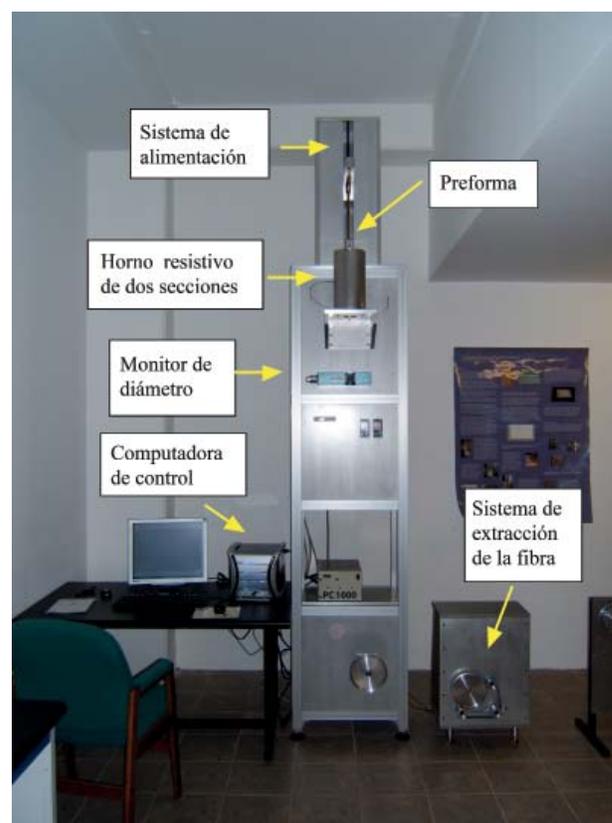


Figura 2. Torre de estirado

Implantación del controlador neuronal auto-ajutable

Selección del periodo de muestreo

Debido a que las variaciones del diámetro son desconocidas en alta y baja frecuencia, la frecuencia de muestreo se escogió de 4Hz (250 ms) para guardar un margen de seguridad, limitado por la frecuencia de medición del ZUMBACH XY18, el cual garantiza una frecuencia máxima de medición de 5Hz. Aún cuando el comportamiento es diferente en distintos periodos de muestreo

las variaciones están determinadas principalmente por las variaciones del peso molecular y las variaciones de temperatura ocasionadas por el comportamiento caótico del flujo dentro del horno, las cuales no pueden ser registradas durante la prueba.

Filtrado del diámetro

Ya que el objetivo es controlar las variaciones de baja frecuencia modificando la velocidad de estirado, se implementó un filtro de la media móvil que produce el promedio de un número de puntos de la señal de entrada para producir cada punto de la señal de salida:

$$y[i] = \frac{1}{M} \sum_{j=0}^{M-1} x[i+j] \quad (5)$$

Donde x es la señal de entrada, y la señal de salida y M es el número de puntos empleados para calcular el valor medio (Smith, 1999). Al aplicar el filtro de media móvil se tiene un compromiso entre la eficiencia del filtro para eliminar las altas frecuencias y el retardo generado en la señal filtrada con respecto a la original, como se aprecia en la figura 3, lo cual dificulta el control del sistema. En nuestros experimentos empleamos 16 pun-

tos para este cálculo basados en experimentación, utilizando diferente número de puntos, concluyendo que 16 puntos nos permiten reducir las altas frecuencias manteniendo el retardo en un mínimo aceptable para nuestro experimento.

La implementación del filtro en LabVIEW se realizó empleando un registro de desplazamiento que guarda un vector formado por la concatenación del valor actual con los valores anteriores del diámetro medido, el vector es recortado de acuerdo al tamaño del filtro.

Una vez determinado el vector se suman todos los valores y se divide el resultado entre el tamaño del filtro para obtener el valor de media móvil (figura 4). El valor obtenido se emplea entonces para calcular la diferencia entre el diámetro deseado y el promedio obtenido, y el resultado se emplea como entrada del algoritmo de control.

Esquema en retroalimentación simple con un controlador neuronal auto-ajustable

La figura 5 muestra el esquema general del control propuesto. Se muestran el filtro empleado para el diámetro medido, su comparación con el diámetro deseado, su alimentación a la red neuronal y la salida generada.

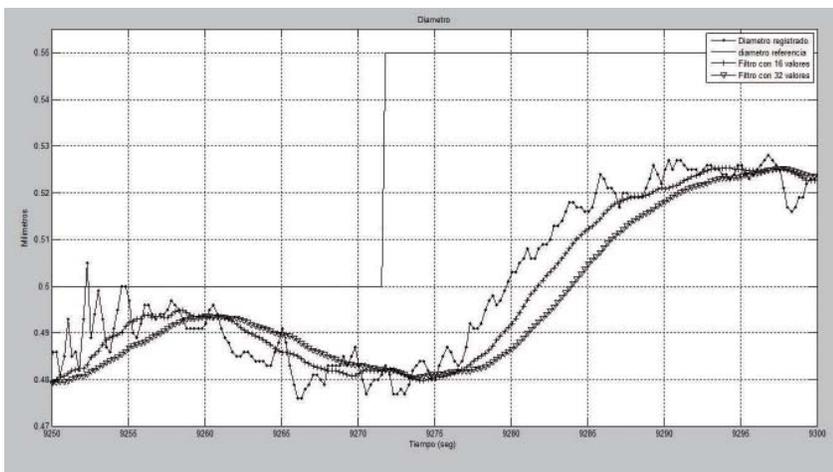


Figura 3. Desfase de la señal debido al tamaño del filtro

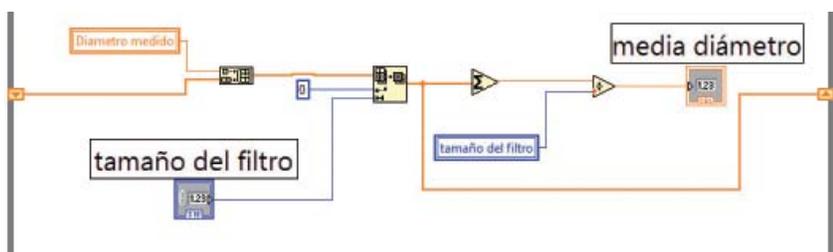


Figura 4. Implementación del filtro en LabVIEW

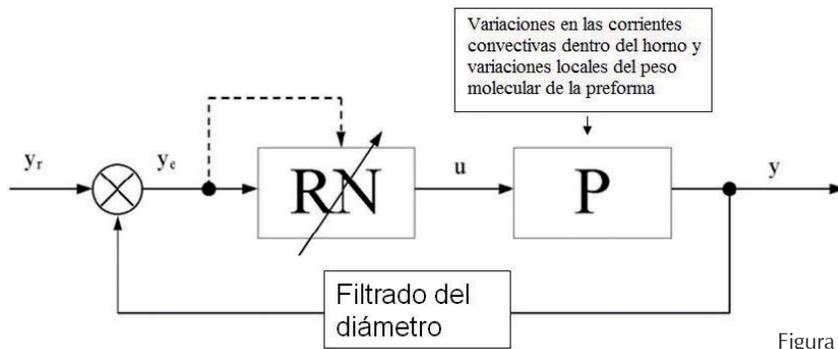


Figura 5. Esquema de control

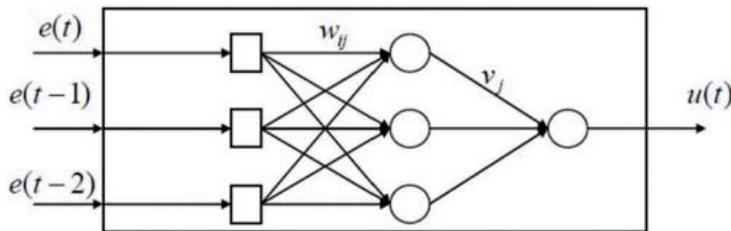


Figura 6. Estructura de red neuronal de control

La estructura de la red neuronal propuesta se muestra en la figura 6. En ésta se sustituye la etapa de aprendizaje por una adaptación continua en tiempo real de los coeficientes de peso, w y v , de la red neuronal (Noriega *et al.*, 2004)

La implementación de la red neuronal en LabVIEW se realizó mediante una plataforma MATLAB Script, que emplea un lenguaje similar al de MATLAB. El algoritmo desarrollado se incluye en la figura 7. Los valores de los pesos de los coeficientes w_{ij} , v_j y la diferencia entre el diámetro de referencia (y_r) y el diámetro medido (df) se introduce al control mediante registros de desplazamiento. El procedimiento de minimización consiste en un movimiento en la dirección negativa de la función $E(t)$ respecto a los coeficientes w_{ij} y v_j (Noriega *et al.*, 2004).

$$E[t] = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^t e_y(k)^2 \quad (6)$$

El gradiente $E(t)$ es un vector multidimensional con componentes .

$$\frac{\partial E(t)}{\partial v_j}, \frac{\partial E(t)}{\partial w_{ij}}$$

La velocidad de modificación de los pesos está determinada por el valor del coeficiente de aprendizaje, α , que en los experimentos realizados se fijó en un valor de 0.8.

```

MATLAB Script
ey = yr - df;
xe1 = ey;
xe2 = eyant1;
xe3 = eyant2;
eyant1;
eyant2;
we11a;
we12a;
we13a;
we21a;
we22a;
we23a;
we31a;
we32a;
we33a;
ve1a;
ve2a;
ve3a;
alfa;
yr;
df;
ey;
we11;
we12;
we13;
we21;
we22;
we23;
we31;
we32;
we33;
ve1;
ve2;
ve3;
u;

he1=(we11a*xe1)+(we21a*xe2)+(we31a*xe3);
he1=1/(1+exp(-he1));
he2=(we12a*xe1)+(we22a*xe2)+(we32a*xe3);
he2=1/(1+exp(-he2));
he3=(we13a*xe1)+(we23a*xe2)+(we33a*xe3);
he3=1/(1+exp(-he3));
u=(ve1a*he1)+(ve2a*he2)+(ve3a*he3);
u=1/(1+exp(-u));
s=ey*u*(1-u);
s1=s*ve1a*he1*(1-he1);
s2=s*ve2a*he2*(1-he2);
s3=s*ve3a*he3*(1-he3);
ve1=ve1a+(alfa*s*s1);
ve2=ve2a+(alfa*s*s2);
ve3=ve3a+(alfa*s*s3);
we11=we11a+(alfa*s1*xe1);
we12=we12a+(alfa*s2*xe1);
we13=we13a+(alfa*s3*xe1);
we21=we21a+(alfa*s1*xe2);
we22=we22a+(alfa*s2*xe2);
we23=we23a+(alfa*s3*xe2);
we31=we31a+(alfa*s1*xe3);
we32=we32a+(alfa*s2*xe3);
we33=we33a+(alfa*s3*xe3);
    
```

Figura 7. Implementación de la red neuronal en LabVIEW

Resultados

Pruebas de estirado manual y automático

Los resultados de las pruebas se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 1. Desviación estándar del diámetro medido y valor promedio (en mm), para las operaciones con control automático y manual del sistema

Prueba 1			
Desviación estándar		Media	
Automático	0.0046	Automático	0.5001
Manual	0.0163	Manual	0.4793
Prueba 2			
Desviación estándar		Media	
Automático	0.0025	Automático	0.5
Manual	0.0095	Manual	0.4923
Prueba 3			
Desviación estándar		Media	
Automático	0.0053	Automático	0.5005
Manual	0.0082	Manual	0.4922
Prueba 4			
Desviación estándar		Media	
Automático	0.0039	Automático	0.4997
Manual	0.0054	Manual	0.4892
Prueba 5			
Desviación estándar		Media	
Automático	0.0068	Automático	0.4993
Manual	0.0104	Manual	0.4912

En la figura 8 se muestran gráficamente los resultados de una de las pruebas realizadas. Se observa claramente que las variaciones de velocidad introducidas por la red neuronal mantienen los valores del diámetro registrado oscilando alrededor del valor deseado de 500 micras. Al pasar de control manual a automático y manteniendo la velocidad fija se observa una disminución en la desviación del diámetro que oscila con baja frecuencia alrededor del diámetro deseado manteniéndose las oscilaciones de alta frecuencia. Esto es consistente con la hipótesis de que las variaciones de diámetro de alta frecuencia se deben a las corrientes convectivas que se forman dentro del horno.

Un acercamiento a la zona de mayor variación de una de las pruebas durante el control automático, nos permite analizar la respuesta de velocidad del sistema de control. Los cambios de pendiente en la velocidad coinciden con el cruce de la variable controlada con el valor deseado; la velocidad de estirado aumenta progresivamente mientras la variable está por arriba del valor deseado y viceversa.

La figura 9 muestra una comparación de la variable de control (velocidad) contra la variable controlada (diámetro).

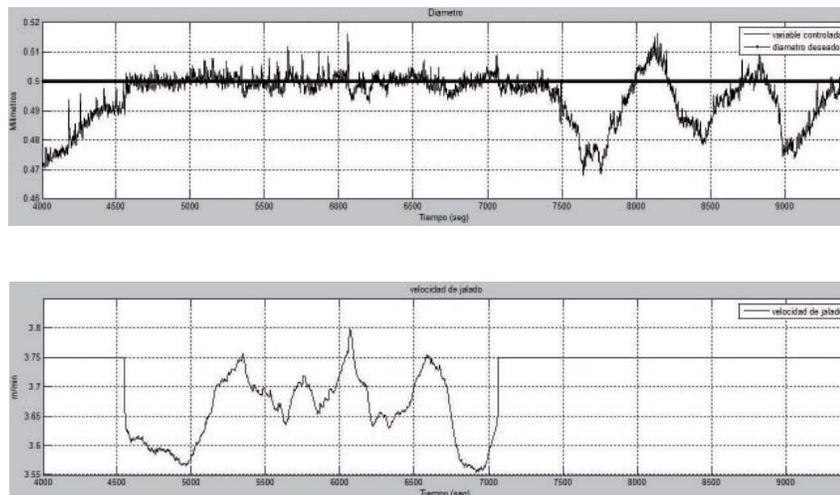


Figura 8. Gráfica obtenida de la segunda prueba

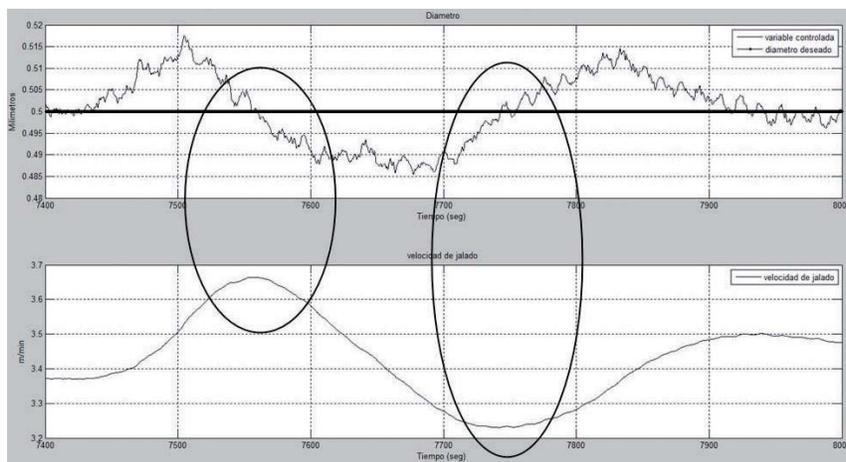


Figura 9. Comparación variable de control-variable controlada

Conclusiones

El algoritmo de control implementado en este trabajo se adapta a una variedad de procesos incluyendo los no lineales como es la producción de fibras ópticas. No es necesario un conocimiento a priori del modelo matemático del sistema para poder realizar un control, aunque si es necesario conocer cómo se comporta en general. Para determinar el valor apropiado del coeficiente de aprendizaje de la red sólo hacen falta unas cuantas pruebas y los coeficientes de los pesos w_j , v_j se adaptan en tiempo real de acuerdo a los cambios del sistema, lo cual permite que el control neuronal pueda ser usado en procesos con dinámicas difíciles. En el presente trabajo perturbaciones tales como las variaciones del peso molecular y variaciones longitudinales en el diámetro a lo largo de la preforma son compensados eficientemente por la red neuronal.

Referencias

- Colmenares K.T., Suárez M.E., Uria M., Lamanna R. Implantación de un esquema de control PID autoajutable en un proceso químico modelado con redes neuronales. *Revista de la Facultad de Ingeniería de la U.C.V.*, 16:107–114, 2001.
- García A., Ocampo M.A., Saldívar-Guerra E., García-Gaitán B., Vivaldo-Lima E., Luna-Bárceñas G. Modified Frontal Polymerization of Poly (Methyl Methacrylate). *Journal of Applied Polymer Science*, 115:1289-1295, 2010.
- Imoto K., Sumi M., Toda G., Suganuma T. Optical Fiber Drawing Method with Gas Flow Controlling System. *J. Lightwave Technology*, 7:115-121, 1989.
- Lee K.M., Wei Z., Zhou Z., Hong S.P., Computational Thermal Fluid Models for Design of a Modern Fiber Draw Process. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 3:108-118, 2006.
- Nakahara M., Sakagauchi S., Miyashita T. *Review of Electronic Communications Lab.*, 26:476-483, 1978.
- Noriega-Ponce A., Aguado-Behar A., Ordaz-Hernández A., Rauch-Sitar V. Neural Networks for Self-tuning Control Systems, Czech Technical University in Prague. *Acta Polytechnica*, 44, 2004.
- Reeve H.M., Mescher A.M. Effect of Unsteady Natural Convection on the Diameter of Drawn Polymer Optical Fiber. *Optics Express*, 11:1770-1779, 2003.
- Reeve H.M., Mescher A.M., Emery A.F. Investigation of Convective Heating in a Polymer Fiber Drawing Process. *Polymer Composites*, 24:279-290, 2003.
- Smith S.W. *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*, 2a ed., Technical Publishing, California, 1999.
- Valenzuela J.O. *Obtención de fibras ópticas de poli (metil metacrilato) por el método de estirado*. Tesis (maestría), México DF, Facultad de Química UNAM, 2006.

Semblanza de los autores

Carlos Fuentes-Silva. Estudiante de la maestría en ciencias en la Universidad Autónoma de Querétaro, programa de instrumentación y control con especialidad en electrónica. Cursó la licenciatura en instrumentación y control en la UAQ. Su interés en investigación se centra en la producción de fibras ópticas poliméricas y desarrollo de instrumentos para la aplicación de las mismas, usando programación de alto y bajo nivel con software como LabVIEW y lenguaje VHDL en FPGA.

Alfonso Noriega-Ponce. Es ingeniero industrial en electricidad por el Instituto Tecnológico de Querétaro, México, egresado en 1977. Obtuvo el grado de maestría en ciencias de ingeniería eléctrica con especialidad en control automático en 1992 por el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional en la Ciudad de México, DF. Desde 1986 a la fecha, es profesor de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro, México. Sus áreas de interés son: control inteligente y control adaptable.

Miguel Ángel Ocampo-Mortera. Físico y maestro en ciencias por la Facultad de Ciencias de la UNAM, es doctor en ingeniería (materiales) por la Universidad Autónoma de Querétaro. Es responsable del Laboratorio de Fibras Ópticas del Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada de la UNAM y miembro del SNI en el nivel I.

Ibrahim Serroukh. Doctor. Actualmente trabaja en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro.

Reproducibilidad en representación sísmica

Reproducibility in Seismic Imaging

González-Verdejo O.

*Dirección de Exploración y Producción
Instituto Mexicano del Petróleo
Correo: oziel.gonzalezv@gmail.com*

Chávez-Pérez S.

*Dirección de Exploración y Producción
Instituto Mexicano del Petróleo
Correo: sergio.chavezp@gmail.com*

Información del artículo: recibido: marzo de 2010; aceptado: mayo de 2011

Resumen

En el campo de la sismología de exploración, actividad fundamental en la industria petrolera, existe interés en el ámbito nacional por incorporar la reproducibilidad computacional en la aplicación, investigación y docencia del procesamiento y representación de datos sísmicos (modelado, migración, tomografía e inversión). Esta reproducibilidad computacional implica la estructuración y descripción de los elementos de un experimento numérico o secuencia de procesamiento. Así, de manera independiente, un profesional de la práctica, investigador, instructor o estudiante puede estudiarlo, verificarlo, reproducirlo y modificarlo. En este trabajo documentamos y adaptamos la reproducibilidad en representación sísmica para contribuir a generar conciencia académica y profesional acerca de sus beneficios, así como para favorecer la asimilación de los programas de código abierto en esta área. Presentamos ejemplos de enfatización de imágenes sísmicas, de interés académico e industrial usando datos sísmicos mexicanos. Comprobamos que es posible asimilar, adaptar y transferir tecnología de interés en la industria petrolera a bajo costo, empleando programas de código abierto y siguiendo un esquema de cómputo reproducible.

Abstract

Within the field of exploration seismology, there is interest at national level of integrating reproducibility in applied, educational and research activities related to seismic processing and imaging. This reproducibility implies the description and organization of the elements involved in numerical experiments. Thus, a researcher, teacher or student can study, verify, repeat, and modify them independently. In this work, we document and adapt reproducibility in seismic processing and imaging to spread this concept and its benefits, and to encourage the use of open source

Descriptores

- reproducibilidad
- sismología de exploración
- representación sísmica
- representación enfatizada
- código abierto

Keywords

- reproducibility
- exploration seismology
- seismic imaging
- enhanced imaging
- open source

software in this area within our academic and professional environment. We present an enhanced seismic imaging example, of interest in both academic and professional environments, using Mexican seismic data. As a result of this research, we prove that it is possible to assimilate, adapt and transfer technology at low cost, using open source software and following a reproducible research scheme.

Introducción

La reproducibilidad es un principio del proceso de investigación científica e implica la descripción detallada de los experimentos para que, de manera independiente, un investigador, profesional, instructor o estudiante pueda repetirlos y comprobarlos.

En años recientes, los experimentos numéricos han alcanzado tal grado de complejidad que las descripciones escritas no bastan para que sean plenamente reproducibles. Por ello, autores como Fomel y Claerbout (2009), Donoho *et al.* (2009), LeVeque (2009) y Stodden (2008, 2009) coinciden en que la transferencia efectiva del conocimiento en las áreas que involucran cómputo se logra al hacer disponible el programa de cómputo o paquetería en conjunto con las instrucciones y datos necesarias para obtener los resultados. Por lo tanto, para garantizar la reproducibilidad computacional es recomendable proporcionar y documentar los siguientes elementos:

- a) El artículo o informe técnico,
- b) El programa de cómputo o paquetería de trabajo,
- c) El experimento numérico o flujo de trabajo, incluyendo los códigos y la secuencia de instrucciones para generar los resultados,
- d) Los datos empleados y
- e) Los resultados del experimento, como figuras y datos.

De ese modo, el usuario de una paquetería de cómputo reproducible puede realizar tres actividades importantes: estudiar y verificar los programas, reproducir los resultados y modificar los programas y/o parámetros originales.

La reproducibilidad representa beneficios académicos, técnicos y económicos por que:

1. Disminuye la dependencia de licencias de programas comerciales para llevar a cabo investigación.
2. Posibilita la adaptación, el desarrollo y transferencia de tecnología y
3. Auxilia la administración y transmisión eficiente del conocimiento.

Acceso abierto a la información

Los recientes avances en las tecnologías de información y comunicación como Internet, han dado lugar al surgimiento de políticas de acceso abierto a la información, encaminadas a la difusión adecuada y actualizada de publicaciones científicas. Al tener acceso abierto a las publicaciones, el lector puede usarlas, distribuirlas y mostrarlas de manera libre, bajo la condición de citarlas adecuadamente. Algunos proyectos que atienden la necesidad de difusión de la información son: *Public knowledge project* (disponible en: <http://pkp.sfu.ca/>), en Iberoamérica *Latindex* (disponible en: <http://www.latindex.unam.mx>) y *Scientific electronic library online* (disponible en: <http://www.scielo.org>).

En el contexto del acceso abierto a la información, la reproducibilidad tiene un papel importante. Su práctica comienza a volverse común, al grado de convertirse en un estándar para las publicaciones en universidades en el extranjero como la Universidad de Stanford (California, EUA), la Escuela de Minas de Colorado (Colorado, EUA) o la Universidad de Texas en Austin (Texas, EUA), por mencionar algunas, e incluso en publicaciones científicas como la revista *Geophysics*, una de las publicaciones más importantes en geofísica aplicada. Sin embargo, en nuestro país la reproducibilidad en sismología de exploración, a nivel académico e industrial, no ha sido suficientemente explorada.

A continuación, veremos que está a nuestro alcance gracias a la disponibilidad de programas de código abierto, especialmente diseñados para la investigación reproducible.

Importancia del código abierto en representación sísmica

Un esquema propicio para la reproducibilidad es el código abierto (*open source* en inglés). Este término se aplica a aquellos programas a cuyo código fuente se tiene acceso, gracias a su distribución de carácter libre, permitiéndole al usuario trabajar con los programas y modificarlos a su gusto, siempre y cuando se apegue a condiciones tales como: no revenderlos directamente o intentar impedir el acceso a los mismos.

La existencia de programas de código abierto representa un gran apoyo en investigación y docencia. Al investigador le permiten llevar a cabo su trabajo sin la necesidad de comprar licencias de paquetes comerciales de altos precios. Asimismo, el beneficio se extiende a profesores y estudiantes, quienes así pueden contar con la posibilidad de trabajar con herramientas a las que no podrían tener acceso de otra manera.

En sismología de exploración, el procesamiento de datos experimenta innovaciones constantes a nivel académico e industrial e implican un alto grado de complejidad computacional. A escala industrial, dichas innovaciones suelen desarrollarse con miras a crear programas comerciales o mejorar los sistemas internos de las mismas compañías petroleras y de servicios; por razones de confidencialidad no se tiene acceso a sus códigos. Por lo tanto, una estrategia económica para evitar el rezago tecnológico y la dependencia de programas comerciales en materia de educación, investigación, transferencia tecnológica e innovación, es aprovechar el potencial de las herramientas de código abierto y de tipo académico.

El panorama de los programas de código abierto en representación sísmica resulta prometedor en cuanto a su uso y con ello también el de la reproducibilidad. El esfuerzo realizado por parte de investigadores en universidades extranjeras y empresas se manifiesta hoy en día como un conjunto de paqueterías de cómputo reproducible, disponibles de manera gratuita para la comunidad. Lo anterior ha dado lugar a la realización continua de foros para la difusión y discusión del tema, por ejemplo: el taller “*Open Source Exploration and Production Software*”, en el marco de la 68ª Reunión de la Sociedad Europea de Geocientíficos e Ingenieros, realizada en 2006 (disponible en: <http://www.eage.org/files/viennaworkshop2.pdf>) o la publicación de artículos de difusión sobre la importancia del código abierto en Ciencias de la Tierra (Hall, 2010) y tesis académicas (e.g., González, 2010).

Un número importante de dichas paqueterías se distribuyen con licencias que permiten su uso gratuito para fines académicos y comerciales, y se pueden ejecutar en una computadora personal convencional con el sistema operativo adecuado (generalmente *Unix* o *Linux*). En el apéndice 1 se presenta en una tabla resumen, algunas paqueterías que cumplen con dicha característica y que satisfacen la mayoría de las necesidades de investigación en el procesamiento y representación de datos sísmicos. Estos programas de código abierto, a diferencia de sus equivalentes comerciales, aún tienen limitaciones, por ejemplo, el manejo espacial de los datos sísmicos (coordenadas geográficas de los datos) o la falta de interfaces

gráficas que faciliten su uso. No obstante, las comunidades que los desarrollan trabajan actualmente en esas tareas y tienen como meta alcanzar la funcionalidad de los programas comerciales.

La gratuidad de las paqueterías del apéndice 1 resulta muy importante, en términos económicos para las instituciones nacionales de educación superior e investigación, como el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP), puesto que las licencias de los programas de procesamiento y representación sísmica están cotizadas hasta en decenas de miles de dólares y suelen estar limitadas a un número reducido de equipos de cómputo.

Documentos reproducibles en representación sísmica

Paqueterías como *SEPlib* y *Madagascar* (descrito más adelante) están encaminadas a la publicación de documentos reproducibles. Este tipo de documentos, disponibles en su mayoría en formato electrónico a través de Internet, tienen la característica de integrar los resultados vinculados a las secuencias de instrucciones (*script*) con las que se generaron. Además, las secuencias de instrucciones cuentan con vínculos a los códigos fuente de los programas empleados. Por lo tanto, el uso de este tipo de documentos permite una mejor comprensión y asimilación del cómputo requerido para generar los resultados.

En el apéndice 2 presentamos bibliografía fundamental de procesamiento y representación de datos sísmicos con la particularidad de ser reproducible. Esta bibliografía es de gran utilidad para quien desea incursionar de manera teórica y práctica en esta materia y los estudiantes de geociencias lo encontrarán particularmente valioso.

En el apéndice 3 presentamos una selección de documentos reproducibles como informes de consorcios académicos, tesis, artículos de investigación y datos públicos. Estos materiales incluyen algunos de los avances más relevantes en materia de procesamiento y representación de datos sísmicos y su disponibilidad permite acortar la brecha entre la teoría y la práctica. Para familiarizarse con el concepto de reproducibilidad le sugerimos al lector consultar la sección en línea de documentos reproducibles de la paquetería *Madagascar* [http://www.reproducibility.org/wiki/Reproducible_Documents].

Desarrollo

En la práctica petrolera mexicana resulta de gran importancia el post-procesamiento de datos sísmicos, par-

ticularmente la enfatización de imágenes sísmicas para mejorar su interpretación. Los datos sísmicos convencionales tienen resolución vertical limitada a decenas de metros (el criterio convencional de límite de resolución vertical es un cuarto de la longitud de onda sísmica) por lo que la identificación de rasgos geológicos de espesores menores al límite de resolución vertical es difícil.

Actualmente existe interés en incrementar la resolución sísmica vertical para mejorar la definición de las características geométricas de los yacimientos de hidrocarburos. La resolución sísmica depende del ancho de banda de la señal sísmica, por lo que un incremento de frecuencia, consistente con la geología, puede resultar en un incremento de resolución útil. Si el incremento de frecuencia no es consistente con la geología es posible que aparezcan artefactos numéricos.

Mostraremos el uso de la paquetería de código abierto *Madagascar* para probar dos operadores matemáticos de incremento de frecuencia de la señal sísmica y analizar los resultados.

El primer operador es el negativo de la segunda derivada de los datos; el segundo es un multiplicador de fase instantánea.

Nuestro equipo de trabajo fue una computadora personal, convencional, con sistema operativo *Linux*. El volumen de datos sísmicos que empleamos en nuestros ejemplos fueron proporcionados por PEMEX (Agua Fría-Coapechaca-Tajín, en Chicontepec) y tiene formato SEG-Y, el estándar de la industria sísmica.

Madagascar

Madagascar es una paquetería que integra elementos de sus precursores *SEPlib* y *Seismic Unix* (apéndice 1) empleando esquemas de cómputo moderno. La paquetería consta de tres niveles:

- 1) *Programas de procesamiento*. Más de 750 programas desarrollados principalmente en lenguaje C (también en C++, Fortran, Python, etc.) que actúan como filtros sobre los datos y pueden encadenarse mediante "pipes" de Unix. La lista de programas según el tipo de tareas de procesamiento y representación sísmica (modelado, migración, tomografía e inversión) se encuentra en: [http://www.reproducibility.org/wiki/Seismic_task-centric_program_list]. La clasificación de los programas de acuerdo al tipo de tareas está en: [http://www.reproducibility.org/wiki/Task-centric_program_list]. La documentación y los códigos fuente están en: [<http://www.reproducibility.org/RSF/>]

- 2) *Flujos de procesamiento SConstruct* o *scripts*. Escritos en lenguaje de programación *Python* y ejecutados mediante el programa *SCons*. Pueden ser verificados, intercambiados y modificados por los usuarios. Los códigos *SConstruct* están compuestos con las instrucciones

Flow- Flujo de procesamiento. Estructura: *Flow* ('Archivo de salida', 'Archivo de entrada', 'Programas y parámetros de procesamiento').

Plot- Gráficas intermedias. Estructura: *Plot*('Gráfica de salida', 'Archivo de entrada', 'Programas y parámetros de graficación').

Result- Gráficas finales, compuestas de gráficas intermedias. Estructura: *Result*('Gráfica final', 'Gráficas de entrada', 'Parámetros de graficación').

- 3) *Documentos reproducibles*. Conjunto de libros y artículos técnicos. La lista está en: [http://www.reproducibility.org/wiki/Reproducible_Documents].

El formato interno de datos sísmicos de *Madagascar* se denomina RSF (regularmente muestreado, por sus siglas en inglés) y es compatible con el formato SEG-Y. La lectura del volumen de datos sísmicos y cambio de formato SEG-Y a formato RSF se hace con la instrucción *Flow* de la línea 12 y 13 del flujo *SConstruct* que presentamos en el apéndice 4. La manipulación del volumen de los datos, así como la selección de una sección vertical del volumen está indicada en las líneas 15 a 19 del flujo *SConstruct*.

Negativo de la segunda derivada

Calcular el negativo de la segunda derivada de los datos sísmicos incrementa la frecuencia y en ciertos casos mejora la continuidad y definición de los reflectores sísmicos. El fundamento es que el operador de derivada en el dominio de la frecuencia implica la multiplicación de la Transformada de Fourier por el producto del número imaginario i y la frecuencia ($i\omega$). Por lo tanto, la segunda derivada es igual a multiplicar por $(i\omega)^2 = -\omega^2$; como la polaridad se invierte, se debe multiplicar por -1 para obtener la polaridad original. El resultado de esta operación en datos sísmicos, en el dominio de las frecuencias, es un corrimiento del espectro hacia las altas frecuencias. De modo similar, el operador de cuarta derivada (que implica la multiplicación de la Transformada de Fourier por $(i\omega)^4 = \omega^4$, permite obtener un mayor corrimiento hacia altas frecuencias. En ambos casos hay un incremento en el ruido, sin embargo, el resultado final es interpretable.

El operador del negativo de la segunda derivada está incluido en paquetes comerciales de procesamiento de datos sísmicos. Implementamos el flujo de procesamiento en *Madagascar* para obtener resultados equivalentes. La figura 1 presenta el resultado de aplicar los operadores de negativo de la segunda y cuarta derivadas, seguidos por un control automático de ganancia para una línea longitudinal del volumen de datos sísmicos.

El resultado de la segunda derivada es satisfactorio si se compara la continuidad y definición de los reflectores sísmicos con los datos originales, como se aprecia en los reflectores de la zona de 1.5 s; el resultado de la cuarta derivada también presenta mejor continuidad y defini-

ción, pero presenta un incremento de ruido más notorio. El código para obtener los resultados lo presentamos en el apéndice 4, en las líneas 21 a 33.

La figura 2 muestra la comparación de los espectros de amplitudes, normalizados, de las secciones antes y después de obtener el negativo de la segunda derivada y la cuarta derivada. Como resultado de la aplicación de los operadores hay un corrimiento del espectro hacia las altas frecuencias. Este corrimiento es un producto matemático y aunque los resultados pueden ser interpretables, la consistencia con la geología resulta cuestionable. Presentamos el código para la obtención de los espectros de amplitud en el apéndice 4, en las líneas 35 a 43.

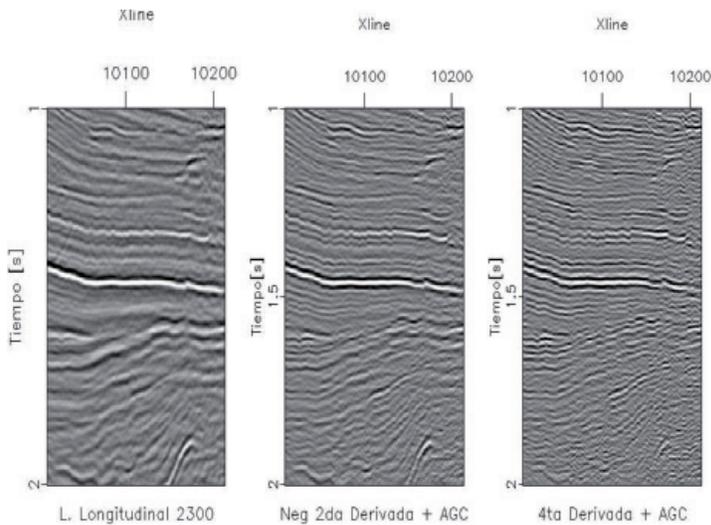


Figura 1. Izquierda: sección original. Centro: negativo de la segunda derivada; es notable la mayor definición y continuidad de los eventos. Derecha: cuarta derivada; también hay incremento en la resolución, pero el ruido aumenta. La distancia entre trazas sísmicas es de 25 m

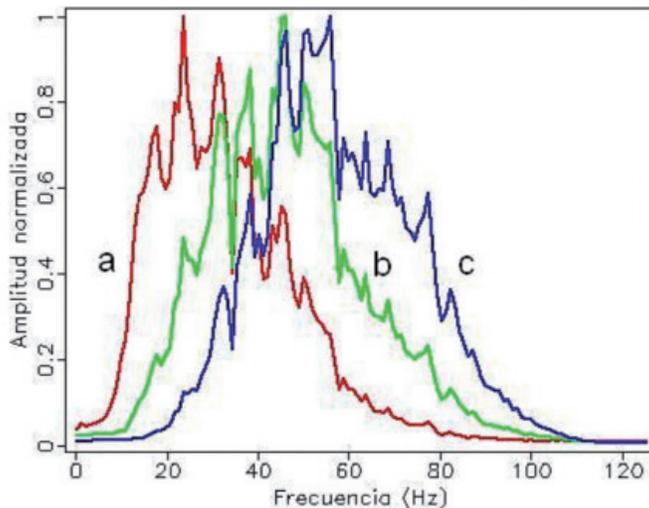


Figura 2. Espectros de amplitud, promediados y normalizados, antes (a) y después de obtener el negativo de la segunda derivada (b) y cuarta derivada (c). Nótese el corrimiento de las frecuencias dominantes hacia las altas frecuencias después de aplicar los operadores

Multiplicador de fase instantánea N

Recientemente, Stark (2009) propuso un algoritmo para incrementar el número de cimas y valles en una traza sísmica. Los resultados son interpretables y pueden enfatizar información geológica, como fallas y pliegues. El algoritmo consiste en incorporar un multiplicador N, o acelerador de la fase instantánea en la ecuación que convierte la amplitud y fase instantánea en una traza sísmica (ec. 1), y se expresa como en la ec. (2):

$$x(t) = A(t) \cos(\Theta(t)), \quad (1)$$

$$x_N(t) = A(t) \cos(N \Theta(t)), \quad (2)$$

donde:

$x_N(t)$ es la traza sísmica modificada,

$A(t)$ es la amplitud instantánea,

$\Theta(t)$ es la fase instantánea y

N es el multiplicador o factor de aceleración del giro de la fase instantánea.

Si $N=1$, entonces la traza generada corresponde a la traza original, *i.e.*, $x(t) = x_N(t)$. Si $N=2$, la frecuencia se duplica y el número de crestas y valles se incrementa el doble; si $N=3$ se incrementa en tres, y así sucesivamente.

La figura 3 presenta los resultados para $N=2$ y $N=3$ en la sección vertical del volumen sísmico que utilizamos anteriormente. Los resultados para $N=2$ son aparentemente satisfactorios en términos de definición y de continuidad de eventos. No obstante, hay aparición de reflectores sísmicos espurios que no corresponden necesariamente a la geología del subsuelo. Estructuras

como pliegues y discontinuidades pueden hacerse más notorios con este operador. El caso $N=3$ introduce más reflectores espurios y degrada la imagen. El código para obtener los resultados lo presentamos en el apéndice 4, en las líneas 45 a 76.

La figura 4 muestra espectros de amplitudes, normalizados, correspondientes a las secciones de la figura 3 después de aplicar los operadores. Hay un corrimiento del espectro hacia las altas frecuencias, pero dicho incremento no se apega al sentido físico de los datos sísmicos. Presentamos el código correspondiente en el apéndice 4, en las líneas 79 a 84.

Discusión

Los resultados presentados ejemplifican la posibilidad de asimilar y adaptar tecnología de interés en la industria petrolera, en un contexto académico o industrial, a bajo costo, empleando paqueterías de cómputo reproducible instaladas en una computadora personal convencional con un sistema operativo tipo *Linux*.

Adaptamos una propuesta para enfatizar la imagen sísmica basada en el incremento de frecuencia de la señal sísmica, obteniendo el negativo de la segunda derivada de los datos sísmicos. Los resultados son satisfactorios en términos de definición y continuidad de los reflectores sísmicos. Debido a la naturaleza matemática del operador los resultados son limitados y no son necesariamente consistentes con la geología.

Adaptamos una propuesta reciente para el incremento de resolución vertical basado en un multiplicador N de fase instantánea. Los resultados para incrementos únicos (*e.g.*, $N=2$) mejoran la continuidad de los eventos y destacan rasgos geológicos como fallas y plie-

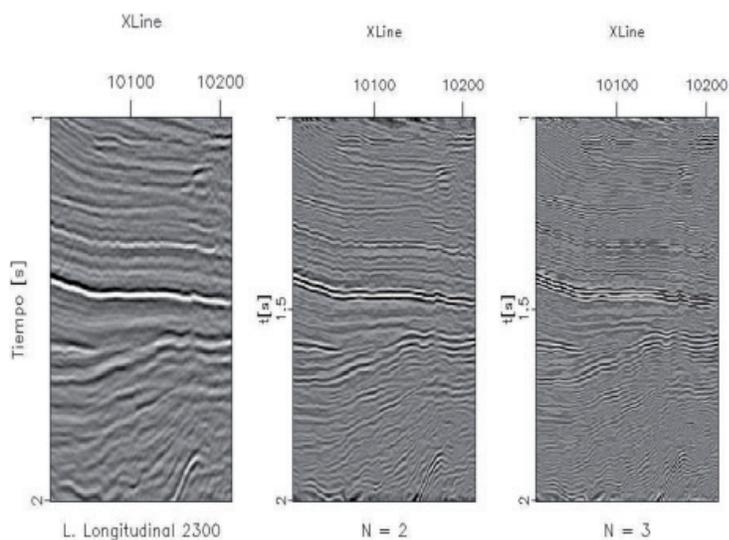


Figura 3. Derecha: sección original. Centro: incremento de resolución vertical con $N=2$; se enfatizan pliegues y discontinuidades. Derecha: incremento de resolución vertical con $N=3$; este operador introduce artefactos numéricos. La distancia entre trazas es de 25 m

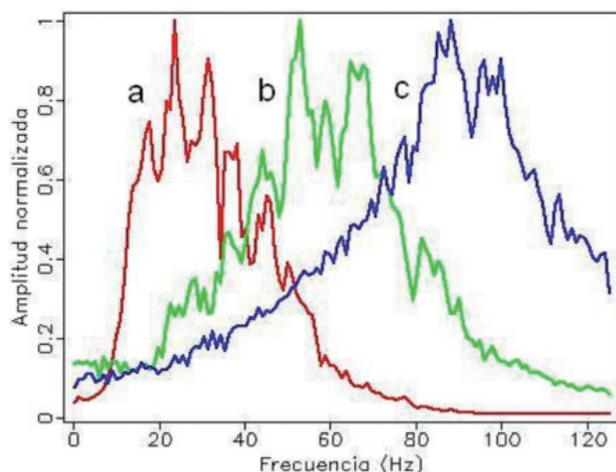


Figura 4. Espectros de amplitud antes (a) y después de aplicar el operador de incremento con $N=2$ (b) y $N=3$ (c). Nótese el corrimiento de las frecuencias dominantes hacia las altas frecuencias después de aplicar el operador

gues; debe tomarse en cuenta que este método genera artefactos numéricos. Los resultados para $N=3$ introducen muchos reflectores sísmicos espurios. Una explicación es que el incremento en la frecuencia provoca submuestreo de las señales con frecuencia mayor a la frecuencia de Nyquist dividida entre el valor N . Con este ejemplo mostramos que aunque es sencillo obtener un incremento de frecuencia, se debe tener cautela con los operadores utilizados para ello, pues no se apegan necesariamente al sentido físico de los datos.

Los flujos de trabajo o secuencias de instrucciones con formato reproducible (*e.g.*, el apéndice 4) pueden adaptarse, con relativa sencillez, a datos nuevos.

Dichos flujos facilitan la detección de errores durante las implementaciones con nuevos datos. Además, por su estructura facilitan la comprensión de la relación entre los programas a ejecutar y los archivos de entrada y salida.

Conclusiones

1. La reproducibilidad es de gran utilidad en la docencia, investigación, capacitación de profesionales e incluso en la práctica profesional. Representa beneficios académicos, técnicos y económicos como:
 - a) disminuir la dependencia de licencias de programas comerciales para llevar a cabo investigación,
 - b) posibilitar la adaptación, el desarrollo y transferencia de tecnología y

- c) auxiliar la administración y transmisión eficiente del conocimiento.

2. Puede advertirse que la publicación con formato reproducible cobrará mayor importancia en el futuro. Por ese motivo, consideramos que la investigación en representación sísmica, en el ámbito nacional, debe atender dicha tendencia para hacer eficiente la administración y divulgación del conocimiento.
3. La existencia de programas de código abierto representa un gran apoyo, tanto en la investigación como en la docencia. Al investigador le permiten llevar a cabo su trabajo sin la necesidad de comprar licencias de paquetes comerciales. A los profesores y estudiantes, les permite trabajar con herramientas a las que no podrían tener acceso de otra manera. Dada la diversidad de programas de código abierto, consideramos que existen herramientas que ayudan a resolver algunos de los problemas básicos de representación sísmica y de interés actual.
4. Como prueba de lo anterior, efectuamos actividades realizadas en la industria de la exploración sísmica en una computadora personal convencional a la que le instalamos una paquetería de código abierto de procesamiento de datos sísmicos y desarrollamos flujos de trabajo para enfatizar imágenes sísmicas.
5. Los documentos reproducibles fueron un apoyo fundamental para la aplicación de las herramientas que empleamos y nos permitieron desarrollar las actividades que presentamos.
6. Comprobamos que es posible asimilar, adaptar, desarrollar y transferir tecnología de interés en la industria petrolera a bajo costo, empleando paqueterías de código abierto y siguiendo un esquema de cómputo reproducible.

Agradecimientos

A Marco Vázquez García, Gerente de Estudios Geofísicos de PEMEX Exploración y Producción, por proporcionar financiamiento, datos sísmicos y permiso para publicarlos. A Liliana Vargas Meleza, del Instituto Mexicano del Petróleo, cuyas observaciones y revisión fueron un gran apoyo y a Cinna Lomnitz, del Instituto de Geofísica de la UNAM, por sus comentarios en torno al acceso abierto a la información.

Apéndice 1. Programas de código abierto que satisfacen las necesidades de investigación básicas en el procesamiento de datos sísmicos y representación sísmica

Nombre (Año de aparición)	Descripción y características especiales	Escrito/ mantenido por	Licencia ¹	SO ²	Sitio en Internet
Madagascar (2006)	Paquetería para investigación reproducible. Cuenta con una amplia biblioteca de documentos reproducibles actualizados (SEP, CSM, U. de Texas, entre otros) y libros de Jon Claerbout. Incorpora técnicas computacionales modernas. Formato de datos: volúmenes de datos binarios con encabezados ASCII. Compatible con formato SEG-Y, SEPlib y SU.	Sergey Fomel (U. de Texas, EUA) y Paul Sava (Escuela de Minas de Colorado, EUA)	GPL	U / L/ M / C	http://www.reproducibility.org
DDS (2003)	Versión limitada del sistema utilizado por BP. Formato de datos: volúmenes de datos binarios con encabezados ASCII. Compatible con formato SEG-Y, SEPlib y SU.	Randall Selzler (BP)	GPL	U / L	http://www.freeusp.org/DDS
CPSeis (2002)	Sistema de procesamiento de ConocoPhillips. Tiene interfaz guiada por el usuario.	ConocoPhillips	GPL	U / L	http://cpseis.org
Seismic Unix (1992)	Utilizado ampliamente en la academia e industria. Formato de datos: trazas con datos binarios y encabezados ASCII. Compatible con formato SEG-Y.	John Stockwell (Escuela de Minas de Colorado [CSM, por sus siglas en inglés], EUA)	BSD	U / L/ C	http://timna.mines.edu/cwpcodes
SEPlib (1991)	Primera paquetería para elaboración y uso de documentos reproducibles. Permite leer documentos reproducibles del SEP (1989 - 2009; documentos previos a 2002 son de acceso público) y libros de Jon Claerbout. Formato de datos: volúmenes de datos binarios con encabezados ASCII. Compatible con formato SEG-Y.	SEP (U. de Stanford, CA, EUA) / Robert Clapp (U. de Stanford)	"SEPLIB se puede usar o modificar para uso propio; no se puede distribuir, ni sus modificaciones, con fines comerciales, sin previo consentimiento escrito de la Universidad de Stanford".	U / L/ M / C	http://sepwww.stanford.edu/doku.php?id=sep:software:seplib

1 GPL= General Public License; BSD=Berkeley Software Distribution. Los términos de las licencias pueden consultarse en: <http://www.opensource.org/licenses/alphabetical>

2 SO= Sistema Operativo; U= UNIX; L= Linux; M= Mac OS-X; C= Cygwin; W= Windows.

Apéndice 2. Bibliografía reproducible sobre sismología de exploración

Autor (año)	Título	Paquetería	Sitio o editorial
Schuster, G. (2009)	Seismic interferometry	Matlab	Cambridge University Press
Claerbout, J. (2008)	Image estimation by example	SEPLib / Madagascar	http://sepwww.stanford.edu/sep/prof/index.html
Forel D., Benz T. y Pennington W. (2005)	Seismic data processing with Seismic Un*x	Seismic Unix	Soc. Exp. Geophys, Tulsa, OK, EUA
Margrave G.F. (2003)	Numerical methods of exploration seismology with algorithms in Matlab	Matlab	http://www.crewes.org/ResearchLinks/FreeSoftware/EduSoftware/NumMeth.pdf
Claerbout J. (2000)	Basic earth imaging	SEPLib / Madagascar	http://sepwww.stanford.edu/sep/prof/index.html
Claerbout J. (1992)	Earth sounding analysis: processing vs inversion	SEPLib	http://sepwww.stanford.edu/sep/prof/index.html
Claerbout J. (1985)	Imaging the earth's interior	SEPLib	http://sepwww.stanford.edu/sep/prof/index.html

Apéndice 3. Documentos reproducibles y datos disponibles en línea

Tipo	Institución / autor	Descripción	Paquetería	Sitio
Informes	SEP, U. de Stanford, (CA, EUA), varios autores.	Informes semestrales (1989-2009; sólo son de acceso libre de 1989 a 2002)	SEPlib	http://sepwww.stanford.edu/doku.php?id=sep:research:reports
Tesis	SEP, U. de Stanford, (CA, EUA), varios autores.	Tesis doctorales (1979-2009). De 1992 en adelante incluyen el código de los programas.	SEPlib	http://sepwww.stanford.edu/doku.php?id=sep:research:theses
Artículos	CWP, CSM, (CO, EUA), varios autores.	Artículos recientes	Madagascar	http://www.reproducibility.org/wiki/Reproducible_Documents
Artículos	U. Texas, (TX, EUA), varios autores	Artículos recientes	Madagascar	http://www.reproducibility.org/wiki/Reproducible_Documents
Artículos	Seismic Lab for Imaging and Modeling (SLIM), (C.B, Canadá), varios autores	Artículos recientes	Madagascar	http://www.reproducibility.org/wiki/Reproducible_Documents
Artículos	SEP, U. de Stanford, (CA, EUA), varios autores.	Artículos recientes	Madagascar	http://www.reproducibility.org/wiki/Reproducible_Documents
Datos	Varios	Modelos de velocidad	Madagascar	http://www.reproducibility.org/wiki/Reproducible_Documents
Datos	Varios	Registros de campo del libro Seismic Data Analysis de Oz Yilmaz	SU	http://www.cwp.mines.edu/cwpcodes/data/oz.original/
Datos	SEG/Varios	Datos 2D	Archivos con formato SEG-Y	http://software.seg.org/

Apéndice 4. Flujo de procesamiento SConstruct

```

1  from rsfproj import *
2
3  #*****CAMBIO DE FORMATO SEG Y A RSF*****
4
5  #Informacion del volumen sismico original Agua Fria-Coapechaca-Tajin
6  #Rango XLine          Rango InLine          Tiempo
7  #10010 - 10213      1965 - 2482
8  #      nx=204          ni=518              nt=1252
9  #      dx=1            di=1                dt=0.004s
10
11 #CAMBIO DE FORMATO SEG Y a RSF
12 Flow('sismica_original','sergio_sub.segy','''segread tfile=tfile1.rs
13                                     hfile=hfile1 bfile=bfile1 endian=y''')
14
15 #*****MANIPULACION DEL VOLUMEN*****
16
17 #SELECCION DE SUBVOLUMEN ORIGINAL
18 Flow('sub','sismica_original','''window min1=1 max1=2 |
19                                     put n2=204 o2=10010 n3=518 o3=1965''')
20
21 ***ENFATIZACION DE IMAGEN CON NEGATIVO DE SEGUNDA DERIVADA*
22
23 #Negativo de segunda derivada
24 Flow('neg2da','insub','deriv | deriv | scale dscale=-1')
25 Plot('neg2da','neg2da','''agc | grey title='Negativo 2da Derivada + AGC'
26                                     label1='Tiempo[s]' label2='Xline' scalebar=y''')
27
28 #Cuarta Derivada
29 Flow('4da','insub','deriv | deriv | deriv | deriv')
30 Plot('4da','4da','''agc | grey title='4ta Derivada + AGC'
31                                     label1='Tiempo[s]' label2='Xline' scalebar=y''')
32
33 Result('F1','insub neg2da 4da','SideBySideAniso')
34
35 #Espectros de Amplitud
36 Flow('espinsub','insub','spectra all=y | scale axis=1')
37 Flow('espneg2da','neg2da','spectra all=y | scale axis=1')
38 Flow('esp4da','4da','spectra all=y | scale axis=1')
39
40 Flow('espcompderiv','espinsub','cat espneg2da.rs
41                                     f esp4da.rs
42                                     f axis=2 ')
43
44 Result('F2','espcompderiv','''graph label1='Frecuencia (Hz)'
45                                     title='Espectros de Amplitud' plotfat=7 plotcol=5,3,6''')
46
47 #*****INCREMENTO DE FRECUENCIA CON MULTIPLICADOR DE FASE ****
48
49 #*****OBTENCION DE ATRIBUTOS SISMICOS INSTANTANEOS*****
50
51 #Cuadratura
52 Flow('hilb','insub','envelope hilb=y order=75')

```

```

51
52 #Envolvente de amplitud
53 Flow('amp',None,'''math x=insub.rsf y=hilb.rsf
54         output='sqrt(x^2 +y^2)' ''')
55
56 #Coseno de la fase instantanea
57 Flow('cos',None,'math x=insub.rsf a=amp.rsf output='x/a' | put o2=10010 ')
58
59 #Fase instantanea
60 Flow('fase',None,' math cos=cos.rsf output='acos(cos)' | put o2=10010 ')
61
62 #CASO N=2
63 Flow('insubN2',None,''' math amp=amp.rsf phi=fase.rsf
64         output='amp*cos(2*phi)' | put o2=10010''')
65 Plot('insubN2',insubN2,'''agc | grey
66         title='N = 2'
67         label2='XLine' label1='t[s]' scalebar=y ''')
68
69 #CASO N=3
70 Flow('insubN3',None,''' math amp=amp.rsf phi=fase.rsf
71         output='amp*cos(3*phi)' | put o2=10010''')
72 Plot('insubN3',insubN3,'''agc | grey
73         title='N = 3'
74         label2='XLine' label1='t[s]' scalebar=y ''')
75
76 Result('F3',insub insubN2 insubN3,'SideBySideAniso')
77
78
79 #Espectros de Amplitud N=2 y N=3
80 Flow('espinsubN2',insubN2,'spectra all=y | scale axis=1')
81 Flow('espinsubN3',insubN3,'spectra all=y | scale axis=1')
82 Result('F4',espinsub,'''cat espinsubN2.rsf espinsubN3.rsf axis=2 |
83         graph label1='Frecuencia (Hz)'
84         title='Espectros de Amplitud' plotfat=7 plotcol=5,3,6''')
85 End()

```

Nota: Los signos de número (#) son comentarios. La numeración se incluyó sólo para fines de referencia.

Referencias

- Donoho D.L., Maleki A., Morteza S., Ur-Rahman I., Stodden V. Reproducible Research in Computational Harmonic Analysis. *Computing in Science & Engineering*, 11(1):8-18, enero-febrero 2009.
- Fomel S. y Claerbout J. Reproducible Research. *Computing in Science & Engineering*, 11(1):5-7, enero-febrero 2009.
- González-Verdejo O. *Reproducibilidad en representación sísmica*. Tesis (licenciatura en ingeniería geofísica), México DF, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, Febrero de 2010, 71p.
- Hall M., The Future is Open for Business: Open Source Tools for the Geoscientist. *First Break*, 28(6):119-123, junio de 2010.
- LeVeque R.J. Python Tools for Reproducible Research on Hyperbolic Problems. *Computing in Science and Engineering*, 11(1):19-27, enero-febrero 2009.
- Stark T.J. Frequency Enhancement Via an Integer Multiplier or Just Another GeoWizardry Attribute?, en: Reunión anual de la Sociedad de Geofísicos de Exploración, (79^o, 2009, Houston, EEUU). Resumen disponible a través de la SEG en: <http://www.seg.org>
- Stodden V. The Legal Framework for Reproducible Scientific Research. *Computing in Science & Engineering*, 11(1):35-40, enero-febrero 2009.
- Stodden V. Enabling Reproducible Research: Open Licensing for Scientific Innovation [en línea]. Universidad de Stanford, California, EUA, 2008. [fecha de consulta marzo de 2010]. Disponible en: <http://www.stanford.edu/~vcs/papers/Licensing08292008.pdf>

Semblanza de los autores

Oziel González-Verdejo. Obtuvo el título de ingeniero geofísico en la Facultad de Ingeniería de la UNAM en 2010. Actualmente trabaja en la empresa de servicio EMGS. Su área de interés profesional es la sismología de exploración.

Sergio Chávez-Pérez. Obtuvo los títulos de ingeniero geofísico en 1984 por la Facultad de Ingeniería de la UNAM, el de maestro en ciencias (geofísica) en 1987 por la Universidad de Carolina del Sur, EUA y el de doctor en filosofía (geofísica) en 1997 por la Universidad de Nevada, Reno, EUA. Actualmente es investigador en el Instituto Mexicano del Petróleo y profesor de asignatura de la Facultad de Ingeniería de la UNAM. Sus áreas de interés profesional son: representación sísmica (migración, modelado, tomografía e inversión), procesamiento de datos sísmicos y transformación de campos de ondas, interpretación de datos sísmicos y propagación de ondas sísmicas.

Análisis de impacto causado por estructuras coherentes en sistemas de combustión de flujo giratorio

Analysis of the Impact Caused by Coherent Structures in Swirling Flow Combustion Systems

Valera-Medina A.

*Departamento de Turbomaquinaria
CIATEQ. AC, Centro de Tecnología Avanzada, Querétaro
Correo: agustin.valera@ciateq.mx*

Griffiths A.

*Cardiff University, School of Engineering, United Kingdom
Correo: griffithsaj2@cf.ac.uk*

Syred N.

*Cardiff University, School of Engineering, United Kingdom
Correo: syredN@cardiff.ac.uk*

Información del artículo: recibido: marzo de 2010, reevaluado: enero de 2011, aceptado: marzo de 2011

Resumen

Entre las tecnologías más utilizadas en la generación de energía y propulsión de aviones para la reducción de emisiones se utilizan los flujos giratorios, los cuales han demostrado durante varias décadas su alto desempeño al facilitar el anclaje de la llama en los sistemas de combustión. Esto, aunado al uso de reactivos premezclados en las antecámaras, proporciona uno de los métodos más innovadores para la reducción de partículas de alto efecto invernadero, como son los óxidos de nitrógeno. Sin embargo, el entendimiento de estos flujos es aún precario y se requiere mayor investigación sobre el tema para poder esclarecer conceptos tan complejos como el rol que tienen las estructuras coherentes dentro del sistema de combustión. El presente artículo explica diversos fenómenos ocasionados por algunas de las estructuras coherentes observadas en este tipo de sistemas. Los resultados mostraron la existencia de complejas Zonas de Recirculación (ZR), Centros de Vórtice Precesores (CVP) y la Ruptura de Vórtice Inducido por Combustión (RVIC).

Descriptores

- estructuras coherentes
- velocimetría
- zona de recirculación

Abstract

Amongst the technologies used in the energy and propulsion generation for the reduction of emissions, the use of swirling flows has demonstrated its high performance in anchoring the flame inside of the combustion systems. This, added to the use of premixing in the pre-chambers, has created one of the most innovative methods for the reduction of highly polluting particles such as NOx. However, the lack of understanding of these flows makes it necessary to increase the research on the topic in order to clarify themes as complex as the role of the coherent structures inside of the system. This paper explains some of the phenomena produced by some of the coherent structures observed in the system. The results showed the existence of complex Recirculation Zones (RZ), Precessing Vortex Core (PVC) and Combustion Induced Vortex Breakdown (CIVB).

Keywords

- coherent structures
- velocimetry
- recirculation zone

Introducción

Entre las más prometedoras tecnologías utilizadas para reducir el impacto y la producción de óxidos de nitrógeno (NOx) se encuentran: premezclar el combustible con el aire a condiciones pobres y la combustión estabilizada por medio de flujos giratorios. Sin embargo, el premezclado no suele ser perfecto, ya que usualmente el combustible y el aire se mezclan poco antes de ingresar en la cámara de combustión, lo cual lleva a un alto grado de falta de mezclado (Sadanandan *et al.*, 2008). Esto genera un proceso muy complejo de generación de inestabilidades termoacústicas, el cual se retroalimenta durante el proceso de reacción de la combustión (Lieuwen *et al.*, 2005), (Meier *et al.*, 2007). Por otro lado, el uso de flujos giratorios ha demostrado una gran estabilidad de llama al utilizar estructuras coherentes como la Zona Central de Recirculación (ZCR) y las Zonas Exteriores de Recirculación (ZER), las cuales crean un anclaje al recircular productos que entran en contacto con el flujo cortante proveniente del difusor, lo que a la vez incrementa el tiempo de residencia de las partículas activas junto con los productos de combustión, permitiendo el uso de bajas razones de equivalencia. Esto conlleva a obtener llamas de menor temperatura, lo que reduce las reacciones de Zeldovich y con ello, las emisiones de NOx térmicos (Syred *et al.*, 1974 y 2006), (Valera *et al.*, 2008a; Brundish *et al.*, 2007). Sin embargo, hay varios huecos en el entendimiento de este tipo de llamas.

Los flujos giratorios han sido estudiados exhaustivamente para numerosas aplicaciones en combustores y quemadores (Valera *et al.*, 2008b; Claypole *et al.*, 1981; Gupta *et al.*, 1984; Froud *et al.*, 1995) con especial énfasis en las características tridimensionales de su estructura y el modo en que la llama es sostenida establemente (Syred *et al.*, 1974 y 2006; Gupta *et al.*, 1984). Se ha demostrado que el nivel de giro al estar acoplado con el modo de inyección de combustible puede inducir la

aparición de inestabilidades dinámicas indeseables (Lieuwen *et al.*, 2005; Al-Abdeli *et al.*, 2007; Candel, 2000), las cuales pueden alcanzar valores iguales a los de la resonancia natural del sistema excitando, a su vez, oscilaciones de gran amplitud que pueden dañar el equipo con el fallo parcial o total del mismo (Lieuwen *et al.*, 2005; Al-Abdeli *et al.*, 2007; Huang *et al.*, 2005; Cala *et al.*, 2006).

A modo de reconocimiento, Sadanandan *et al.* (2008), presentan la zona interna de la región de recirculación como un lugar con ausencia de altos niveles de reacción. En contraste, la zona de corte de flujo presenta una zona de intensa combustión, aunado a varias estructuras que parecen disipar energía, contribuyendo con ello a la extensión de la llama en esta zona (un tema que aun está en debate). Utilizando una técnica conocida como Análisis de Fluorescencia Inducida con Láser (PLIF por sus siglas en inglés), se han descubierto zonas de reacción donde coexisten regiones de equilibrio químico. Esto ha revelado la existencia de nuevas estructuras, las cuales contribuyen al complejo mecanismo de flujo en el sistema de combustión (Valera *et al.*, 2008b) y que por su geometría son difíciles de simular numéricamente. Estas estructuras, usualmente vórtices con forma curvada compleja, han sido observadas, incluso, a manera de dipolos que raramente se han mencionado en la literatura (Cala *et al.*, 2006).

Otro problema relacionado con las inestabilidades del sistema de combustión, es el modo de inyección del combustible (Meier *et al.*, 2007; Brundish *et al.*, 2007; Paschereit, 2008). La inyección difusa (no premezclada, directamente inyectada a la llama) con gran cantidad de movimiento (momento) ha mostrado ser menos sensible a las variaciones de presión, que aquellas inyecciones cuyo momento es menor. Estas últimas producen mayores variaciones en las razones de equivalencia, debido a la asimetría del flujo, lo que a su vez, crea bolsas de gas, representando el primer paso en el ciclo de retroalimen-

tación de oscilaciones por el criterio de Rayleigh (Lieuwen *et al.*, 2005; Meier *et al.*, 2007). Para aminorar el efecto se puede reducir la cantidad de combustible inyectado difusamente. Sin embargo, el uso de una llama difusa, por ejemplo una llama piloto no se puede evitar, ya que se ha confirmado que la estabilidad del sistema, especialmente a pobres razones de equivalencia, se mantiene a través de mayores rangos de operación con este tipo de inyección (Valera *et al.*, 2009a).

Otro problema relacionado con inestabilidades en el sistema es el que se refiere al reflujo de llama, siendo un fenómeno observado tanto en sistemas con dispositivos de inyección difusa, como en los que utilizan premezclado axial/radial en precámaras de combustión. El reflujo de llama es definido como el punto donde la llama físicamente se propaga aguas arriba de la región donde debería estar anclada, lo que ocurre a través de los pasajes de premezclado que no están diseñados para resistir altas temperaturas. Esto sucede por varias causas (Subramanya *et al.*, 2007; Thornton *et al.*, 2007; Lefebvre, 1999):

1. Propagación de llama turbulenta.
2. Propagación a través de la capa límite.
3. Por inestabilidades de combustión.
4. Propagación de estructuras coherentes.

El reflujo de llama en las cámaras de combustión limita el rango de trabajo de las mismas, así como su confiabilidad bajo condiciones de altos niveles de giro. En lo que respecta a la propagación de estructuras coherentes, se ha identificado un fenómeno conocido como Ruptura de Vórtice Inducido por Combustión (RVIC), el cual aparenta ser el mecanismo principal de reflujo. Básicamente se trata de una extensión de la Zona Central de Recirculación dentro de los pasajes de premezclado (Kroner *et al.*, 2003; Kiesewetter *et al.*, 2007). La extinción de las reacciones químicas es uno de los procesos que gobiernan el mecanismo de reflujo, así como la posición del vórtice y las razones de equivalencia ligadas a la liberación de calor. Sin embargo, poco se sabe al respecto al utilizar combustibles alternativos, retardantes de llama o nuevas geometrías de sistemas de inyección.

Por estas y otras razones es que se requiere un mejor entendimiento sobre la compleja interacción entre las estructuras coherentes de estos sistemas y las inestabilidades en las que actúan. Este artículo está orientado al análisis de las estructuras coherentes dentro de los sistemas de flujos giratorios, y cómo estos interactúan entre sí. Se presentan una serie de resultados bajo condiciones isotérmicas y de combustión, así como me-

canismos de reducción de impacto para el incremento de la resistencia a reflujo de llama.

Diseño experimental

Para el experimento se utilizó un combustor de tipo tangencial, el cual es un modelo de un combustor de 2MW de potencia. Para el ingreso de aire se utilizaron dos entradas con área tangencial variable, lo que se realizó usando insertos de diferentes diámetros, lo que a su vez, permitió un cambio en el número de Giro Geométrico (S_g). Este valor está directamente relacionado con el número de Giro (S), que es función del momento angular y axial del flujo, así como del diámetro de salida del combustor. S_g se define como,

$$S_g = \frac{\pi * r_e * r_i}{A_e}$$

Donde r_e , r_i y A_e son el radio de salida, el radio efectivo a la mitad de la tubería de entrada y el área de entrada, respectivamente. La geometría del sistema se documenta en (Valera *et al.*, 2009b). El sistema fue alimentado por medio de un turbosoplador, proveyendo aire a través de dos mangueras flexibles con rotámetros independientes para el control del flujo. El rango de flujo tuvo una variación entre 5,700 y 61,000 Re (basado en el diámetro de salida, D). La nomenclatura utilizada para referenciar el modo de inyección del aire es por medio de las siglas CA-X-Y, donde CA evoca la Condición de entrada de Aire, "X" el inserto utilizado del lado derecho y "Y" el inserto utilizado del lado izquierdo.

Se usaron 3 tipos de insertos a la entrada, 0%, 25% y 50%, siendo 0% el caso en que no se utilizó inserto en la tubería de entrada. Para ejemplificar, CA-25-25 se referirá al caso en que se bloquearon ambas entradas con un inserto de 25% del área total de las tuberías. La figura 1 muestra el combustor tangencial, mientras la figura 2 muestra un esquema de la posición de cada componente.

Cuando se hizo el análisis utilizando combustible, el sistema fue alimentado por medio de 2 diferentes modos de inyección:

- a) Modo difuso a través del eje central del combustor, alimentando gas directamente a la llama, sin premezclar, desde la base del combustor y
- b) Modo premezclado con entrada del combustible a través de uno o ambos conductos de entrada, localizando la inyección de combustible aguas arriba de los insertos de bloqueo.

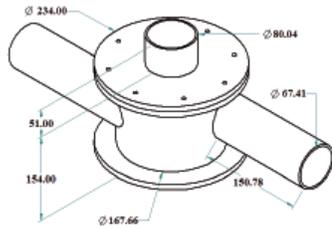


Figura 1. Geometría del combustor utilizado

Para la inyección de combustible, la nomenclatura a usarse será X-Y l/min, donde "X" representa la inyección difusa y "Y" la premezclada. El combustible utilizado fue gas natural británico. Se analizaron 3 modos de inyección difusa (figura 3).

- Inyector angosto, con un diámetro de 10 mm de boquilla, posicionado a 10 mm aguas arriba de la salida del combustor.
- Inyector ancho, con un diámetro de 23.4 mm de boquilla, posicionado a 47.5 mm aguas arriba de la salida del combustor.
- Inyector perforado, con 8 agujeros distribuidos alrededor del inyector, posicionado a 4.5 mm de la salida del combustor.

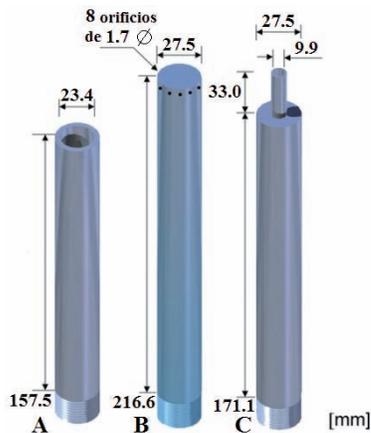


Figura 3. Inyectores utilizados: a) inyector ancho b) inyector perforado, c) inyector angosto

A modo de analizar el impacto del reflujo de llama, diferentes constricciones de tobera fueron utilizadas a la salida del combustor. Un caso considerado en el análisis es el que no tiene restricción, dos casos con restricción cuadrada con un diámetro interno de 0.8D y 0.9D, y finalmente uno angular y con salida de diámetro D (figura 4).

Para confinar el sistema se usaron diversas geometrías, las cuales se muestran en la figura 5. El primer confinamiento es de tipo cuadrado con área transversal

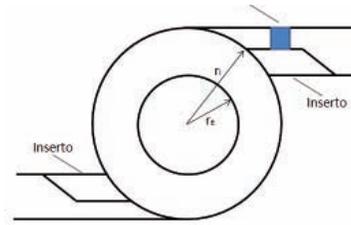


Figura 2. Esquema de la posición de componentes

de $2.00 \times 2.00 D^2$ (figura 5-A). La longitud total de los confinamientos fue de $2.50 D$, aún cuando sólo se midió hasta $1.67 D$. El segundo caso utilizó una salida piramidal de longitud $1.00 D$ y área transversal de $1.00 \times 1.00 D^2$ (figura 5-B). Finalmente, para el caso cuadrado se empleó una salida súbita con un orificio de $0.50 D$ (figura 5-C).

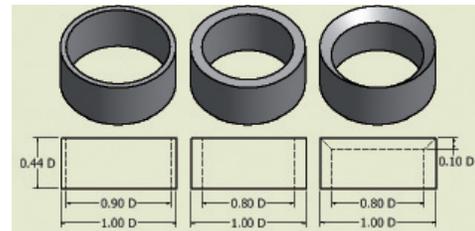


Figura 4. Constricciones de salida usadas

Varios confinamientos cilíndricos también fueron usados. El primero fue abierto con un diámetro de salida de $2.00 D$ (figura 5-D), seguido por uno cónico (figura 5-E) y uno de salida súbita con orificio de $0.5 D$ (figura 5-F), a modo de poder comparar los resultados entre las geometrías cuadradas y cilíndricas.

Para inicializar el sistema de medición se utilizaron señales eléctricas. El modo de adquisición de las señales varió con los experimentos realizados. Para el caso isotérmico se usó Anemometría de Hilo Caliente para grabar el paso de una región de alto momento ligada al Centro de Vórtice Precursor (CVP), señal que fue redireccionada a un transformador de Fourier que permitió el análisis de la señal y determinación de las armónicas del vórtice. El equipo usado fue un DISA 55M10 estándar con hilos calientes 55016 de DANTEC. La probeta fue colocada a $1.00D$ de la salida del combustor en una dirección ortogonal a la dirección tangencial del sistema. Un acondicionador de señal DISA 55D26 fue usado junto con un filtro de baja frecuencia para obtener valores por debajo de 125 Hz. Se usó también un osciloscopio Tektronic DS2024B de cuatro canales y velocidad de adquisición de 2Gmuestras/s.

La fluctuación de presiones bajo condiciones de combustión fue medida utilizando un micrófono EM-1 Yoga Electret, con una frecuencia de respuesta entre 20

Hz y 16 kHz, con una sensibilidad de 64 ± 3 dB. Se posicionó a 30 mm aguas arriba del orificio de salida del combustor. El uso de estos micrófonos para reconocimiento acústico del sistema ha sido bien documentado y avalado por trabajo de otros investigadores (Pascheireit *et al.*, 2008)

Visualización

La señal obtenida tanto por el sistema isotérmico como por el de combustión fue redireccionada a un sistema generador de pulso BNC 500, cuya señal TTL era enviada a un sistema de Velocimetría de Partículas (PIV por sus siglas en inglés) DANTEC. Este sistema consiste en un láser Litron tipo Nd:YAG de 532 nm a 5 Hz y una cámara Hi Sense MKII modelo C8484-52-05CP con 1.3 Megapíxeles de resolución a 8 bits. Con efecto de aumentar la resolución, una lente de 60 mm Nikon fue usada con una profundidad de campo de 1.5 mm. El sistema de medición se inicializó a 90% de los picos de voltaje más elevados después de 5 minutos de permitir al sistema correr libremente.

Se reconoce que este parámetro es arbitrario, pero su consistencia permitió obtener resultados repetibles, lo que a su vez, ayudó a realizar comparaciones cuantitativas entre todos los casos. El sistema se muestra en la figura 6.

Para los casos isotérmicos las partículas para seguimiento se inyectaron por medio de un nebulizador de agua, mientras que durante la combustión se usó óxido de aluminio Al_2O_3 , por medio de un sistema Vénturi posicionado a 2 metros aguas arriba de las entradas de aire del combustor.

Se visualizaron los planos axial y tangencial. Para los planos axiales el sistema era girado 11.25° para la obtención de todo el campo en tres dimensiones. En lo referente al plano tangencial, el muestreo se llevó a cabo cada $0.0407 D$. De los planos resultantes obtenidos bajo un proceso de promediación de 150 imágenes por plano se aisló la región de velocidad negativa (entre -3.0 y 0.0 m/s) para los planos axiales y la de baja velocidad (entre 0.0 y 0.3 m/s) para los planos tangenciales, regiones que luego fueron apiladas a través de un programa de Matlab para reconstruir las estructuras en tres dimensiones. La metodología se muestra en la figura 7.

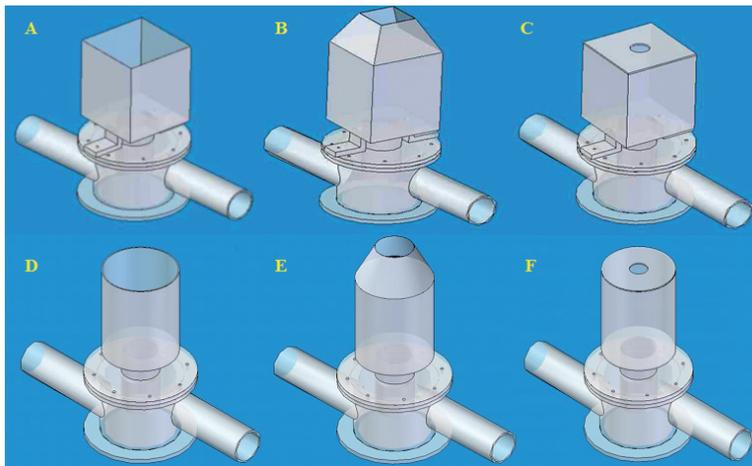


Figura 5. Geometrías usadas para el confinamiento del sistema

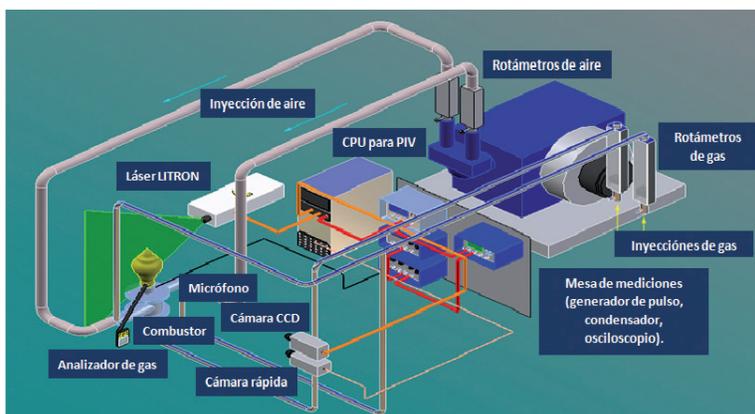


Figura 6. Sistema completo

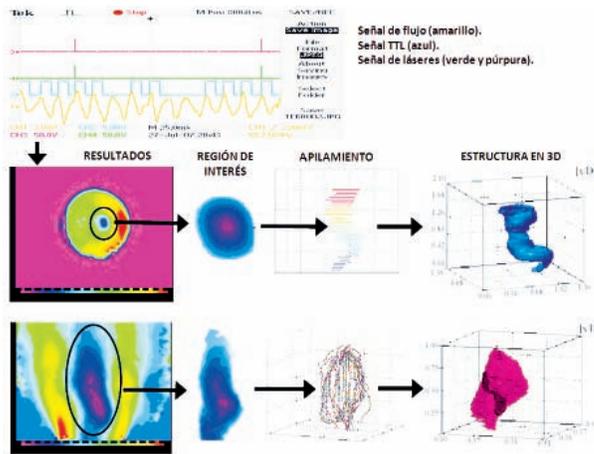


Figura 7. Metodología para la obtención de estructuras en el plano axial y tangencial, respectivamente

Otras estructuras se visualizaron durante la combustión por medio de una cámara de rápida exposición Fastcam modelo APX RS, operando a 4,000 fotos/s. Se usó una lente Nikon 1:2.8. Las imágenes fueron analizadas con el software PFV. Para el reconocimiento del plano tangencial se utilizó un espejo de acero inoxidable localizado a 0.5 m de la salida del combustor, rotándolo a 45.00° para la captura de imágenes en dicho plano, al mismo tiempo de hacer tomas en el eje axial del sistema.

Resultados y discusiones

Análisis de señal

La relación que existe entre las inestabilidades del sistema y el número de Reynolds mostró una independencia a altos Re , como varios autores han corroborado en estos sistemas de combustión (Syred *et al.*, 2006; Valera *et al.*, 2009b).

Además, al hacer un análisis de la precesión del sistema por medio del Anemómetro, se observó que las armónicas se mantenían en 55 Hz y sus múltiplos, tal y como se ha observado qué sucede con el CVP (Syred *et al.*, 2006). Esto aseguró la obtención de datos del fenómeno de interés.

Análisis isotérmico

El análisis axial reveló la existencia de una región de velocidad negativa que concuerda con la descripción de la Región Central de Recirculación mencionada por otros autores (Syred *et al.*, 2006; Claypole *et al.*, 1981; Gupta *et al.*, 1984; Froud, *et al.*, 1995). La figura 8 muestra una de estas zonas de recirculación obtenidas para un sistema sin confinamiento.

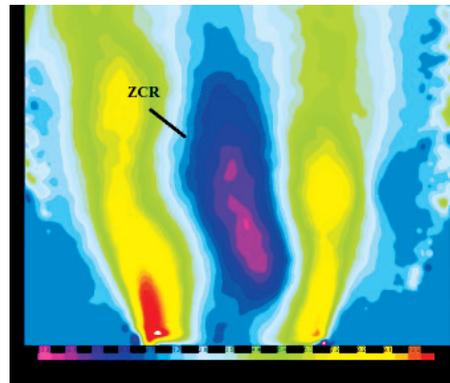


Figura 8. Plano a 45.00° . Zona central de recirculación. Escala en m/s

El análisis también se realizó en el plano tangencial, en el cual se observó con gran claridad la existencia del Centro de Vórtice Precursor, especificado por la región de baja velocidad adyacente a la región de Alto Momento que realiza el accionamiento del sistema láser (figura 9).

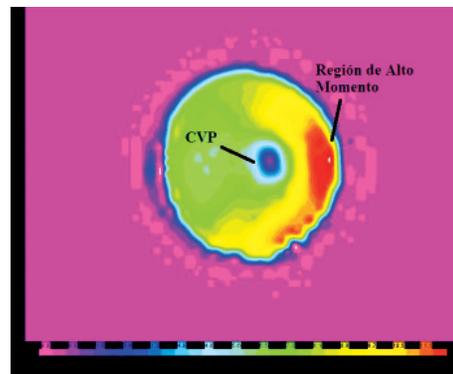


Figura 9. Plano a 0.00 D de la salida del combustor. Escala en m/s

Al realizar la tridimensionalización de las estructuras (figura 7) se obtuvieron 2 estructuras coherentes que actúan muy estrechamente la una con la otra (figura 10), con una compleja interacción. Como puede observarse, la zona inferior de la ZCR es muy estrecha mientras que el CVP presenta la mayor coherencia en la zona baja del campo de estudio, junto a la salida del combustor.

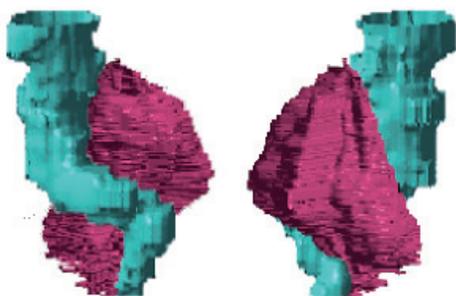


Figura 10. Flujo total. CVP y ZCR unidas

Sin embargo, conforme se alejan de la salida del combustor, la ZCR aumenta su fuerza expandiéndose en contra del flujo y del CVP. Finalmente, la ZCR se contrae mientras el CVP comienza a expandirse y a desaparecer. Esto se considera un fenómeno causado por la interacción que existe entre ambos cuerpos. Al crearse el CVP a causa del giro del flujo y el apilamiento de vórtices más pequeños, la ZCR se ve suprimida por el momento de la primera estructura.

Conforme se aleja de su origen, el CVP comienza a perder fuerza, sin desaparecer, esto debido al intercambio de momento y partículas provenientes de la ZCR. Sin embargo, al llegar a su extremo final, la ZCR se ve suprimida por las condiciones del sistema, el cual no

puede mantener la recirculación a tan lejana distancia de la salida, haciendo que la ZCR se encapsule y su contacto con el CVP desaparezca, lo que a su vez ocasiona la desintegración de esta estructura aguas abajo por falta de energía que la sostenga, esto por escasa interacción con la ZCR.

Al llevar a cabo el análisis para todas las geometrías mostradas en la figura 5, los resultados arrojaron conclusiones de que la geometría del sistema es fundamental para la forma e interacción de las estructuras coherentes. Cala *et al.* (2006) argumentan la existencia de más de 2 estructuras con la aparición de una segunda Zona Central de Recirculación, lo que corroboran con análisis numéricos. Al utilizar los diferentes confinamientos (figura 5) esta nueva zona fue visualizada, lo cual se atribuye a la reducción de decaimiento de la presión por el mismo confinamiento, reduciendo la expansión del flujo, y con ello, retrasando la caída de presión en el sistema. Esta estructura ZCR2, también se ve afectada por el incremento de presión del sistema al utilizar las geometrías con salidas súbitas, lo que produce una supresión casi total de esta nueva zona de recirculación para el caso cilíndrico (figura 11).

Por otro lado, el CVP también se ve afectado por este cambio en las condiciones de presión causadas por la geometría, ya que mientras mayor es el incremento de presión y menor su decaimiento la estructura comienza a tomar una forma menos helicoidal, lo que se traduce en un vórtice que deja de precesar para el caso cilíndrico de salida súbita (figura 11). A pesar de que en el sistema se vislumbra la existencia de varios remolinos adyacentes a este vórtice y que pudieran estar aumentando el mezclado de partículas (Froud *et al.*, 1995), la caída de presión que se tiene en el sistema probablemente no valga su implementación industrial. Sin em-

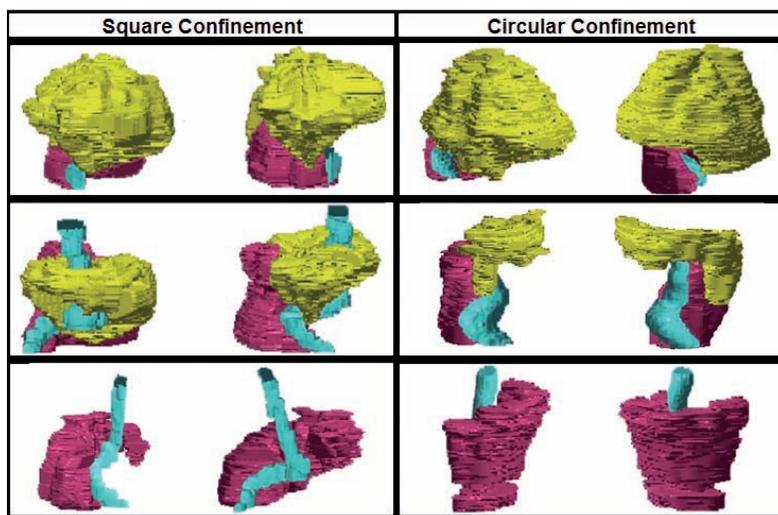


Figura 11. Resumen de estructuras bajo condiciones isotérmicas. CVP (azul), ZCR (púrpura) y ZCR2 (amarillo), CA-25-25.

bargo, se demuestra con estos resultados que tanto la ZCR como el CVP son estructuras manipulables por medio del cambio de geometría en el sistema.

Análisis con combustión. Inyectores

Cuando son utilizados combustibles líquidos, un atomizador es requerido para hacer la inyección del combustible al sistema. Usualmente éste se localiza en la parte central del combustor disparando el combustible con una forma cónica para su mejor dispersión y mezcla con el oxidante. La inyección se realiza de modo que el cono de gotas entre en contacto tanto con la ZCR como con el flujo cortante proveniente del combustor, la región que se caracteriza por presentar mayor combustión en el sistema (Sadanandan *et al.*, 2008). Por su importancia, en este tipo de sistemas se ha diseñado un experimento utilizando varios inyectores (figura 3), en donde el combustible se inyecta de manera difusa. Sin embargo, se debe tener en cuenta que al colocar estos mecanismos la llama puede fluir de regreso, causando daños por sobrecalentamiento o por cenizas que se impregnan a los inyectores por las altas temperaturas y afinidad química.

Los estudios iniciales se enfocaron en caracterizar el tipo de llama producida por cada uno de los inyectores usados. Se desarrollaron mapas característicos del sistema, similares a los desarrollados por Lafay *et al.* (2006) y por Bradley *et al.* (1998). Las figuras 12 y 13 muestran los mapas para las configuraciones CA-50-50 y CA-25-25 usando el inyector angosto (figura 3c). Los regímenes reconocidos fueron:

- Llamas muy inestables y largas, las cuales podían estar flotando. Estas llamas estaban muy cerca del

punto de reflujo de llama. No se localizó ninguna ZCR, con un CVP muy irregular e intermitente.

- Llamas largas, estables y corrugadas. Todas están unidas al combustor. Presentan ruptura de vórtice y los CVP tienden a ser irregulares e intermitentes.
- Llamas estables, cónicas y de mediana longitud, las cuales estaban claramente estabilizadas por la presencia de una ZCR. Señales de CVP muy claras, las cuales son mucho mejores para la activación del disparo del láser.

Llamas estables, aplanadas y pequeñas. Estas llamas no se extienden alrededor de la ZCR, lo cual causa una recirculación de productos más fríos. Esto ocasiona que las mismas se encuentren muy cerca del límite de extinción. Las señales de los CVP son muy fuertes, permitiendo una buena sincronización con el láser.

El tipo de llama C es el más estable y común en los combustores industriales.

Como puede verse en las figuras 12 y 13, el tipo de configuración utilizada también define el mapa de la llama, de modo que los límites entre las regiones de llama se ven alterados por las condiciones de entrada del flujo. Para el caso CA-25-25 la estabilidad en la región C es más acotada en términos de rangos de razón de masa.

Sin embargo, el caso CA-50-50 muestra variaciones más abruptas con combinaciones de 'razón de masa-razón de equivalencia' más precisas y de menor cantidad de combinaciones, lo que se atribuye al elevado nivel de giro que este sistema presenta y que rápidamente permite la estabilización de la llama, aún cuando esta estabilización esté más propensa a inestabilidades inherentes al extremo valor de S_g .

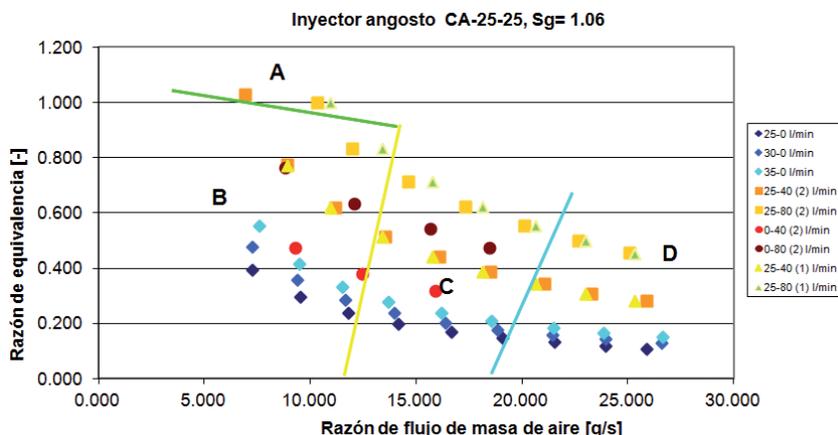


Figura 12. Razón de flujo de masa de aire contra razón de equivalencia con el inyector angosto, CA-25-25

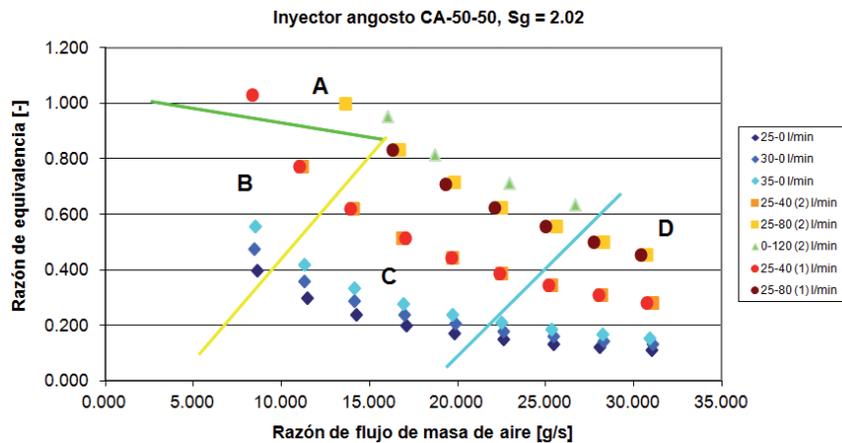


Figura 13. Razón de flujo de masa de aire contra razón de equivalencia con el inyector angosto, CA-50-50

Análisis con combustión. Fotografía rápida

Una investigación con fotografía rápida se realizó para determinar la ocurrencia del CVP y las ZCRs, así como su ubicación en los mapas de regímenes de llama (figuras 12 y 13). Para ello se utilizaron tres diferentes configuraciones, CA-50-50 con $S_g = 2.02$, CA-50-0 con $S_g = 1.16$ y CA-25-25 con $S_g = 1.08$, todas sin inyector difuso de combustible. Todos los resultados mostraron la existencia del CVP de un modo u otro. Algunas no sólo mostraron un CVP, sino que indicaron la existencia de un par de vórtices que se interconectan y giran en direcciones opuestas por algunos microsegundos, algo también observado por Syred (2006). Esto sucede a bajos números de Re , lo que pareciera ocurrir una vez que se ha producido la ruptura de vórtice, desapareciendo rápidamente por el incremento del Re de $\sim 5,000$ a $10,000$, siendo reemplazado por un solo CVP. El fenómeno en su totalidad se puede ver como un solo CVP del que surge un doble CVP que luego desaparece, con ciclos que son aproximadamente de 0.046 s. Dentro de los ma-

pas de llamas, estas llamas usualmente están en la región B de las figuras 12 y 13. Una vista típica de un CVP puede verse en la figura 14, mientras que la figura 15 denota unos CVP de doble hélice.

Análisis con combustión. Uso de PIV

Un análisis utilizando PIV se realizó utilizando todos los modos de inyección antes mencionados con el objetivo de determinar cómo el modo de inyección afecta la geometría de las estructuras coherentes (ZCR, CVP, etc.) del sistema.

Debido a la complejidad del fenómeno y a la gran diversidad de datos por obtener, únicamente se tomaron muestras de las ZCRs. La figura 16 muestra varios de los resultados obtenidos usando los 3 inyectores difusos (figura 3), así como el caso donde no se utilizó inyector para la configuración CA-50-50.

Al hacer la comparación entre experimentos se demostró que el mejor fue el que utilizaba el inyector perforado produciendo una llama mucho más consistente

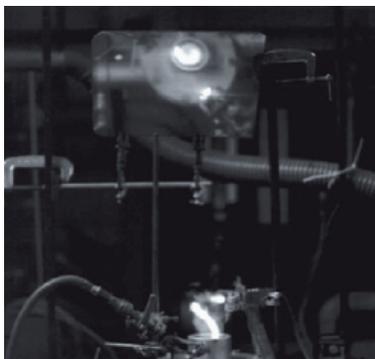


Figura 14. CVP simple. $Re \sim 5,600$ y razón de equivalencia (r.e.) de 0.78



Figura 15. Doble hélice. Estos CVP muestran 2 tipos de estructura: una donde las hélices tienen el mismo tamaño y fuerza, y otro donde la hélice menor gira alrededor de la principal, respectivamente

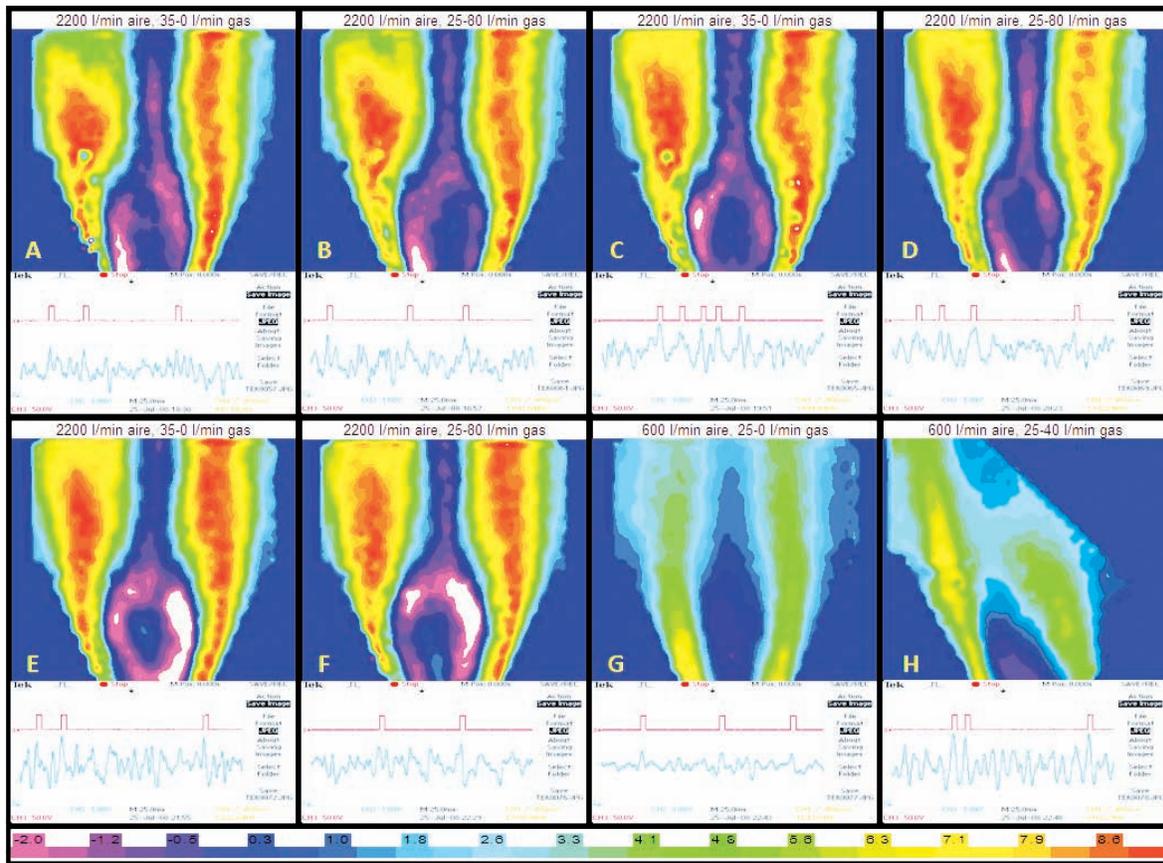


Figura 16. Resultados empleando diferentes inyectores difusos. Configuración CA-50-50: a) inyector perforado, $Re \sim 39,300$, $r.e. = 0.15$, b) inyector perforado, $Re \sim 40,500$, $r.e. = 0.45$, c) inyector ancho, $Re \sim 39,300$, $r.e. = 0.15$, d) inyector ancho, $Re \sim 40,500$, $r.e. = 0.45$, e) inyector angosto, $Re \sim 39,300$, $r.e. = 0.15$, f) inyector angosto, $Re \sim 40,500$, $r.e. = 0.45$, g) sin inyector, $Re \sim 11,000$, $r.e. = 0.40$, h) sin inyector, $Re \sim 11,700$, $r.e. = 1.03$. La barra de colores representa la velocidad en m/s

y limpia. Esto se debe a que la inyección radial del gas aumentaba el mezclado con el flujo ya premezclado, además de proveer de suficientes radicales a las zonas de recirculación.

Se observó que la inyección difusa de poco gas incrementó la estabilidad de la llama por medio de su anclaje, lo que se corroboró para todos los modos de inyección difusa. Las bolsas de gas, las cuales generan inestabilidades, eran menores con la inyección radial debido a una mejor distribución del gas inyectado.

Al comparar los casos con el inyector angosto y el ancho, este último resultó más viable para su uso industrial. Para el inyector angosto, la inercia producida por el flujo hace que la ZCR se vea afectada en su geometría (figura 17), lo cual crea más bolsas de gas que a su vez promueven las inestabilidades vía el criterio de Rayleigh, por lo que su aplicación es menos adecuada.

Cabe mencionar que la ZCR se comportó como una burbuja, inflándose con la inyección difusa. Al tratar de

expandirse y no verse favorecida por las altas corrientes y presiones que actuaban sobre ella, la ZCR trató de buscar una salida, encontrándola a través de la parte superior del campo de flujo, lo que a su vez generó una cola de productos calientes (figura 16). Es por ello que se puede concluir que se trata de una estructura activa que se encuentra cambiando junto con el flujo, sirviendo como anclaje, pero también como un equilibrio de presiones para el sistema en sí.

Estos resultados permitieron un análisis de velocidades promedio para verificar la fuerza y grado de recirculación de las ZCR en condiciones asimétricas y simétricas con insertos de 50%. Los resultados se muestran en la tabla 1. Se puede observar que los casos con simetría presentan zonas de recirculación de mayor intensidad.

También es notorio que el uso del inyector angosto con una condición simétrica genera la mayor recirculación, un fenómeno atribuido al modo de inyección del

gas, el cual al empujar de sobremanera la zona de recirculación hace que las presiones internas aumenten, a modo de que las presiones externas generen una compensación de mayor intensidad que en los otros casos, aumentado así la intensidad de la velocidad dentro de la ZCR.

Tabla 1. Análisis de velocidad promedio

Inserto	Inyector	Velocidad [m/s]
[50-0]	Perforado	-1.2894
[50-0]	Ancho	-1.0005
[50-0]	Angosto	-1.1871
[50-50]	Perforado	-1.576
[50-50]	Ancho	-1.5234
[50-50]	Angosto	-1.6043

Análisis de reflujo de llama al inyector

Uno de los puntos observados durante los experimentos fue el reflujo de llama a altos Re , así como la falta de estabilidad por parte de la llama cuando se eliminaba el uso de inyección difusa. Por esta razón es que se analizaron diferentes geometrías con el objetivo de determinar cuál era el fenómeno de propagación causante de la inestabilidad, y con ello definir algún medio de supresión. Se utilizó el inyector ancho debido a la mayor cantidad de resultados que se podrían obtener por su menor inestabilidad.

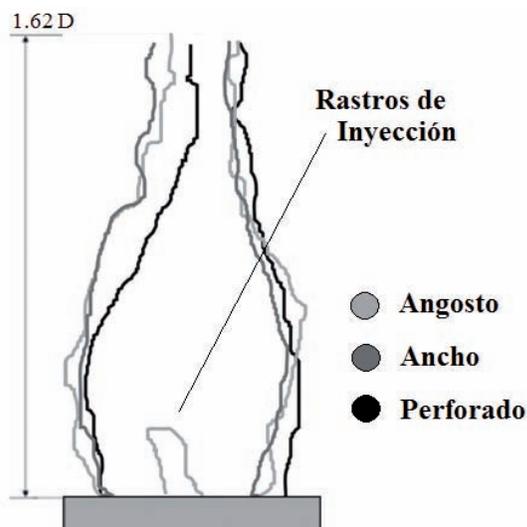


Figura 17. Comparación entre ZCRs. Se tomó como referencia el límite a 0.00 m/s. Se muestran rastros de velocidades positivas dentro de la ZCR

El uso de constricciones (figura 4), demostró ser un factor imperante en este fenómeno. La figura 18 muestra los diferentes resultados de las llamas a razones de equivalencia cercanos a 0.27 usando diferentes constricciones. Al no utilizar constricción (figura 18a), la llama alcanza el inyector creando una zona muy contaminada y de muchas emisiones. Al apagar el equipo, fue notoria la gran cantidad de ceniza acumulada en el inyector. Al cambiar a la constricción cuadrada de 0.9 D (figura 18b), la llama resistió mucho más el empuje generado por el flujo (el cual es causante de la recirculación). Sin embargo, todavía alcanzaba a tocar el inyector (un hecho enfatizado por el color de la llama). Al reducir aún más el diámetro de la constricción (figura 18c) la llama era empujada hacia arriba todavía más. Sin embargo, debido a la geometría de la constricción de tipo cuadrado, el flujo cortante era tan fuerte por la reducción de la salida y el aumento local de Re , que la llama se encontraba más cerca de la extinción. Finalmente, aprovechando la constricción de la salida y permitiendo la recuperación de la llama a través de un ángulo de salida (figura 18d), se alcanzó la mayor estabilidad con la supresión de contacto con el inyector. La mayor estabilidad también está ligada a que durante la recuperación parte del momento tangencial perdido por la constricción que se recupera, lo que incrementa la estabilidad de la zona de recirculación.

La coherencia y fuerza de recirculación de estos casos fue corroborada con el uso de PIV (figura 19). Resulta claro que el caso angular es el que mayor fuerza tiene en su ZCR al crear una región más compacta que está fuera de los límites de visualización especificados para el análisis (-2.00 m/s). Además, se puede ver cómo esta zona presenta un abultamiento a los lados, lo cual seguramente incrementa el contacto con los reactivos provenientes del combustor. Esto aumenta las reacciones de combustión y con ello la eficiencia del sistema para evitar la extinción de la llama.

Resulta claro que la fuerza de la Zona Central de Recirculación es la que provoca el reflujo de llama a la punta del inyector. Sin embargo, cuando ésta es empujada hacia arriba por medio de altos flujos de aire a través de constricciones más angostas, la estructura no alcanza a tocar el sistema, evitando así la formación de ceniza o el sobrecalentamiento del componente.

Análisis de reflujo al interior del combustor

Otro fenómeno fue el reflujo hacia el interior del combustor. Para su análisis se utilizó la constricción angular debido a que ésta mostró la mayor confiabilidad en términos de eliminación de reflujo a la punta del inyector.

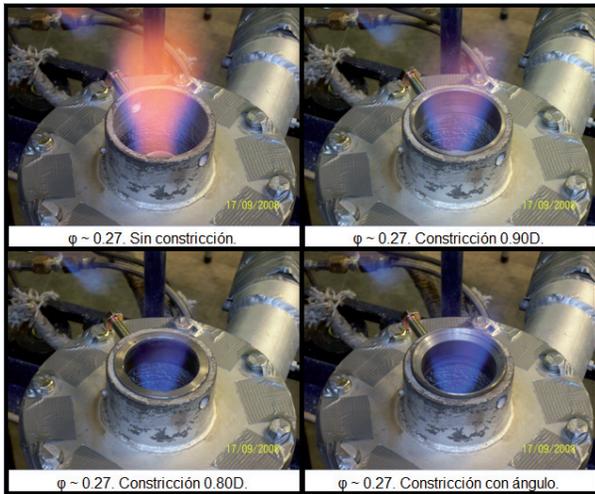


Figura 18. Llamas observadas con diferentes constricciones de salida. Razón de equivalencia 0.27

Se utilizaron diferentes razones de equivalencia y se comparó el caso sin confinamiento con el que tiene confinamiento cilíndrico abierto (figura 5d). Solo se usó inyección premezclada.

Los experimentos se comenzaron sin inyector para determinar la influencia de este elemento en el sistema y en el fenómeno de reflujo hacia el interior del combustor. Los resultados (figura 20), mostraron que la ausencia de confinamiento (figura 20a), crea un sistema mucho más resistente al reflujo de llama hacia el interior del combustor. Al compararlo con el caso de confinamiento (figura 20b) se puede observar cómo este último tiene una resistencia mucho más limitada. Esto se debe a la mayor fuerza que presenta la ZCR en el segundo caso, la cual se encuentra empujando la llama hacia dentro del combustor, un fenómeno observado en el reflujo hacia la punta del inyector. Cabe mencionar que ambos casos tienen muy poca resistencia al fenómeno de reflujo, con un rango de estabilidad muy corto

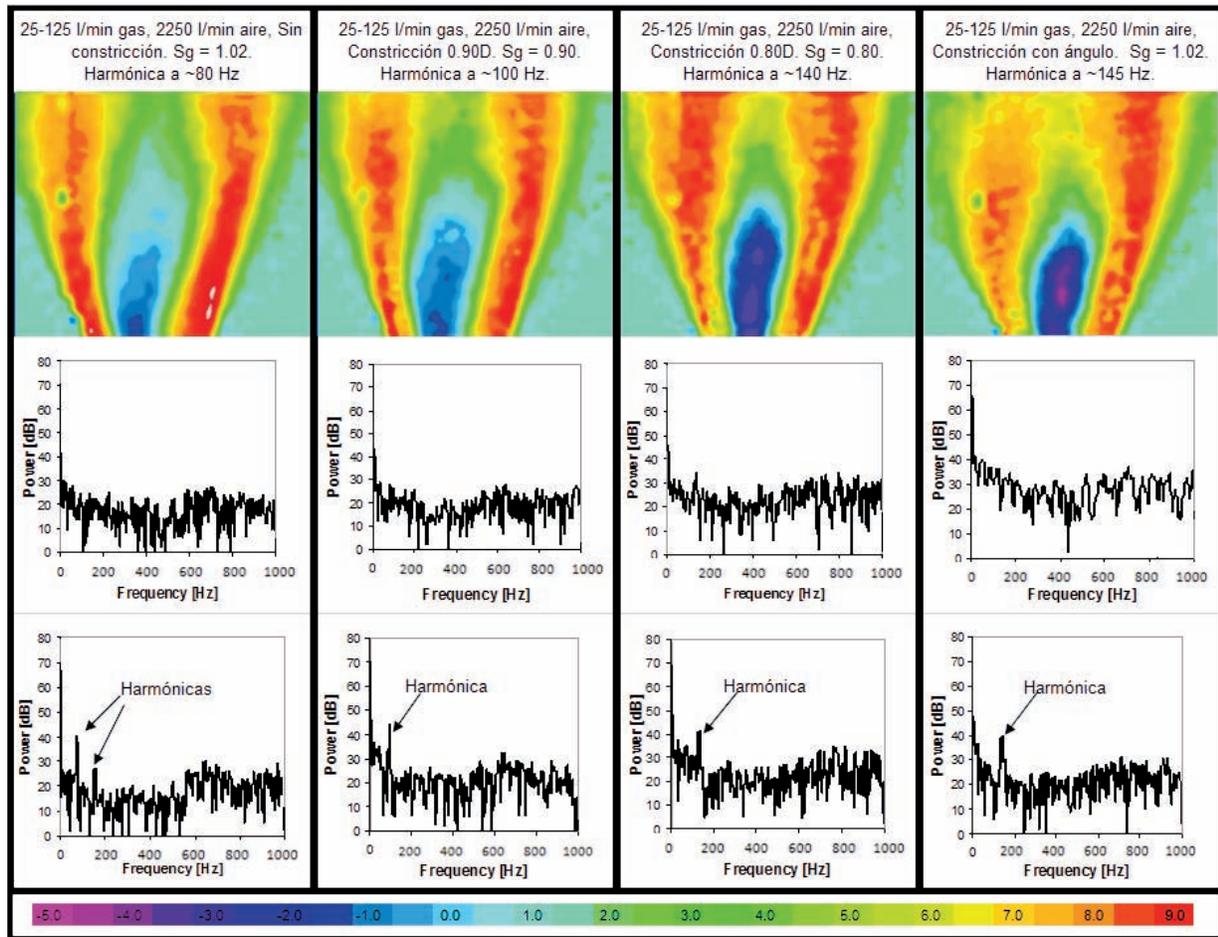


Figura 19. Casos a razones de equivalencia de 0.62 e inyecciones de 25-125 l/min. La primera fila de señales se refiere a condiciones bajo combustión, mientras la segunda son condiciones isotérmicas: a) sin confinamiento, b) constricción de 0.90D, c) constricción de 0.80D, d) constricción con ángulo. La barra de colores representa la velocidad en m/s

que requiere altas velocidades de flujo de salida para poder mantener la llama estable.

Al colocar el inyector en su lugar manteniendo apagada la inyección difusa, se observó que para ambos casos, tanto con confinamiento como sin él, el fenómeno de reflujo se redujo considerablemente. Más interesante fue el hecho de que ambos sistemas presentaron la misma tendencia a la resistencia de reflujo de llama (figura 21). Esto se puede explicar por medio del concepto de Ruptura de Vórtice Inducido por Combustión, RVIC.

De acuerdo a Kroner *et al.* (2003), la Zona de Recirculación al propagarse por los conductos del sistema (donde se convierte en RVIC) produce una mayor presión sobre la llama, la que a su vez, al no poder ser contrarrestada por el flujo proveniente del combutor (el cual se ha reducido para incrementar la razón de equivalencia) ingresa al combutor causando el reflujo y la ignición dentro del equipo. Los experimentos aquí presentados demuestran la existencia de esta estructura, y

más aún, la supresión por medio de un cuerpo central (en este caso el inyector) que está impidiendo la propagación de la estructura, dejando el reflujo de llama en función de las condiciones de capa límite del sistema, las cuales son iguales para ambos casos.

Conclusiones

Se demostró la existencia de una gran gama de estructuras que interactúan entre si dentro de los flujos giratorios. Esencialmente:

- La Zona Central de Recirculación está ligada al Centro de Vórtice Precesor, donde el intercambio de energía entre ambos permite su coherencia en el sistema.
- La geometría del sistema influye en la forma de estas estructuras y en su interacción, haciendo que el decaimiento de presiones sea fundamental en el desarrollo o supresión de estructuras extra.

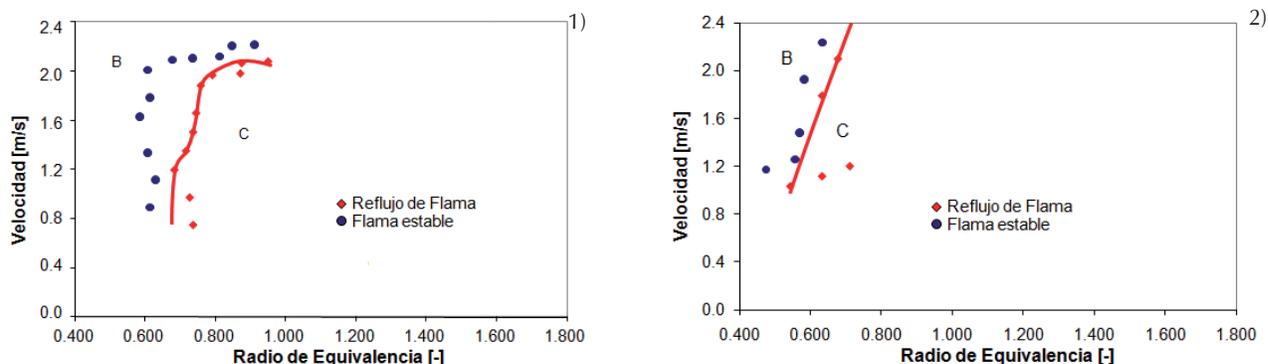


Figura 20. Comparación de casos para el reflujo de llama hacia dentro del combutor sin inyector. Constricción angular: 1) sin confinamiento, 2) con confinamiento. B) zona estable de llama, C) zona de reflujo de llama

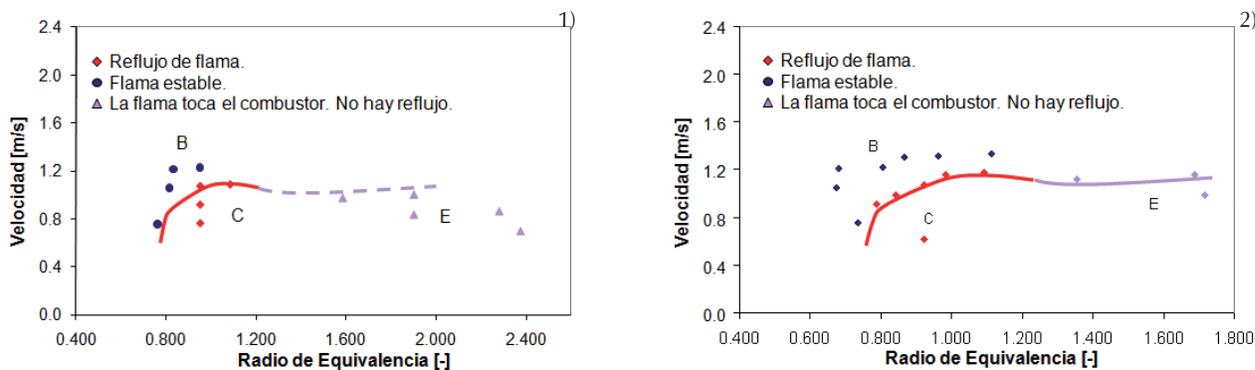


Figura 21. Comparación de casos para el reflujo de llama hacia dentro del combutor con inyector. Constricción angular: 1) sin confinamiento, 2) con confinamiento. B) zona estable de llama, C) zona de reflujo de llama, D) zona de pulsaciones, E) la llama toca el combutor, pero no hay reflujo

- Las estructuras son controlables debido a sus características. El Centro de Vórtice Precesor puede ser modificado al punto de suprimir su precesión, así como a la Zona Central de Recirculación se le puede aumentar su intensidad por medio de la generación de mayores presiones, tanto internas (por inyección difusa), como externas (por el flujo saliente/cortante).
- La ZCR además de anclar la llama también actúa como un medio de equilibrio para las presiones del sistema.
- El uso de inyección difusa es vital para la mayor estabilización del sistema. Sin embargo, el uso de inyectores que producen flujo de gran momento pueden crear inestabilidades por la creación de bolsas de combustible, así como deformaciones de la ZCR.
- El uso de constricciones a la salida del combustor puede reducir el reflujo a las puntas de los inyectores con una llama muy estable por medio de la creación de una Zona Central de Recirculación más fuerte a elevados Re , que sea empujada aguas arriba por la reducción en el diámetro de la salida del flujo cortante, permitiendo la recuperación de la llama a través de un ángulo de salida.
- El uso de inyectores al centro del arreglo evita el ingreso del Vórtice Inducido por Combustión suprimiendo esta estructura, lo cual aumenta la resistencia al reflujo de llama hacia los conductos e interior del combustor, dejando el proceso como un fenómeno de capa límite.

Agradecimientos

Valera-Medina A. agradece el apoyo del CONACYT para la realización de su doctorado en la Universidad de Cardiff, Reino Unido, donde se llevó a cabo el desarrollo de este artículo. Los autores también agradecen al Ing. José Pedro Agustín Valera Negrete por sus contribuciones a la revisión de la redacción del presente artículo.

Referencias

- Al-Abdali Y., Masri A. Turbulent Swirling Natural Gas Flames: Stability Characteristics, Unsteady Behaviour and Vortex Breakdown. *Combust. Sci. Technology*, 179:207–225, 2007.
- Bradley D., Gaskell P., Gu X., Lawes M., Scott M. Premixed Turbulent Flame Instability and no Formation in a Lean Burn Swirl Burner. *Combustion and Flame*, 115:515–538, 1998.
- Brundish K., Miller M., Morgan L., Wheatley A. *Variable Fuel Placemnt Injector Development. Advanced Combustion and Aerothermal Technologies*, NATO Science for Peace and Security Series, Springer, 2007, pp. 425–444.
- Cala E., Fernandes C., Heitor M., Shtork S. Coherent Structures in Unsteady Swirling Jet Flow. *Experiments in Fluids*, 40:267–276, 2006.
- Candel S. Combustion Dynamics and Control: Progress and Challenges. *Proc. Combust. Inst.*, 29:1–28, 2000.
- Claypole T., Syred N. Integration of Swirl Burners with Furnaces for the Combustion of Low Calorific Value Gases. International Conference on Combustion in Engineering, I. Mech. E. *Conference Publications*, 2:139–145, 1981.
- Froud D., O'Doherty T., Syred N. Phase Averaging of the Precessing Vortex Core in a Swirl Burner Under Piloted and Premixed Combustion Conditions. *Combustion and Flame*, 100(3): 407–412, 1995.
- Gupta A.K., Lilley D.J., Syred N. *Swirl Flows*. Abacus Press, Tunbridge Wells, United Kingdom, 1984.
- Huang Y., Yang V. Effect of Swirl on Combustion Dynamics in a Lean Premixed Swirl Stabilized Combustor. *Proc. Combust. Inst.*, 30(2):1775–1782, 2005.
- Kiesewetter F., Konle M., Sattelmayer T. Analysis of Combustion Induced Vortex Breakdown Driven Flame Flashback in a Premix Burner with Cylindrical Mixing Zone. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 129:929–236, 2007.
- Kroner M., Fritz J., Sattelmayer T. Flashback Limits for Combustion Induced Vortex Breakdown in a Swirl Burner. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 125:693–700, 2003.
- Lafay Y., Taupin B., Martins G., Cabot G., Renou B., Boukhalfa A. Experimental Study of Biogas Combustion Using a Gas Turbine Configuration. *Experiments in fluids*, 43(2-3):112–128, 2006.
- Lefebvre A.H. *Gas Turbine Combustion*, 2nd Ed. Taylor & Francis Group, New York, USA, 1999.
- Lieuwen T., Yang V. *Combustion Instabilities in Gas Turbine Engines*. AIAA, Progress in Astronautics and Aeronautics, vol. 210, USA, 2005.
- Syred N., Beer J. Combustion in Swirling Flows: a Review. *Combustion and Flame*, 23:143–201, 1974.
- Meier W., Weigand P., Duan X.R., Giezendanner-Thoben R. Detailed Characterization of the Dynamics of Thermoacoustic Pulsations in a Lean Premixed Swirl Flame. *Combustion and Flame*, 150:2–26, 2007.
- Paschereit C., Gutmark E. Enhanced Stability and Reduced Emissions in an Elliptic Swirl-Stabilized Burner. *AIAA Journal*, 46(5):1063–1071, 2008.
- Sadanandan R., Stohr M., Meier W. Simultaneous OH-PLIF and PIV Measurements in a Gas Turbine Model Combustor. *Applied Physics B*, 90:609–618, 2008.
- Subramanya M., Choudhuri A. Investigation of Combustion Instability Effects on the Flame Characteristic of Fuel Blends, 5th International Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit (IECEC), ref. AIAA 2007-4796, 2007.

- Syred N. A Review of Oscillation Mechanisms and the Role of the Precessing Vortex Core (PVC) in Swirl Combustion Systems. *Progress in Energy and Combustion Systems*, 32(2):93-161, 2006.
- Thornton J., Chorpeneing T., Sidwell T., Strakey P., Huckaby E., Benson K. Flashback Detection Sensor for Hydrogen Augmented Natural Gas Combustion, Proceedings of GT2007, ASME Turbo Expo, ref. GT2007-27865, 2007.
- Valera-Medina A., Syred N., Griffiths A. Characterization of Large Coherent Structures in a Swirl Burner under Combustion Conditions. AIAA International Meeting 2009, ref. AIAA 2009-646, 2009a.
- Valera-Medina A., Syred N., Griffiths A. Visualization of Isothermal Large Coherent Structures in a Swirl Burner. *Combustion and Flame*, 156: 1723-1734, 2009b.
- Valera-Medina A., Syred N., Griffiths A. Large Coherent Structures Visualization in a Swirl Burner. Proceedings 14th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics 2008, Lisbon, Portugal, 2008a.
- Valera-Medina A., Syred N., Griffiths A. Characterization of Large Coherent Structures in a Swirl Burner. AIAA International Meeting 2008, ref. AIAA 2008-1019, 2008b.

Semblanza de los autores

Agustín Valera-Medina. Egresado de la UNAM del Programa de Alto Rendimiento Académico (PARA) de la carrera de ingeniería mecánica en el 2003. Después de trabajar 2 años en la industria privada metalmecánica, obtuvo una beca CONACYT para realizar sus estudios de maestría y doctorado en el Reino Unido en la Universidad de Cardiff con temas de inestabilidades en combustión de turbinas de gas. Actualmente se encuentra trabajando en el CIATEQ, Centro de Tecnología Avanzado de Querétaro, como líder de proyecto del grupo de turbinas de gas. Ha participado en 8 conferencias de ámbito internacional en Europa y Norteamérica, así como publicado un artículo en la revista *Combustion and Flame*, tiene cinco artículos en proceso de revisión. Nivel candidato SNI.

Nicholas Syred. Egresado de la Universidad de Sheffield, Reino Unido en 1965. Obtuvo su doctorado en 1969 en fluidos de potencia, obteniendo la plaza de investigador asociado en el Departamento de Flujos Giratorios bajo la tutela de N. Chigier y John Beer. En la Universidad de Cardiff (1974) continuó con su trabajo en flujos giratorios. A la fecha ha participado en proyectos para BP, Air Products, UKAEA, SERC, etc. En el 2002 ganó un premio de la OTAN por mejor diseño para el enfriamiento de álabes de turbinas de gas junto con el Prof. Khalatov de Ucrania y el Dr. Koslov de Rusia. Actualmente es Fellow del Instituto de Ingenieros Mecánicos de Londres, Inglaterra. Ha participado en decenas de conferencias a nivel mundial y en publicaciones de artículos, supervisión de tesis y desarrollo de cursos por más de 30 años.

Anthony Griffiths. Egresado de la Universidad de Cardiff. Es actualmente director del Centro de Investigación en Energía, Desperdicios y Ambiente de la Universidad de Cardiff. Forma parte del comité consultor en biocombustibles de la Unión Europea, participando en proyectos de gasificación, transferencia de calor, administración de desperdicios, administración de energía y biomasa. Ha sido revisor de la Academia de Ciencia de China, así como consultor de la DEFRA. Ha participado en decenas de conferencias a nivel mundial y en publicaciones de artículos, supervisión de tesis y desarrollo de cursos por más de 20 años.

Herramienta educativa para la formación de ingenieros en protecciones eléctricas: relevador de distancia

Educational Software Tool for Protection System Engineers. Distance Relay

Trujillo-Guajardo L.A.

*Programa Doctoral en Ingeniería Eléctrica
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Universidad Autónoma de Nuevo León
Correo: luistrujillo84@gmail.com*

Conde-Enríquez A.

*Programa Doctoral en Ingeniería Eléctrica
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Universidad Autónoma de Nuevo León
Correo: con_de@yahoo.com*

Información del artículo: recibido: mayo de 2010, aceptado: mayo de 2011

Resumen

En este artículo se presenta una herramienta computacional gráfica para apoyar la formación de ingenieros en protecciones eléctricas. Los fundamentos teóricos para el diseño de características de operación de relevadores de distancia, así como las rutinas de programación de un relevador de distancia son presentados. La herramienta desarrollada permite la evaluación de las etapas de diseño de relevadores y el análisis de la operación ante eventos reales o simulados. Se presentan algunos casos de ejemplo para ilustrar las actividades didácticas que son posibles de realizar con la herramienta presentada.

Abstract

In this article, a graphical software tool is presented; this tool is based on the education of protection system engineers. The theoretical fundamentals used for the design of operation characteristics of distance relays and their algorithms are presented. The software allows the evaluation and analysis of real time events or simulated ones of every stage of design of the distance relay. Some example cases are presented to illustrate the activities that could be done with the graphical software tool developed.

Descriptores

- relevador de distancia
- herramienta computacional gráfica
- características de operación
- señales eléctricas de entrada
- filtrado analógico
- filtrado digital

Keywords

- distance relay
- graphical software tool
- operation characteristics
- electric input signals
- digital filter
- analog filter

Introducción

La comprensión del funcionamiento y limitaciones de los sistemas de protección es una parte importante en la formación de ingenieros eléctricos. La enseñanza en clase por parte de académicos es limitada en muchas ocasiones por carecer de elementos demostrativos que permitan evaluar las diferentes condiciones de operación de los sistemas eléctricos de potencia, dificultando la capacidad de transmisión del conocimiento de los sistemas de protección eléctrica.

Por otra parte, las actividades en un laboratorio en muchas ocasiones son limitadas por la falta de recursos para el análisis de los eventos y medios de visualización de las diversas condiciones de operación. Los paquetes profesionales de protecciones además de tener un costo prohibitivo para muchos centros educativos se enfocan en la componente de aplicación más que en la componente didáctica.

Un gran número de instituciones educativas cuentan con recursos limitados para ofrecer un laboratorio de protecciones funcional, las actividades de laboratorio están mayormente enfocadas a la enseñanza de conexión y programación de equipo comercial; sin embargo, el análisis algorítmico y detección de condiciones de mal funcionamiento del relevador son difíciles de reproducir en laboratorio. Las actividades de laboratorio difícilmente pueden cubrir una gama amplia de eventos que permitan mostrar el desempeño de relevadores.

En Brahma *et al.* (2009), se puntualiza la importancia del diseño de cursos de ingeniería de sistemas de potencia con una urgente necesidad de identificar y desarrollar los materiales necesarios para la educación y la formación de los ingenieros de la protección futura, este trabajo está orientado en esa dirección.

En la búsqueda de materiales que ofrezcan recursos didácticos adecuados se han creado laboratorios para ofrecer una componente de enseñanza del sistema eléctrico de potencia. En Wei *et al.* (2002) se describe la conformación de un laboratorio de simulación de sistemas de potencia a escala de un sistema trifásico para mejorar las actividades de investigación y enseñanza de protecciones; se reproducen las condiciones de operación estáticas y dinámicas de relevadores de protección. En Huang *et al.* (1991) se presenta un recurso gráfico para el análisis y diseño de sistemas de potencia, el cual provee de herramientas para facilitar la creación y modificación de aplicaciones de análisis de sistemas de potencia, la aplicación permite la comunicación con programas externos para la simulación de sistemas de potencia.

En Jian (1998) se describe un software interactivo *PowerGraf* para el apoyo del proceso de aprendizaje en clase, laboratorio y auto-aprendizaje. La herramienta gráfica permite la visualización de resultados en forma directa con el unifilar de la red, además permite la interacción con rutinas elaboradas en Matlab. Un complemento a estas actividades es el desarrollo de recursos gráficos con el objeto de visualización de fenómenos que pueden provenir de eventos generados en un laboratorio físico, o de un software comercial para el modelado y análisis de sistemas eléctricos de potencia. En Peterson *et al.* (1991) se incorporan rutinas de relevadores de protección en forma modular en EMTP (*Electromagnetic Transient Program*, programa de transitorios electromagnéticos) y se presentan los resultados del modelo de un relevador direccional de sobrecorriente, este modelo tiene el objetivo de mejorar los procedimientos de educación, aplicación y diseño de relevadores. En McLaren *et al.* (2001) se presenta una revisión de los modelos utilizados para relevadores de protección, su validación y aplicaciones futuras en programas de transitorios, y su simulación en estado dinámico en tiempo real en la operación de la red eléctrica.

La directriz en los recursos didácticos para el aprendizaje de sistemas de potencia y particularmente en protecciones, ha sido aportar recursos gráficos (Huang *et al.*, 2002; Jian *et al.*, 1998; Jordán *et al.*, 1997; Hirsch, 1997; Salon, 1983; Wachal *et al.*, 1984; Alvarado *et al.*, 1984, Lo *et al.*, 1986; Papadopoulos *et al.*, 1987, Alvarado *et al.*, 1987, Daneshdoost *et al.*, 1989; Yu *et al.*, 1989), esto se debe a que la visualización de la operación de las protecciones se realiza por medio de la comparación de condiciones de operación determinadas en una característica de operación del relevador. Mediante esta comparación se evalúa y determinan las condiciones de operación particulares que pueden comprometer la operación de la protección. Debido al incremento y factibilidad de comunicaciones en los sistemas eléctricos, la protección pasa de ser un dispositivo de control independiente del sistema a un elemento integral de la operación de la red; la evaluación dinámica de la operación de la protección debe ser simulada en conjunto con el sistema eléctrico.

Los relevadores de distancia son un componente del esquema de protección de redes eléctricas que presenta una mayor complejidad algorítmica, facilitando por consiguiente su aplicación y proceso de ajuste. Sin embargo, es sujeto a diferentes fuentes de error (Cook, 1985; Warrington *et al.*, 1969), el análisis del comportamiento del relevador ante dichos escenarios es cubierto en forma teórica de manera adecuada; sin embargo, emular tales escenarios en laboratorio es deseable y

aconsejable para la formación de futuros ingenieros en protecciones (Brahma *et al.*, 2009), este aspecto puede ser cubierto de manera satisfactoria con una herramienta computacional que permita emular diferentes escenarios y la visualización de la operación del relevador en el plano complejo con la trayectoria de impedancia y su característica de operación.

La herramienta computacional presentada para el análisis del diseño y operación de relevadores de distancia ofrece una componente didáctica, que permite extender las actividades de enseñanza en la protección de sistemas eléctricos. Es posible la realización de diversas actividades didácticas, tal como la conformación y diseño de las características de operación de relevadores de distancia, disponiendo de controles que permitan configurar características de operación comúnmente usadas tal como impedancia, mho, mho desplazado y cuadrilateral. El análisis de eventos se realiza mediante la lectura de vectores columna de datos de eventos reales o simulados en cualquier plataforma gráfica comercial o académica. Los eventos simulados pueden ser generados mediante el apoyo de simuladores digitales tales como: EMTP, PSCAD, MATLAB, ETAP, NEPLAN, PSS y otros. Mediante la generación de las señales en vectores de datos es posible reproducir una gama amplia de situaciones operativas y explorar con mayor resolución diversas condiciones operativas de los relevadores. Por lo anterior, se puede evaluar la operación del relevador en condiciones de cargabilidad, fallas sólidas o a través de alta impedancia, oscilaciones de potencia, presencia de dispositivos FACTS o compensación serie, etcétera.

El análisis de la operación del relevador de distancia en todas sus zonas de protección y el análisis de esquemas de bloqueo o disparo por oscilaciones de potencia no son considerados en el trabajo presentado; sin embargo, estas actividades pueden realizarse de forma individual, la detección de la operación por zona ante una falla y la visualización de la trayectoria de oscilación son posibles. No obstante, la herramienta computacional propuesta permite simplificar y profundizar en la enseñanza de protecciones de alumnos de pregrado y postgrado en un espectro amplio de tópicos y escenarios dinámicos de operación de la protección.

Estructura funcional

La evaluación del desempeño de un relevador de distancia está en función de su capacidad de detectar fallas dentro de su zona de protección. El relevador de distancia opera cuando la impedancia medida es menor a su ajuste, en esta condición, la impedancia del sistema pe-

netra en la característica de operación, la decisión de disparo debe ser considerada, debido a que en el sistema están presentes fenómenos que pueden provocar penetración de la característica sin ser una condición de falla, tal como las oscilaciones de potencia. El algoritmo del relevador debe recibir los fasores de voltaje y corriente para determinar la condición de operación (McLaren *et al.*, 2001; Cook, 1985; Warrington *et al.*, 1969) estas señales de entrada deben ser acondicionadas (figura 1).

Las señales eléctricas de entrada al relevador de protección provenientes del secundario de los transformadores de corriente y potencial están compuestas de señales, que si bien son representativas del fenómeno eléctrico, no son requeridas para determinar el criterio de operación del relevador, debido a que presentan un carácter aleatorio que imposibilita la determinación de ubicación de la falla; el procesamiento digital debe eliminar las cantidades no deseadas y retener las cantidades de interés. Tanto en relevadores de distancia como de sobrecorriente, el filtrado de la señal debe eliminar las componentes de corriente directa, los transitorios de transformadores de instrumentos, reflexiones de onda viajera y otras interferencias (Cook, 1985). La operación del relevador debe establecerse únicamente con la componente fundamental a la frecuencia nominal, debido a que esta componente de la señal es afectada proporcionalmente por la ubicación de la falla.



Figura 1. Acondicionamiento de señales eléctricas de entrada

El filtrado de la señal de entrada impacta directamente el desempeño del algoritmo del relevador, afectando la exactitud en la operación dependiendo del rechazo de componentes no deseadas e incrementando la carga de procesamiento. El tiempo total de operación del relevador depende del proceso de filtrado analógico y/o digital seleccionado.

La descripción de las etapas de estructura funcional de un relevador de distancia se presenta desde un enfoque didáctico como justificación de la herramienta computacional presentada.

Transformación de señales

La saturación de los Transformadores de Corriente (TC) (IEEE Standard, 1993; Tziouvaras *et al.*, 2000) aún cuando impacta el desempeño de los relevadores de distancia, generalmente está presente en condiciones

muy específicas de operación y de falla, estando directamente asociada al dimensionamiento del transformador, ya que su efecto puede reducirse significativamente. La aplicación de CCVT (*Coupling Capacitor Voltage Transformer*, transformador de voltaje de acoplamiento capacitivo), (Tziouvaras *et al.*, 2000) para la medición de voltaje, imprime un transitorio en la señal de voltaje medida por el relevador. Debido a que la naturaleza del transitorio depende del instante de la falla, generalmente no se compensa y su mitigación se logra mediante un tiempo de retardo en el relevador (Westinghouse Electric Corporation, 1976). La no linealidad de la respuesta de los transformadores de instrumentos no está simulada en la herramienta propuesta, es decir, no se disponen de los modelos matemáticos de los transformadores, el efecto de la saturación de los transformadores en los relevadores de distancia puede analizarse con la herramienta propuesta, introduciendo señales saturadas generadas en algún paquete de simulación académico o comercial.

Tratamiento digital de señales

Es necesario incorporar dos etapas de filtrado para eliminar las componentes frecuenciales indeseadas, como ruido, armónicas y componentes de corriente directa. Ya que la magnitud o polaridad no son representativas de la ubicación de la falla, se consideran fuentes de ruido que pueden afectar la selectividad del relevador (figura 2).

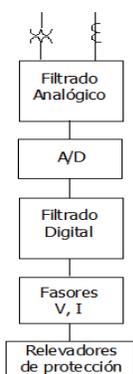


Figura 2. Estructura para el procesamiento de las señales para propósitos de protección

Se dispone de dos etapas de filtrado analógico y digital con el objeto de tener la configuración que presente menor retardo. Generalmente, el filtro analógico utilizado es el filtro Butterworth de 2° o 4° orden, con una frecuencia de corte de 360 Hz (figura 3), se prefiere este filtro por tener respuestas planas en la banda de paso y mo-

no-tónica decreciente en la banda de parada (Proakis *et al.*, 1998).

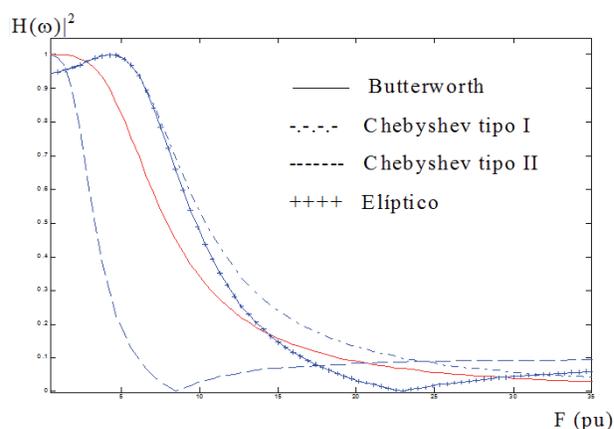


Figura 3. Respuestas a la frecuencia de filtros analógicos

Posterior a la etapa de filtrado analógico se realiza el proceso de digitalización de la señal analógica, el incremento en la frecuencia de muestreo permite lograr un incremento sustancial en la resolución de la señal, pero incrementa la carga del procesador. La reducción del efecto de "aliasing", se obtiene mediante una sintonización entre el filtrado analógico y el filtrado digital, permitiendo un traslape de las frecuencias de filtrado es posible eliminar el filtrado analógico mediante el sobremuestreo de la señal.

El filtrado digital se realiza con filtros tipo FIR (*Finite Impulse Response*, respuesta impulsional finita), ya que no hay recursión, es decir, la salida depende sólo de la entrada y no de valores pasados de la salida, la memoria de las condiciones previas de la señal no tiene beneficio en la determinación de la condición de falla por el relevador. Además, los filtros IIR (*Infinite Impulse Response*, respuesta impulsional infinita) producen en general distorsión de fase, contrario a los FIR que son de fase lineal. Esta condición permite que su respuesta a la frecuencia tenga ceros naturales en las frecuencias armónicas, permitiendo un rechazo de estas componentes (figura 4). Se utiliza regularmente el filtro tipo Fourier o coseno.

Teniendo los fasores de las señales de voltaje y corriente de la frecuencia fundamental, se puede representar la impedancia aparente en un plano complejo para efectos de visualización en la operación del relevador, tal como se observa en la figura 5. Sin embargo, la determinación de la condición de disparo no se efectúa mediante la comparación de impedancias, el proceso de toma de decisión de disparo se describe en la siguiente sección.

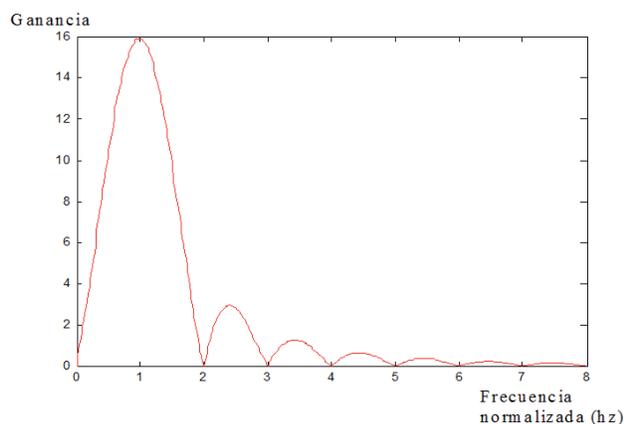


Figura 4. Respuesta a la frecuencia de un filtro de respuesta impulsiva finita (FIR)

Algoritmo del relevador de distancia

El relevador origina una señal discreta de salida que depende del cumplimiento de determinadas condiciones por las señales eléctricas de entrada. La condición de

operación se determina mediante la comparación de señales. Esta comparación puede ser comparación de amplitud o comparación de fase (Cook, 1985).

Las señales de entrada a los comparadores dependen linealmente de las señales de entrada al órgano de medición \bar{V}_r e \bar{I}_r de acuerdo con las expresiones siguientes:

$$\begin{aligned} S_0 \text{ ó } S_1 &= \bar{K}_1 \cdot \bar{V}_r + \bar{Z}_{R1} \cdot \bar{I}_r \\ S_R \text{ ó } S_2 &= \bar{K}_2 \cdot \bar{V}_r + \bar{Z}_{R2} \cdot \bar{I}_r \end{aligned} \tag{1}$$

donde \bar{K}_1 , \bar{K}_2 , \bar{Z}_{R1} , \bar{Z}_{R2} son coeficientes constantes complejos, S_0 y S_R representan señales de entrada de operación y polarización, respectivamente para un comparador de amplitud, S_1 y S_2 similarmente para un comparador de fase. Tratando de mejorar la selectividad y funcionalidad de la protección de distancia, históricamente se han desarrollado características de operación diversas, esta diversidad de características de operación se obtiene mediante la variación de los coeficientes de las ecuaciones en (1).

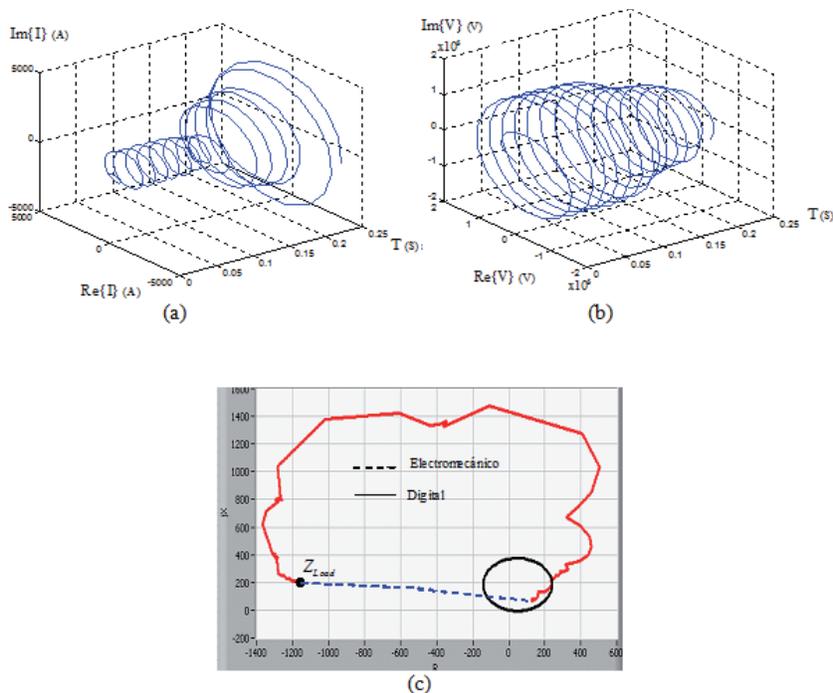


Figura 5. Representación de la impedancia aparente en un relevador digital de distancia, a) fasor de corriente, b) fasor de voltaje, c) impedancia aparente en el plano complejo

Las señales de (1) tienen implícitamente una referencia direccional, la señal de operación depende de la dirección de corriente, entonces la señal de referencia debe suplirse por S_2 o S_{Rr} , la cual es la cantidad de polarización. Por esta razón, para la conformación de las diferentes características de operación direccionales de relevadores de distancia, las señales S_2 o S_R no dependen de la corriente, en cambio, las características impedancia o mho desplazado, que no son direccionales o tienen una direccional controlada, si presentan el término de corriente. Estas afirmaciones se observan en la tabla 1.

En los comparadores se evalúa la amplitud o fase de las señales de entrada, esto representa una rectificación de las señales analógicas y una transformación en valores representativos de voltaje, se observa que los factores de las corrientes en (1) siempre son impedancias.

A esta impedancia se le conoce como impedancia réplica que representa la impedancia de la línea para la señal de operación, y en la señal de polarización, la impedancia representará el desplazamiento de la característica fuera del origen (mho desplazada).

Las señales de comparación son una sumatoria de voltajes, debido a la herencia de relevadores analógicos; sin embargo, también pueden ser corrientes. En la figura 6 se muestran los comparadores de amplitud, fase y sus condiciones de operación.

Los ángulos β_1 y β_2 , llamados ángulos coincidentes, establecen el límite angular para la comparación de fase, estos valores son definidos para cada característica de operación, en cambio el ángulo β se define por las señales de comparación: $\beta = \text{argumento}(S_1/S_2)$.

En la figura 7 se presenta un ejemplo de visualización de la característica de un relevador de distancia; la variación de la forma de la característica se obtiene mediante la variación de los ángulos coincidentes.

La estructura de las señales de comparación es más simple para el comparador de fase (tabla 1), por tal motivo, éste es el esquema de comparación utilizado para el diseño de relevadores de distancia.

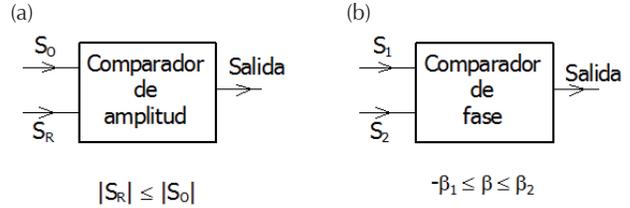


Figura 6. Comparadores de relevadores de distancia

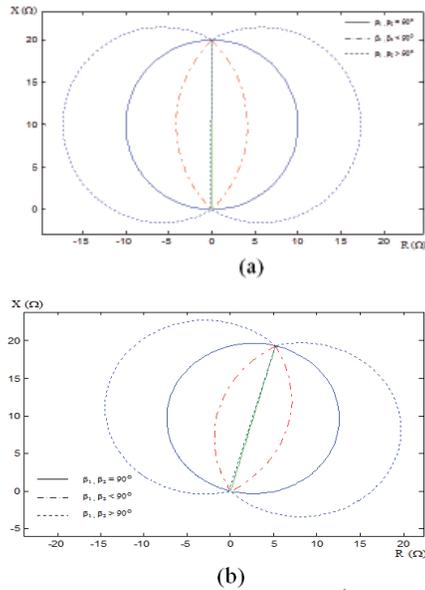


Figura 7. Variación de los ángulos coincidentes de una característica mho, a) ángulo de sensibilidad $\theta_1 = 90$, b) ángulo de sensibilidad $\theta_1 = 75$

Tipo de relevador	Comparación de fase		Comparación de Amplitud	
	\bar{E}_1 (Operación)	\bar{E}_2 (Polarización)	\bar{E}_1 (Operación)	\bar{E}_2 (Polarización)
Direccional	$\bar{Z}_{ar\max} \bar{I}_r$	\bar{V}_r	$\bar{Z}_{ar\max} \bar{I}_r - \bar{V}_r$	$\bar{Z}_{ar\max} \bar{I}_r + \bar{V}_r$
Impedancia	$\bar{Z}_{ar} \bar{I}_r - \bar{V}_r$	$\bar{Z}_{ar} \bar{I}_r + \bar{V}_r$	$\bar{Z}_{ar} \bar{I}_r$	\bar{V}_r
Mho	$\bar{Z}_{ar\max} \bar{I}_r - \bar{V}_r$	\bar{V}_r	$\bar{Z}_{ar\max} \bar{I}_r$	$2\bar{V}_r - \bar{Z}_{ar\max} \bar{I}_r$
Mho Desplazado	$\bar{Z}_{ar\max} \bar{I}_r - \bar{Z}_d \bar{I}_r$	$\bar{V}_r - \bar{Z}_d \bar{I}_r$	$\bar{Z}_{ar\max} \bar{I}_r - \bar{Z}_d \bar{I}_r$	$2\bar{V}_r - \bar{Z}_{ar\max} \bar{I}_r - \bar{Z}_d \bar{I}_r$
Impedancia ángulo	$\bar{Z}_{ar\min} \bar{I}_r - \bar{V}_r$	$\bar{Z}_{ar\min} \bar{I}_r$	$2\bar{Z}_{ar\min} \bar{I}_r - \bar{V}_r$	\bar{V}_r

Tabla 1. Señales de comparación

El algoritmo de programación del relevador de distancia se representa mediante el diagrama de flujo de la figura 8. Las etapas de tratamiento digital de las señales de entrada fueron descritas en la sección de tratamiento digital de señales.

Determinados los fasores correspondientes a la componente fundamental del voltaje y la corriente, se forman las señales de comparación en función de la característica deseada, la condición de operación es establecida según lo descrito en la figura 6. La verificación de la condición de operación, así como la formación de las señales S_1 y S_2 , deberá realizarse para cada periodo de muestreo, es decir, para cada nueva muestra de la señal se forma la ventana de datos descartando la última muestra de la ventana, se determinan nuevos fasores y se evalúa la operación del relevador. Muchos fabricantes utilizan arrancadores del algoritmo para evitar un procesamiento continuo y sobrecarga del procesador (Gerhard, 1999).

Por ejemplo, estos arrancadores pueden ser detectores de falla de sobrecorriente. La decisión de disparo debe evaluarse; si esta condición se sostiene durante cierto número de muestras el contacto del relevador se cierra, energizando el circuito de disparo del interruptor de potencia. Con esto se evita la operación en falso del relevador ante oscilaciones de potencia que entran y salen de la característica o fallas en otras zonas de operación con penetración temporal.

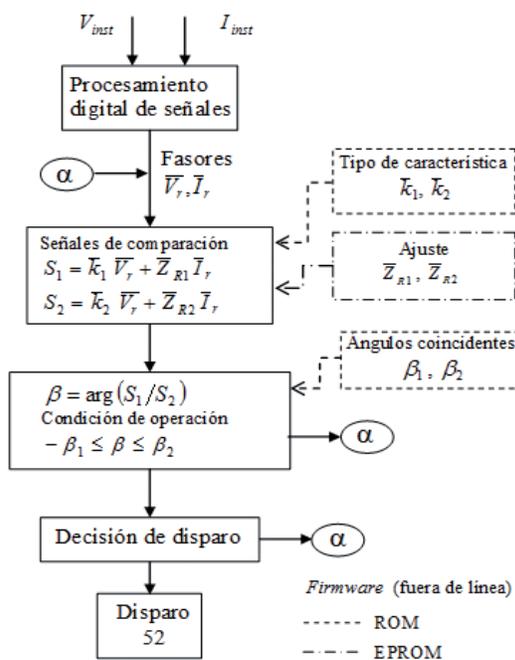


Figura 8. Algoritmo de un relevador de distancia con comparador de fase

Implementación algorítmica en un ambiente de programación gráfico

El programa general del relevador virtual fue programado en Labview (1997), su estructura funcional se muestra en el diagrama de la figura 9. Se conforman dos modos de prueba, uno para el diseño de la característica de operación y otro para el modo de evaluación mediante la lectura de archivos externos. En el modo de diseño se presentan las alternativas que permiten definir diferentes características de operación, la conformación y diseño de estas características se visualizan en el plano complejo impedancia. El modo de prueba permite extraer datos de archivos externos en formato ASCII generados en programas de simulación (como el EMTP, PSCAD, Matlab, etcétera), o de archivos de datos de registros de fallas reales para la reproducción y validación de la operación del relevador. La herramienta ofrece la versatilidad para la variación de parámetros de ajuste, filtrado analógico y digital. Posterior a la lectura de las señales se realiza el procesamiento digital de la señal tal como se describió en la sección anterior. En el algoritmo del relevador de distancia se define el tipo de característica y se realiza la detección de la condición de operación emitiendo la orden de disparo.

La subrutina de señalización realiza la emisión de la señal de disparo mediante la activación de controles luminosos en el panel frontal una vez cumplida la condición de operación y el tiempo de decisión de disparo. Esto se visualiza en el plano complejo impedancia.

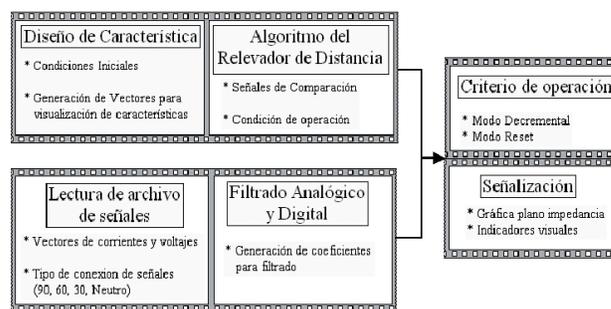


Figura 9. Estructura lógica de la implementación del relevador de distancia en una herramienta de programación gráfica

Actividades didácticas

Diseño de características de operación

En este modo de operación se define la característica de operación del relevador, se incluyen las características tipo impedancia, M_{ho} , M_{ho} -desplazada y Cuadrilateral (figura 10). En forma gráfica se indican las variables

involucradas en el diseño, los comparadores de fase y amplitud están incluidos. La característica de operación se muestra en el plano complejo impedancia.

En la figura 10 se presentan las características de operación obtenidas y los parámetros de ajuste que fue-

ron definidos. En el caso del diseño de la característica cuadrilateral, con la finalidad de igualar la versión de diseño de algunos relevadores comerciales se disponen cuatro comparadores. Con esto es posible tener cuatro grados de libertad para el diseño de la característica.

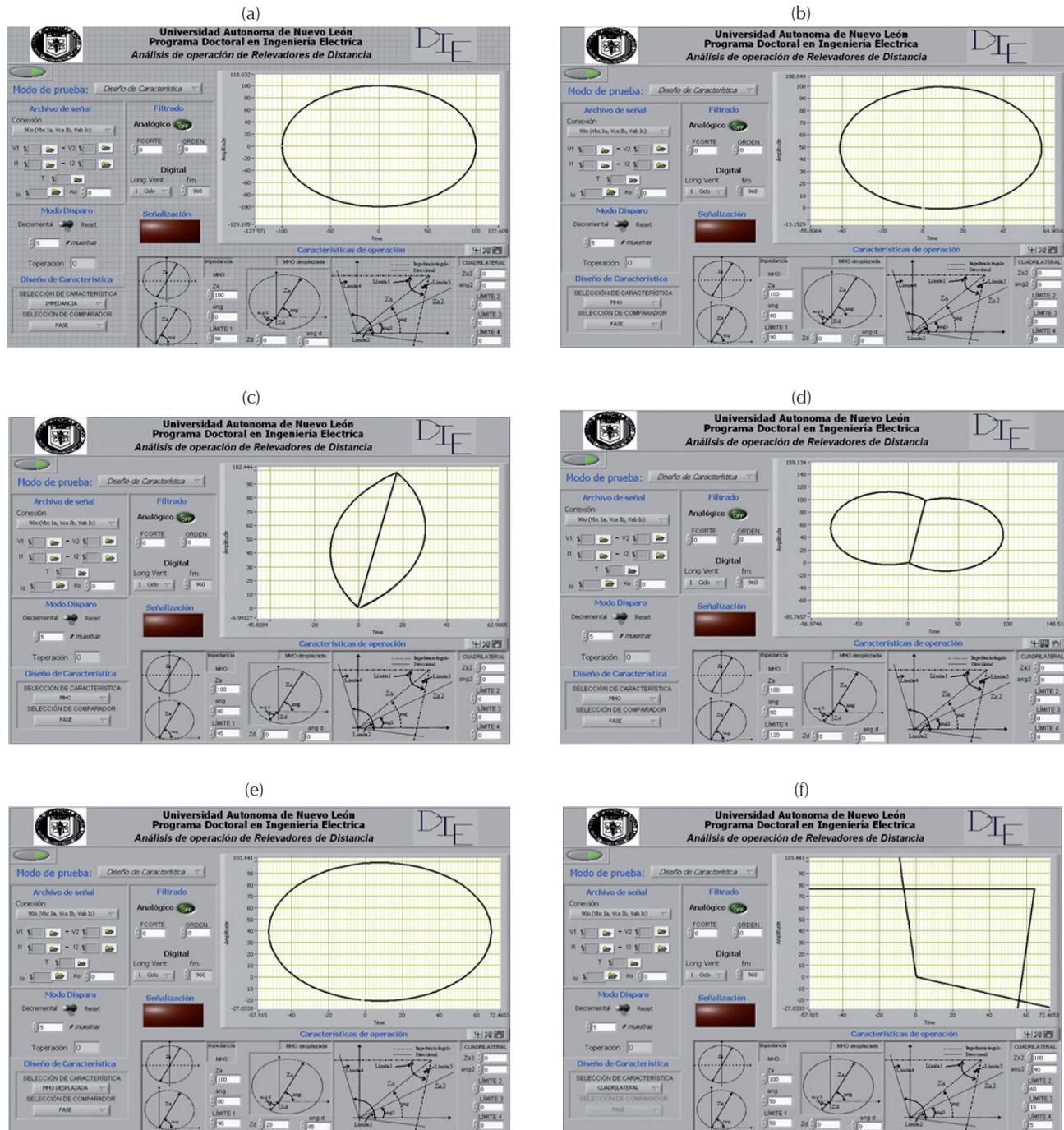


Figura 10. Diseño de características de operación en la herramienta gráfica, a) impedancia, b) Mho, c) lente, d) tomate, e) Mho desplazada, f) cuadrilateral

Validación de la operación de relevadores

El análisis de eventos se puede realizar mediante el registro de eventos reales o simulados. En este trabajo se utilizó una señal de prueba de un registro oscilográfico de un evento real en la red de 230 kV en el sistema interconectado nacional y el registro de operación de un relevador de distancia. La prueba tiene como objetivo reproducir la operación del relevador en campo a fin de validar su operación. Adicionalmente, por medio de la herramienta es posible la visualización de la cargabilidad de la red, así como la evaluación del ajuste y tipo de característica.

El registro corresponde a una falla monofásica en la fase *a* en línea de 230 kV con una impedancia serie de 480 Ω . El relevador de campo tiene una característica de operación tipo mho con una impedancia de arranque de valor $382 < 75^\circ \Omega$ (80% de la impedancia de línea). El registro del evento se muestra en la figura 11 utilizando una aplicación comercial.

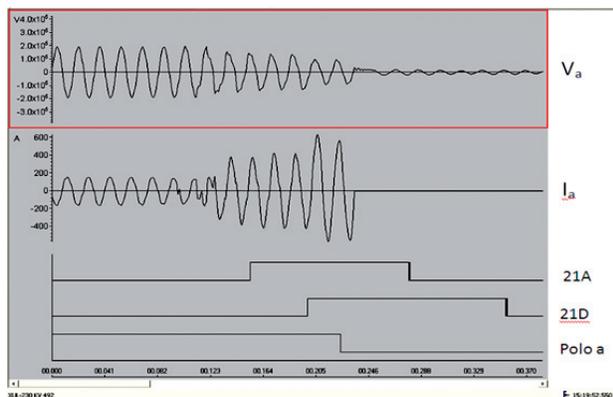


Figura 11. Registro de evento real

Comúnmente la visualización de la operación de relevadores se realiza por medio del registro del tiempo del accionamiento de contactos. En el esquema de protección utilizado en la línea fallada se dispone de un relevador electromecánico y un relevador digital como protección de doble primario, se observa que el tiempo de operación del relevador electromecánico es menor al digital, esto debido al retardo involucrado para el procesamiento de la señal (efecto de ventaneo) como se describió en la sección de estructura funcional. Como se puede observar en el registro del evento (figura 11), la secuencia de operación está dada por la detección de la falla en el relevador analógico, $1 \frac{1}{2}$ ciclo después de que ésta se presenta. El relevador digital realiza la detección $4 \frac{1}{2}$ ciclos después de presentarse la falla y 3 ciclos después de que el relevador analógico la detectara, la aper-

tura del polo *a* se realiza $6 \frac{1}{2}$ después de ocurrida la falla.

Del resultado obtenido (figura 12), se pueden mencionar las siguientes observaciones:

- El tiempo de operación del relevador virtual fue similar al relevador del evento real (21D). El tiempo de operación mostrado en la aplicación corresponde desde el inicio de la señal hasta la salida de disparo del relevador.
- Al igual que en el registro del evento real, el relevador virtual operó observando el evento atrás, debido a que se invirtió el flujo de potencia por el tipo de falla.
- La trayectoria que presenta la impedancia de falla no es una línea recta por el filtrado que se realiza sobre las señales eléctricas de entrada, esto aumenta el tiempo de operación en el relevador digital, lo cual se puede observar también en el registro del evento.

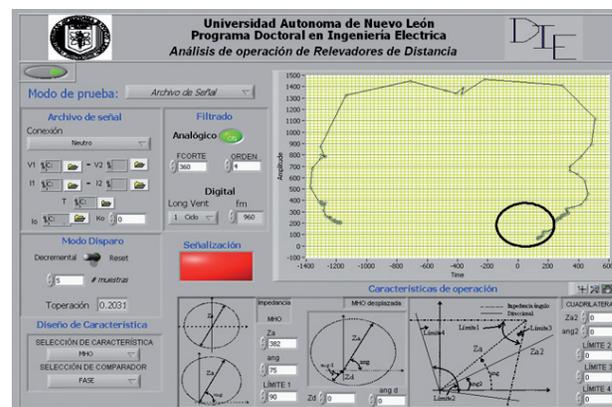


Figura 12. Reconstrucción de la operación de un relevador de distancia en un evento real

Simulación de falla en la aplicación comercial

En el software de simulación PSCAD se realizó la simulación de una falla y de una oscilación de potencia. Los eventos fueron almacenados en archivos de texto, se realizó el diezmado de la señal y la reproducción del evento en la aplicación propuesta.

La figura 13 muestra la visualización de la falla trifásica sólida simulada vista por el relevador de distancia, se incluye el efecto del filtro analógico y la ventana de muestreo de un ciclo (figura 13a) y dos ciclos (figura 13b). El efecto del tamaño de la ventana se puede cuantificar en el tiempo de operación, siendo mayor en la ventana de dos ciclos. La falla simulada fue sin resistencia. Diferentes condiciones pueden ser consideradas en

la herramienta de simulación para mostrar mediante un análisis visual el efecto de la resistencia de falla en la operación de la protección de distancia, así como el comportamiento con diferentes tipos de características.

La simulación de oscilaciones de potencia y su efecto en la operación de la protección de distancia puede apreciarse en la figura 14.

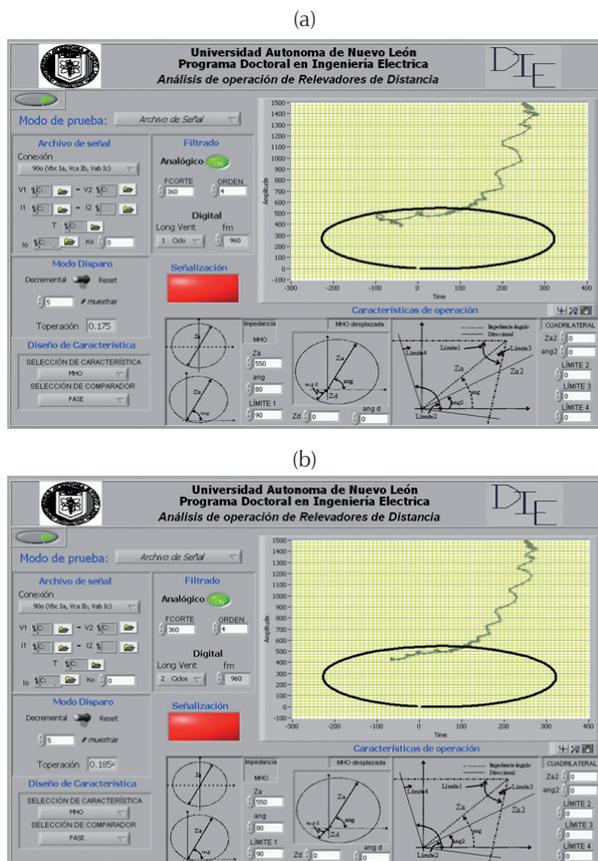


Figura 13. Simulación de una falla en PSCAD y visualización en la herramienta propuesta, a) ventana de datos de un ciclo, b) ventana de datos de dos ciclos

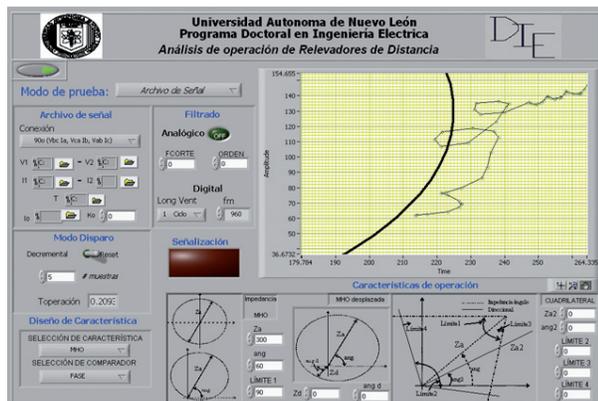


Figura 14. Simulación de una oscilación de potencia en PSCAD

Conclusiones

La herramienta de un relevador virtual propuesta en este trabajo ofrece alternativas didácticas que permiten el análisis del diseño de características de operación de relevadores de distancia y la evaluación funcional en estado dinámico ante diversas condiciones operativas, la interacción con diversos programas de simulación permite la exploración y análisis de un amplio espectro de eventos. Así, el efecto de diversos componentes del sistema tal como FACTS, aerogeneradores y limitadores de falla en el relevador de distancia pueden ser evaluados.

El modelado de un relevador de distancia en diversos programas comerciales de análisis resulta muchas veces limitado por la capacidad de estudio del mismo programa, la orientación de cada programa es diferente, así como las limitantes para la programación de algoritmos, por ejemplo, el desarrollo del algoritmo del relevador de distancia en EMTP resulta únicamente por el análisis del impacto de señales transitorias en la operación del relevador, otros escenarios y condiciones de operación no se pueden evaluar. Esta alternativa permite la aplicación de señales provenientes de diversas condiciones de operación sin necesidad de programar el modelado del relevador en diversas plataformas computacionales.

Referencias

- Alvarado F.L., Lasseter R.H., Liu Y. An Integrated Engineering Simulation Environment, en: Proceedings of the 1987 IEEE PICA Conference, (1987, Montreal, Canadá), pp 213-221.
- Alvarado F.L., Lasseter R.H., Kwon H., Mong S.K. A Module Oriented Emtf Interface. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 103(12):3488-3495, 1984.
- Brahma S., De La Ree J., Gers J., Girgis A.A., Horowitz S., Hunt R., Kezunovic M., Madani V., McLaren P., Phadke A.G., Sachdev M.S., Sidhu T.S., Thorp J.S., Venkata S.S., Wiedman T. The Education and Training of Future Protection Engineers: Challenges, Opportunities and Solutions. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 24(2):538-544, 2009.
- Cook V. *Analysis of Distance Protection*, 1ª ed., Inglaterra, RSP Gales, John Wiley and Sons Inc, 1985.
- Daneshdoost M., Shaat R. A Pc Based Integrated Software for Power System Education. *IEEE Transactions on Power Systems*, 4(3):1285-1292, 1989.
- Hirsch P.M. Interactive Graphics for Load Flow, en: IEEE Power Industry Computer Applications Conference Proceedings, (1977, Toronto, Canadá), pp 159- 165.
- Huang J.A., Galiana F.D. An Integrated Personal Computer Graphics Environment for Power System Education, Analysis

- and Design. *IEEE Transactions on Power Systems*, 6(3):1279-1285, 1991.
- Jian Y., Anderson M.D. Teaching Tool Shows Results Through Visualization [Power Systems Education]. *Computer Applications in Power*, IEEE, 11(1):37-42, 1998.
- Jordan J.A., Schlaepfer F.M. An Interactive Computing Environment for Power System Planning, en: IEEE Power Industry Computer Applications Conference Proceedings, (1997, Toronto, Canadá), pp 166-174.
- Lo C.H., Anderson M.D., Richards E.F. An Interactive Power System Analyzer with Graphics for Educational Use. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1(2):174-181, 1986.
- McLaren P.G., Mustaphi K., Benmouyal G., Chano S., Girgis A., Henville C., Kezunovic M., Kojovic L., Marttila R., Meisinger M., Michel G., Sachdev M.S., Skendzic V., Sidhu T.S., Tziouvaras D. Software Models for Relays. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 16(2):238-245, 2001.
- National Instruments (1997). *Labview User Guide Version 7.0*, Austin, National Instruments Corporation,
- Gerhard-Ziegler. *Numerical Distance Protection Principles and Applications*, Siemens AG, Berlín y Munich, 1999.
- Papadopoulos M., Hatziarfyriou N.D., Papadakis M.E. Graphics Aided Interactive Analysis of Radial Distribution Networks. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2(4):1297-1302, 1987.
- Peterson J.N., Wall R.W. Interactive Relay Controlled Power System Modeling. P. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 6(1):96-102, 1991.
- Proakis J.G., Manolakis D.G. *Tratamiento digital de señales*, Madrid, Prentice Hall, 1998.
- Salon S.H. An Interactive Computer Graphics Package for Electric Power Engineering Education. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 102 (7):1954-1959, 1983.
- Standard Requirements for Instrumentals Transformers*. IEEE Standard, C57.13-1993, 1993.
- Tziouvaras D.A., McLaren P., Alexander G., Dawson D., Esztergalyos J., Fromen C., Glinkowski M., Hasenwinkle I., Kezunovic M., Kojovic L., Kotheimer B., Kuffel R., Nordstrom J., Zocholl S. Mathematical Models for Current, Voltage, and Coupling Capacitor Voltage Transformers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 15(1):62-72, 2000.
- Wachal R.W., Tarnawecky M.Z., Swift G.W. A Power System Analysis Package for Students, Using Computer Graphics. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 103(2):445-448, 1984.
- Warrington A.R., Van C. *Protective Relays their Theory and Practice Volume Two*, England, Chapman and Hall, Londres, 1969.
- Wei-Jen L., Jyh-Cherng G., Ren-Jun L., Didsayabuttra P. A Physical Laboratory for Protective Relay Education. *IEEE Transactions on Education*, 45(2):182-186, 2002.
- Westinghouse Electric Corporation. *Applied Protective Relaying-A Silent Sentinels Publication*, Newark, N.J. Relay-Instrument Division, 1976.
- Yu D.C., Chen S.T., Bischke R.F. A Pc Oriented Interactive and Graphical Simulation Package for Power System Study. *IEEE Transactions on Power Systems*, 4(1):353-360, 1989.

Semblanza de los autores

Luis Alonso Trujillo-Guajardo. Se graduó como ingeniero mecánico electricista en la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) en 2005, y obtuvo el grado de maestro en ciencias de la ingeniería eléctrica con orientación en sistemas eléctricos de potencia en agosto de 2008 por la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (FIME). Actualmente es estudiante de doctorado en ingeniería eléctrica en el Programa Doctoral en Ingeniería Eléctrica en la FIME de la UANL donde también labora como profesor. Sus áreas de interés son el diseño y coordinación de protecciones de sistemas eléctricos de potencia, así como la operación y control de centrales de generación eólica y fuentes alternas de generación de energía eléctrica.

Arturo Conde-Enriquez. Se graduó como ingeniero mecánico electricista en la Universidad Veracruzana en 1993. Obtuvo la maestría en ciencias de la ingeniería eléctrica y el grado de doctor en ingeniería eléctrica en la Universidad Autónoma de Nuevo León en 1996 y 2002, respectivamente. Actualmente es profesor investigador del programa doctoral de ingeniería eléctrica de la FIME-UANL y es miembro del sistema nacional de investigadores.

Respuesta sísmica de estructuras adyacentes conectadas por amortiguadores viscosos lineales

Seismic Response of Adjacent Structures Connected by Linear Viscous Dampers

Pulido-Delgado J.L.

Facultad de Ingeniería Civil
Universidad Autónoma de San Luis Potosí,
San Luis Potosí, México
Correo: jpulido@uaslp.mx

Rodríguez-Cuevas C.

Facultad de Ingeniería Civil
Universidad Autónoma de San Luis Potosí,
San Luis Potosí, México
Correo: clemente.rodriguez@uaslp.mx

Martín Duran-García H.

Facultad de Ingeniería Civil
Universidad Autónoma de San Luis Potosí,
San Luis Potosí, México
Correo: hduran@uaslp.mx

Información del artículo: recibido: diciembre de 2010, aceptado: febrero de 2011

Resumen

Este estudio muestra la respuesta sísmica de dos estructuras adyacentes conectadas por amortiguadores lineales (con 5% de amortiguamiento), se tratan dos sistemas de un grado de libertad (SDOF) unidos el uno al otro por un amortiguador viscoso pasivo, los cuales fueron sometidos a un análisis de historias de tiempo. La excitación sísmica fue modelada como un proceso arbitrario no estacionario y la respuesta sísmica fue obtenida por simulaciones de Monte Carlo. En el caso de las estructuras conectadas por un amortiguador viscoso lineal, se encontró que las expresiones aproximadas existentes para evaluar la respuesta sísmica son cualitativamente correctas en sentido de que indican de manera correcta en qué casos el control de conexión es conveniente.

Abstract

This study shows the seismic response of two adjacent structures connected by linear viscous dampers (5% damped) SDOF systems linked to one another by a passive viscous damper was comprehensively evaluated through time history analysis. The seismic excitation was modelled as a non stationary random process, and the response of the structures was obtained by Monte Carlo simulations. It was found that existing approximate expressions to evaluate the seismic response are qualitatively correct in the sense that they rightly indicate in which cases the coupling control approach is indeed convenient.

Descriptorios

- estructuras adyacentes
- respuesta sísmica
- estructuras
- amortiguador viscoso lineal

Keywords

- adjacent structures
- seismic response
- structures
- linear viscous dampers

Introducción

Un enfoque creativo para el control de la respuesta sísmica de las estructuras adyacentes de un edificio de varios pisos, consiste en vincular los niveles con dispositivos de enlace. Al hacerlo, es posible en principio, controlar la respuesta de ambas estructuras al mismo tiempo que es precisamente el atractivo del estudio. La idea de vincular estructuras adyacentes una a otra con dispositivos pasivos ha sido considerada también como una estrategia para prevenir o mitigar los efectos de golpeteo (Westemo, 1989) y, más recientemente, como un medio para aplicar el llamado “*mass proportional*” complementario a un sistema de amortiguamiento (Trombetti y Silvestre, 2004).

Las investigaciones antes mencionadas, también han demostrado que la eficacia de la propuesta de control de conexión depende en gran medida de las propiedades de los edificios adyacentes (por ejemplo, periodos naturales y número de pisos) y en las propiedades de los conectores (por ejemplo, la relación fuerza-desplazamiento y la altura la distribución del mismo). El número de combinaciones posibles de la construcción y propiedades del conector es prácticamente ilimitado, pero sólo un número relativamente pequeño de casos fueron considerados en investigaciones anteriores (Zhu y Iemura, 2000; Luco y De Barros, 1988; Trombetti y Silvestre, 2004). En consecuencia, todavía existe la necesidad de caracterizar exhaustivamente la eficacia de la propuesta de control de conexión en función de las propiedades antes mencionadas, una necesidad que se ha abordado en un número limitado de estudios (Luco y De Barros, 1988). El sistema estructural de particular interés en este trabajo (es decir, el sistema se compone de dos estructuras adyacentes, o sistemas de un grado de libertad SDOF lineales conectados por un amortiguador viscoso) aparentemente fue investigado por Zhu y Lemura (2000). En esos estudios, las condiciones para minimizar la respuesta de una sola de las estructuras adyacentes (la estructura primaria) fueron analizadas y la estructura fue considerada como una simple estructura auxiliar. Más tarde, Hwang *et al.* (2007) investigaron las propiedades de amortiguación del sistema, Bhaskararao y Jangid (2007) obtuvieron expresiones aproximadas para la respuesta de la media cuadrada fija teniendo en cuenta que:

- la excitación es un ruido blanco estacionario y
- los sistemas SDOF adyacentes son amortiguados.

El objetivo de este estudio es proporcionar información sobre la eficacia de la propuesta de control de conexión,

a veces conocido como el “método de control conectado” (Makita *et. al.*, 2007), para controlar la respuesta sísmica de estructuras adyacentes conectadas por amortiguadores lineales.

Desarrollo

La excitación sísmica se modela como un proceso de Gauss, que es un proceso aleatorio no estacionario de media cero $\ddot{U}_g(t)$, cuya función de densidad espectral de potencia $S_{\ddot{U}_g}(t, \omega)$ viene dada por:

$$S_{\ddot{U}_g}(t, \omega) = |f_e(t)|^2 S_g(\omega) \quad (1)$$

donde:

- t denota el tiempo,
- ω indica la frecuencia circular,
- $f_e(t)$ es un modulador (también conocido como “ventana”) de la función del tiempo y
- $S_g(\omega)$ es una función de densidad espectral de potencia estacionaria.

La función de la modulación $f_e(t)$, se supone que es igual a la inicialmente propuesta por Saragoni y Hart (1974) y más tarde calibrado por Boore (1983).

En este estudio, las constantes η y ξ son iguales a 0.05 y 0.20, respectivamente, T_D es la duración igual a 30 segundos. La función de densidad de potencia espectral (PSD) se supone igual a la definida por la función de Kanai-Tajimi (también conocida como función Clough-Penzien, (2003).

$$S_g(\omega) = \left[\frac{\omega_g^4 + 4\xi_g^2 \omega_g^2 \omega^2}{(\omega_g^2 - \omega^2)^2 + 4\xi_g^2 \omega_g^2 \omega^2} \right] \left[\frac{\omega^4}{(\omega_f^2 - \omega^2)^2 + 4\xi_f^2 \omega_f^2 \omega^2} \right] S_O \quad (2)$$

en este estudio, las constantes ω_g , ξ_g , ω_f , ξ_f y S_O son igual a 12.50 rad/s, 0.60, 2.00 rad/s, 0.70 y $S_O = 200 \text{ cm}^2/\text{seg}^3$, respectivamente. La frecuencia principal ω_m (es decir, la frecuencia con que $S_g(\omega)$ toma su valor máximo) es igual a 10.26 rad/s, y los periodos principales T_m asociados con la frecuencia principal de 0.60s; considerando las aceleraciones sísmicas registradas para un suelo firme. El sistema estructural considerado en este estudio está representado esquemáticamente en la figura 1, en donde las dos estructuras adyacentes y los sistemas lineales SDOF “1” y “2” están conectados entre sí

por un amortiguador viscoso. Cada sistema SDOF se caracteriza por sus periodos naturales T y el coeficiente de amortiguamiento ξ . La relación de los periodos naturales está dada por:

$$\beta = \frac{T_1}{T_2} \quad (3)$$

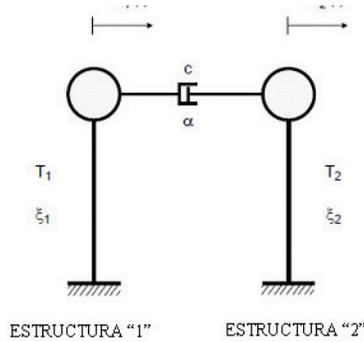


Figura 1. Sistema lineal de edificios conectados por amortiguamiento viscoso

Se supone que la estructura "1" siempre es la más flexible, por lo tanto, $T_1 > T_2$ y $\beta > 1$. Del mismo modo, m_1 es la masa de la estructura "1" y m_2 es la masa de la estructura "2", la relación de masa está dada por:

$$\mu = \frac{m_1}{m_2} \quad (4)$$

Las dos cantidades de respuesta consideradas son: el desplazamiento (con relación al suelo) y la aceleración absoluta. El primero puede asociarse con el nivel de daño en la estructura principal y la otra puede estar asociada con la demanda sísmica en los componentes estructurales, unidos a la estructura principal. Dadas las variables en el tiempo de respuesta del sistema acoplado a cada realización del proceso de excitación, se obtiene numéricamente una solución del problema (integración directa, algoritmo modificado tipo Newmark) y la ecuación correspondiente de movimiento, que se ha presentado en estudios anteriores (Zu y Iemura, 2000). Para una realización dada del proceso de excitación, la demanda del tiempo relacionada con la fuerza del conector viene dada por:

$$f(t) = c \operatorname{sign}(v_2(t) - v_1(t)) |v_2(t) - v_1(t)|^\alpha \quad (5)$$

dada la función sign , $v_1(t)$ y $v_2(t)$ son las variables de las respuestas de velocidad en el tiempo de las estructuras de "1" y "2" (con referencia al suelo), c y α , son el coeficiente de amortiguamiento y un exponente de la veloci-

dad del conector del amortiguamiento, respectivamente; el correspondiente valor medio de la respuesta de F_d . En el caso particular de que el amortiguador de la conexión sea lineal (es decir, $\alpha = 1$), la ecuación anterior se reduce a:

$$f(t) = c(v_2(t) - v_1(t)) \quad (6)$$

Se realizaron un total de 1200 procesos de excitación y los valores de los factores de amortiguamiento ξ_1 y ξ_2 fueron en todos los casos iguales a 5%.

Evaluación preliminar de la eficacia de control de conexión

Como se mencionó antes, Bhaskararao y Jangid (2007) obtuvieron expresiones cercanas para la respuesta media cuadrática estacionaria del sistema acoplado, como se ilustra en la figura 1; en donde se considera que:

- a) la excitación es un ruido blanco estacionario,
- b) los sistemas SDOF adyacentes no son amortiguados (es decir, $\xi_1 = \xi_2 = 0$) y
- c) el conector de amortiguamiento es lineal.

Con base en estas expresiones, Bhaskararao y Jangid (2007) obtuvieron las ecuaciones que dan el valor óptimo de c_{Bf} (en otras palabras, c_{Bf} es el valor de c que minimiza la respuesta). El valor óptimo c_{Bf} dependerá de la cantidad de respuesta (por ejemplo, el valor de c que minimiza el desplazamiento de respuesta no es igual al valor de c que minimiza la respuesta de aceleración absoluta) en el sistema SDOF considerado (es decir, el valor de c que minimiza la respuesta del sistema "1" no es igual al valor de c que minimiza la respuesta del sistema "2").

Curiosamente, basándose en la observación de los resultados numéricos, Bhaskararao y Jangid (2007) señalan que cuando el coeficiente de amortiguamiento de los dos sistemas SDOF es relativamente pequeño ($\xi_1, \xi_2 \leq 0.05$), la respuesta de la media cuadrada correspondiente es esencialmente igual a la que corresponde al caso en $\xi_1 = \xi_2 = 0$, siempre que el valor del coeficiente de amortiguamiento c del conector se encuentra cerca del valor óptimo de c_{Bf} . Suponiendo entonces que la respuesta de la media cuadrada es ligeramente amortiguada junto al sistema SDOF que viene dada por las expresiones obtenidas por Bhaskararao y Jangid (2007), y suponiendo que la relación de la respuesta media de los picos (durante un tiempo limitado) a la raíz media cuadrada (RMS) la respuesta es una constante (un supuesto importante de la conocida y ampliamente utili-

zada *regla combinación modal* (CQC) (Wilson *et al.*, 1981). Expresiones aproximadas para evaluar preliminarmente la eficacia del control de conexión se pueden obtener de la siguiente manera: cuando un amortiguador, desacoplado en el sistema SDOF, está sometido a la excitación estacionaria de ruido blanco, la respuesta de RMS (media cuadrada) correspondiente al desplazamiento viene dada por Clough y Pienzen (2003) como:

$$\sigma_D = \sqrt{\frac{T^3 S_0}{16 \xi \pi^2}} \quad (7)$$

y se puede demostrar que la RMS correspondiente de la respuesta de aceleración absoluta es igual a:

$$\sigma_A = \sqrt{\frac{\pi^2 S_0 (1 + 4 \xi^2)}{\xi T}} \quad (8)$$

usando las ecuaciones (7) y (8) y las expresiones aproximadas para la respuesta de la media cuadrada acoplado obtenidas por Bhaskararao y Jangid (2007):

$$\sigma_{x1opt}^2 = \frac{2\pi S_0}{\omega_1^3 (\beta^2 - 1)} \sqrt{\frac{(1 + \mu)^3}{\mu}} \quad (9)$$

$$\sigma_{x2opt}^2 = \frac{2\pi S_0}{\omega_2^3 (\beta^2 - 1)} \frac{\beta^2 \sqrt{(1 + \mu)^3}}{\bar{\omega}}$$

las relaciones aproximadas de la RMS junto a la respuesta de RMS desacoplados se dan por:

$$C_{D-1} = \sqrt{\frac{4 \xi_1}{\beta^2 - 1} \sqrt{\frac{(1 + \mu)^3}{\mu}}} \quad (10)$$

(respuesta de desplazamiento del sistema "1")

$$C_{D-2} = \sqrt{\frac{4 \xi_2}{\beta^2 - 1} \frac{\beta^2 \sqrt{(1 + \mu)^3}}{\mu}} \quad (11)$$

(respuesta de desplazamiento del sistema "2")

$$C_{A-1} = \sqrt{\frac{4 \xi_1 (\beta^2 - \mu)}{(4 \xi_1^2 + 1)(\beta^2 - 1)} \sqrt{\frac{1 + \mu}{\mu}}} \quad (12)$$

(respuesta de la aceleración absoluta del sistema "1")

$$C_{A-2} = \sqrt{\frac{4 \xi_2 (\beta^2 + \mu)}{(4 \xi_2^2 + 1)(\beta^2 - 1)} \sqrt{\frac{1 + \mu}{\mu}}} \quad (13)$$

(respuesta de la aceleración absoluta del sistema "2")

Las cantidades C en las ecuaciones anteriores se pueden considerar como "factores de modificación de respuesta", en el sentido de que indican directamente el efecto de la conexión del amortiguador en la respuesta sísmica de un sistema adyacente de SDOF. Los valores de C menores que la unidad indican que la adición de la respuesta del conector de amortiguamiento se reduce; mientras que se indique lo contrario los valores de C son mayores que la unidad. Además, el valor menor de C es el más beneficioso por el efecto del conector de amortiguamiento (es decir, mayor nivel de reducción de la respuesta). Hay que tener en cuenta que:

- Las ecuaciones 10-13 se obtienen tomando en cuenta el caso particular de que el valor del coeficiente de amortiguamiento C (figura 1) es igual a la c_{Bj} , el valor óptimo de C en las condiciones consideradas por Bhaskararao y Jangid (2007) (excitación de ruido blanco estacionario, $\xi_1 = \xi_2 = 0$) y
- Los valores de C dados por las ecuaciones 10-13 deben considerarse como una aproximación, ya que se obtuvieron por medio de la respuesta de RMS no amortiguada (es decir, $\xi_1 = \xi_2 = 0$), junto al sistema SDOF para la respuesta de RMS del sistema amortiguado desacoplado SDOF ($\xi_1 = \xi_2 = 0$).

Un gran conjunto de valores de C se calculó con las ecuaciones 10-13 teniendo en cuenta la amplia gama de valores de los parámetros pertinentes (relación de períodos β y la relación de masas μ) (tabla 1). Los factores de amortiguamiento ξ_1, ξ_2 se hacen iguales a 0.05. Los resultados se resumen en las regiones de la banda sombreada que se muestra en la figura 2.

En la figura 2, las bandas más oscuras (rojas o $C > 1.00$) indican las combinaciones de valores de β y μ cuando el control de conexión no es conveniente. Las bandas que siguen menos oscuras (verdes o $0.80 \leq C \leq 1.00$), por su parte, indican las combinaciones de valores de β y μ cuando el control de conexión es realmente eficaz, los otros tres sombreados menos oscuros indican mayor reducción de los niveles de respuesta. En el caso de la estructura más flexible (es decir, la estructura "1"), se puede observar que el enfoque de control de conexión siempre reduce la respuesta, excepto cuando el valor de la relación del periodo β es cercana a la unidad. El nivel de reducción de la respuesta depende principalmente del valor de β (en un sentido general, cuanto mayor sea el valor de β , mayor es el nivel de reducción de respuesta de μ) y sólo marginalmente depende de la masa (para un valor dado de β , el nivel de reducción de la respuesta generalmente aumenta con la disminución de los valores de μ). En el caso de la estructura rígida

Periodos Naturales	Caso "A" $\beta = 4, \mu = 2$	Caso "B" $\beta = 4, \mu = 0.15$	Caso "C" $\beta = 1.2, \mu = 8$
Largo	$T_1 = 3.60$ seg $T_2 = 0.90$ seg	$T_1 = 3.60$ seg $T_2 = 0.90$ seg	$T_1 = 2.40$ seg $T_2 = 2.00$ seg
Intermedio	$T_1 = 0.96$ seg $T_2 = 0.24$ seg	$T_1 = 0.96$ seg $T_2 = 0.24$ seg	$T_1 = 0.66$ seg $T_2 = 0.55$ seg
Corto	$T_1 = 0.48$ seg $T_2 = 0.12$ seg	$T_1 = 0.48$ seg $T_2 = 0.12$ seg	$T_1 = 0.24$ seg $T_2 = 0.20$ seg

Tabla1. Resumen de las combinaciones de β, μ, T_1 y T_2

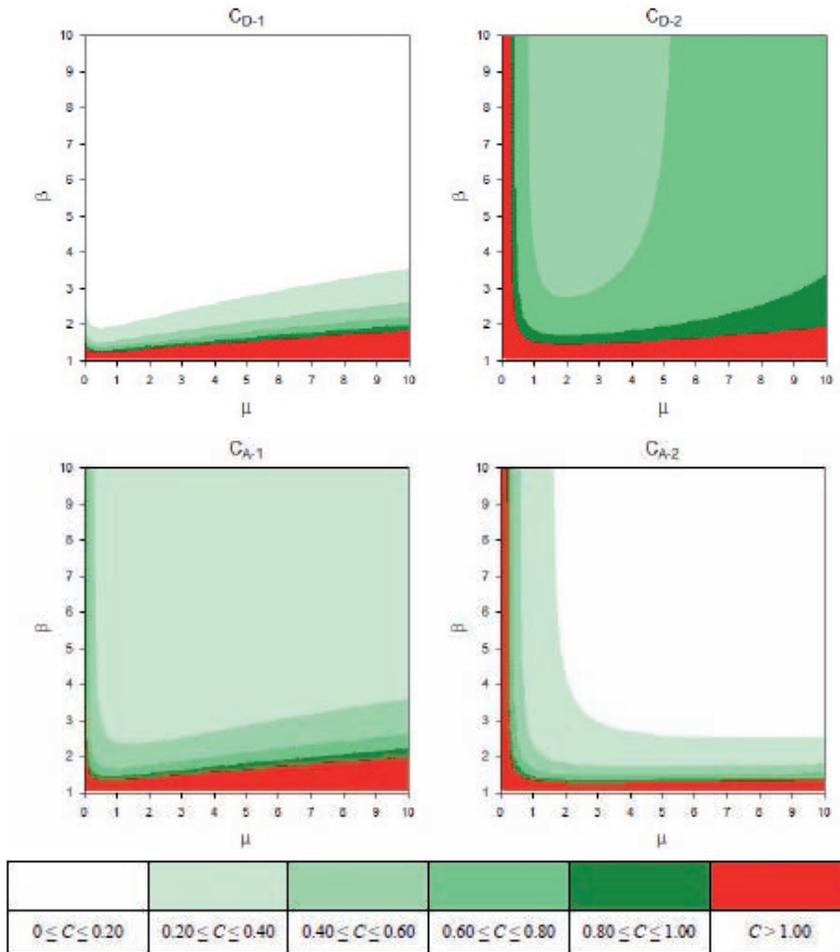


Figura 2. Regiones de valores del factor de modificación de la respuesta aproximada C

(es decir, la estructura "2") se observa que el control de conexión reduce la respuesta, excepto cuando: a) el valor de la relación del periodo β es cercana a la unidad y b) el valor de la proporción de la masa μ es relativamente baja. Esta última observación significa que el enfoque de control de conexión no reduce la respuesta de la estructura más rígida cuando su masa es mayor que la masa de la estructura más flexible, independientemente del valor de la relación del periodo. El nivel de reducción de respuesta en la estructura "2" no sólo depende

del valor de β , sino también del valor de μ . En el caso de la respuesta de la aceleración absoluta, la eficacia de la propuesta de control de conexión aumenta generalmente con valores crecientes de los β y μ . En el caso de la respuesta de desplazamiento, el nivel de reducción de la respuesta más general aumenta con el incremento de los valores de β , pero no parece ser ahora un valor óptimo de μ , aproximadamente igual a 2.

Para concluir, es quizás oportuno mencionar que la ineficacia de la propuesta de control de conexión ocurre

cuando el valor de la relación del periodo es cercana a la unidad (es decir, cuando los periodos naturales de las estructuras adyacentes están cerca uno del otro como fue señalado por Christenson., *et al* (2006).

Resultados y discusión

Por las observaciones realizadas, es de interés investigar la respuesta a la excitación sísmica real, que no es estacionaria ni tiene las características de ruido blanco. Lamentablemente no fue posible considerar todas las posibles combinaciones de todos los valores posibles de los parámetros pertinentes (β y μ). Sin embargo, basándose en los resultados descritos, tres casos de interés particular ("A", "B" y "C") fueron seleccionados y examinados exhaustivamente. En el primer caso ($\beta = 4$, $\mu = 2$) la propuesta de control de conexión fue reducir significativamente la respuesta de ambas estructuras. En el segundo caso ($\beta = 4$, $\mu = 0.15$), la propuesta de control de conexión fue reducir significativamente la respuesta de la estructura "1", pero no la respuesta de la estructura "2" (de hecho, la evaluación preliminar realizada en la sección anterior indica que la respuesta de la estructura "2" en realidad aumenta en este caso). Por último, en el tercer caso, ($\beta = 1.2$, $\mu = 8$) la propuesta de control de conexión no espera reducir significativamente la respuesta de ninguna estructura (de nuevo, la evaluación preliminar realizada en la sección anterior indica que la respuesta de ambas estructuras realmente aumenta en este caso). En el primer caso, T_1 y T_2 son "largos" en el sentido de que sus valores son mayores que el valor de T_m . En el segundo caso, T_1 y T_2 se consideran como "intermedios" en el sentido de que $T_1 > T_m$ pero $T_2 < T_m$. Por último, en el tercer caso, T_1 y T_2 son "cortos" en el sentido de que sus valores son inferiores a T_m . Las combinaciones resultantes de los valores de β , μ , T_1 y T_2 se resumen en la tabla 1. Conviene recordar que el periodo principal de la excitación sísmica considerado en este estudio es $T_m = 0.60$ s.

La respuesta de los sistemas adyacentes SDOF lineales ($\xi_1 = \xi_2 = 0.05$) conectados por un amortiguador viscoso *lineal*, sometido a la excitación sísmica y considerados en este estudio, se obtiene con simulaciones de Monte Carlo, considerando los valores de C que van desde 0 (para un sistemas SDOF desacoplado) hasta un valor aproximado de tres veces el valor óptimo de c_{BJ} propuesto por Bhaskararao y Jangid (2007). En todos los casos, el valor de la masa de la estructura rígida fue igual a la unidad y los valores de las propiedades estructurales restantes se calcularon teniendo en cuenta los valores correspondientes de β , μ , T_1 y T_2 , ξ_1 y ξ_2 y los valores de los factores de respuesta de modificación C

se obtuvieron numéricamente, dividiendo la media de los picos junto a la respuesta de la media de los picos desacoplada. Los resultados se resumen en la figuras 3, 4 y 5, donde los valores de C están normalizados por el valor correspondiente de c_{BJ} . Para propósitos de comparación, los valores aproximados de C , se calcularon dividiendo el RMS junto a la respuesta obtenida por Bhaskararao y Jangid (2007) por el RMS desacoplado (ecuaciones 7 y 8), también incluidos. Cabe señalar que los valores aproximados de C se calculan para todos los valores de C , no sólo para c_{BJ} . Por lo tanto, las expresiones derivadas de Bhaskararao y Jangid (2007), son válidos para $\xi_1 = \xi_2 = 0$, se puede suponer también que es válida para $\xi_1 = \xi_2 > 0$ cuando $C = c_{BJ}$. Cabe señalar que los valores aproximados de C dependen del valor de la relación de periodos β , pero son independientes de los valores reales de T_1 y T_2 , (es por eso que sólo hay una serie de valores aproximados de C en cada uno de las regiones muestra (figuras 3-5).

Los resultados correspondientes al caso "A" (figura 3) indican que la respuesta de ambas estructuras es realmente reducida. Los resultados correspondientes al caso "B" (figura 4) muestran que la propuesta de control de conexión reduce la respuesta de la estructura "1", pero no (al menos no significativamente) la respuesta de la estructura "2". Por último, los resultados correspondientes al caso "C" (figura 5) indican que, según lo previsto, la propuesta de control de conexión no reduce la respuesta de ninguna estructura. Los resultados de la muestra en las figuras 3-5; sin embargo, también indican que el nivel de reducción de la respuesta estimada por las ecuaciones 10 a 13 puede ser cuantitativamente incorrecto.

Las ecuaciones 10 a 13 predicen que el control de conexión aumenta la respuesta (la estructura "2" en el caso de "B", ambas estructuras en el caso de "C"), las simulaciones de Monte Carlo, en cambio, indican una muy pequeña (casi imperceptible) reducción de respuesta alcanzada. En las regiones correspondientes a estas situaciones, los valores aproximados de C están a veces fuera de la escala de las regiones. Los resultados se muestran en las figuras 3-5, también revelan que el nivel de reducción de respuesta no depende de la relación entre los periodos naturales T_1 , T_2 y el periodo principal de la excitación T_m , en particular, para situaciones en las que se consiguen reducciones de respuesta significativa. El enfoque de control de conexión resultó ser más eficaz para reducir la respuesta de la estructura más flexible (es decir, la estructura de "1"), cuando ambos T_1 , T_2 son "cortos", y más eficaz para reducir la respuesta de la estructura rígida (es decir, la estructura "2"), cuando ambos T_1 , T_2 son "largos".

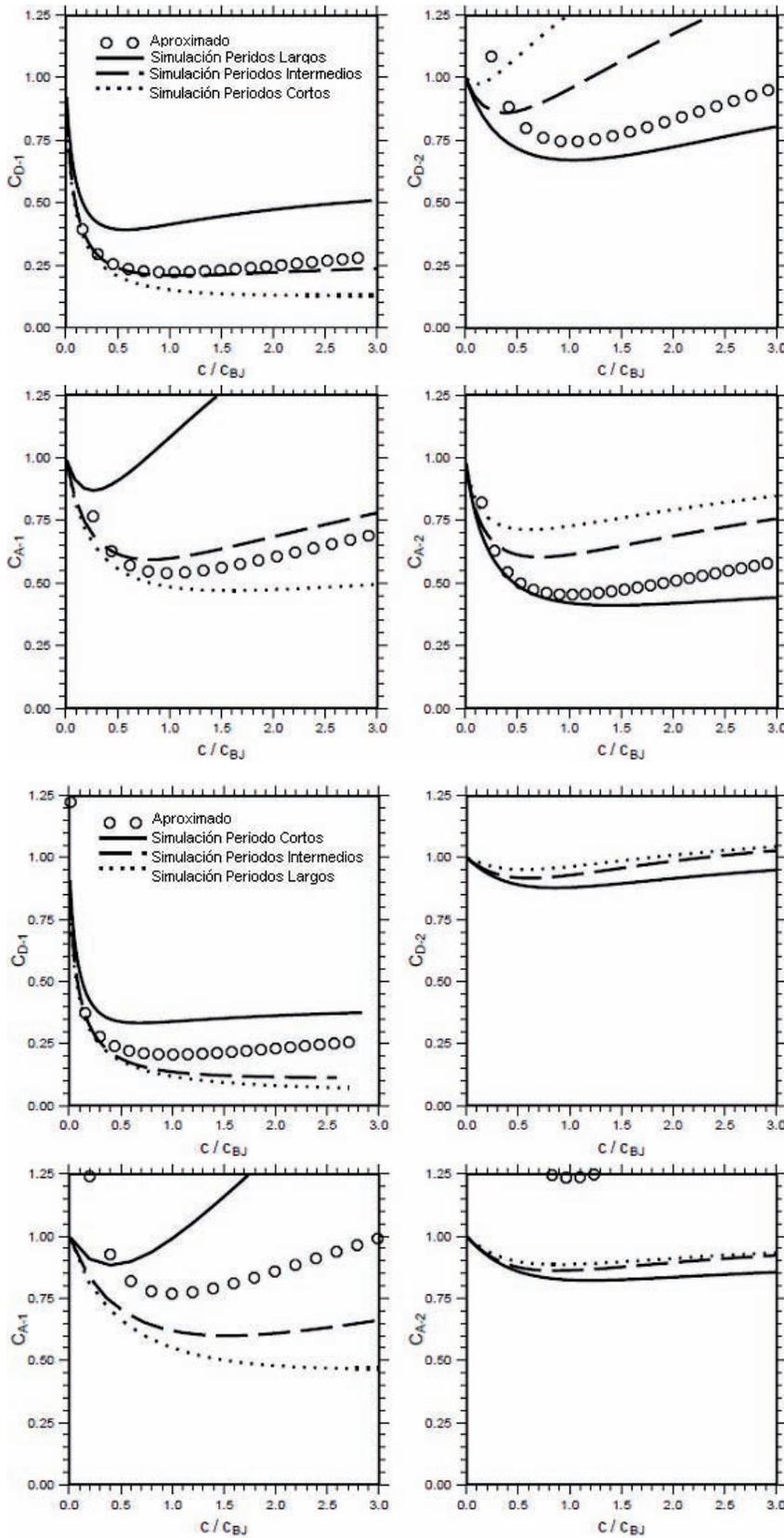


Figura 3. Comparación entre la respuesta de factores modificados C: caso "A" ($\beta=4, \mu=2$) para valores aproximados (Bhaskararao y Jangid, 2007), periodos largos, intermedios y cortos

Figura 4. Comparación entre la respuesta de factores modificados C: caso "B" ($\beta=4, \mu=0.15$) para valores aproximados (Bhaskararao y Jangid, 2007), periodos largos, intermedios y cortos

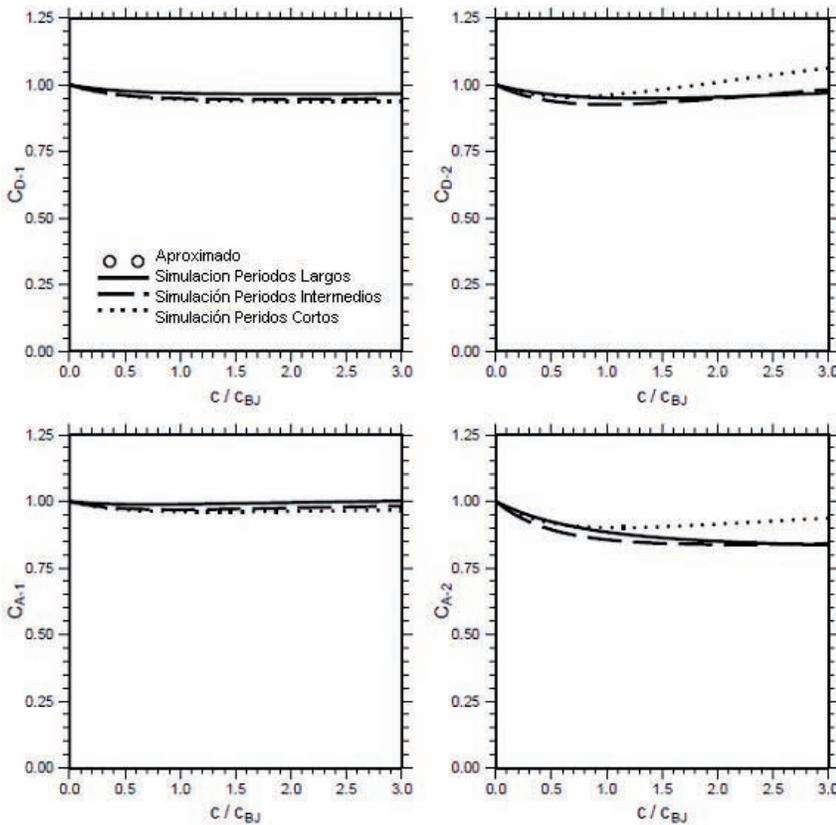


Figura 5. Comparación entre la respuesta de factores modificados C: caso “C” ($\beta=1.2, \mu=8$) para valores aproximados (Bhaskararao y Jangid, 2007), periodos largos, intermedios y cortos

Los resultados mostrados en la figura 3 son alentadores en el sentido de que muestran cuándo los valores de β y μ son adecuados, entonces es realmente posible controlar la cantidad de respuesta en ambas estructuras al mismo tiempo. No hay que olvidar; sin embargo, que los valores de C se normalizaron por el valor de C_{Bj} , que es diferente para cada cantidad de respuesta en cada estructura. Por lo tanto, las regiones mostradas en la figura 3 no proporcionan información sobre la gama de valores de C , ya que las cantidades de respuesta en am-

bas estructuras al mismo tiempo se reducen. Con el fin de abordar esta cuestión, los resultados de la figura 3 se representan de nuevo en un formato diferente en la figura 6. Se puede observar que efectivamente existe un rango de valores de C para que las reducciones se logran en las cantidades de respuesta de ambas estructuras (es decir, los valores de todos los factores C son menores que la unidad), o sea que resultó ser un rango relativamente pequeño de valores relativamente pequeños de C .

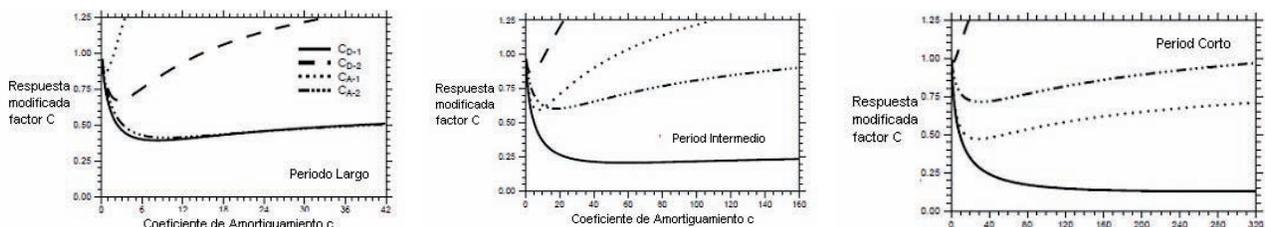


Figura 6. Comparación entre la respuesta de factores modificados C: caso “A” ($\beta=4, \mu=2$)

Conclusiones

En este estudio, la respuesta sísmica de dos sistemas SDOF adyacentes, lineales (con 5% de amortiguamiento) para un suelo firme, conectado entre sí por un amortiguador viscoso pasivo fue ampliamente evaluado a través del análisis de la historia-tiempo. La excitación sísmica se modeló como un proceso aleatorio no estacionario y la respuesta de las estructuras se obtuvo mediante simulaciones Monte-Carlo. El amortiguador de conexión se caracteriza por su coeficiente de amortiguamiento C y su exponente velocidad $\alpha=1$. Si los periodos naturales de las estructuras adyacentes "1" y "2" son T_1 y T_2 , respectivamente, y $T_1 > T_2$, la eficacia de la propuesta de control de conexión puede caracterizarse en términos generales como sigue:

- Es posible reducir significativamente la respuesta de la estructura más flexible cuando T_1 y T_2 no están cerca uno de otro, sobre todo cuando ambos T_1 y T_2 son "cortos" respecto al periodo principal de la excitación.
- También es posible reducir significativamente la respuesta de la estructura más rígida, cuando T_1, T_2 no están cerca uno del otro y la masa de la rígida estructura no es significativamente mayor que la de la estructura más flexible, sobre todo cuando ambos T_1 y T_2 son "largos" respecto al periodo principal de la excitación.

Referencias

Bhaskararao A., Jangid R. Optimum Viscous Damper for Connecting Adjacent SDOF Structures for Harmonic and Stationary White-Noise Random Excitations. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 36(4):563-571, 2007.

Boore D.M. Stochastic Simulation of High-Frequency Ground Motions Based on Seismological Models of the Radiated Spectra. *Bulletin of Seismological Society of America*, 73(6A):1865-1894, 1983.

Christenson R., Spencer B., Johnson E., Seto K. Coupled Building Control Considering the Effects of Building/Connector Configuration. *Journal of Structural Engineering*, 132(6):853-863, 2006.

Clough R., Penzien J. *Dynamics of structures*, Berkeley, USA, 2003, 260 p.

Hwang J., Wang S., Huang Y. A Seismic Retrofit Method by Connecting Viscous Dampers for Microelectronics Factories. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 36(11):1461-1480, 2007.

Luco J., De Barros F. Optimal Damping Between Two Adjacent Elastic Structures. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 27(7):649-659, 1998.

Makita K., Christenson R., Seto K., Watanabe T. Optimal Design Strategy of Connected Control Method for Two Dynamically Similar Structures. *Journal of Engineering Mechanics*, 133(12):1247-1257, 2007.

Saragoni G.R., Hart G.C. Simulation of Artificial Earthquakes. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2(3):249-267, 1974.

Trombetti T., Silvestri S. Added Viscous Dampers in Shear-Type Structures: The Effectiveness of Mass Proportional Damping. *Journal of Earthquake Engineering*, 8(2):275-313, 2004.

Westemo B. The Dynamics of Inter Structural Connection to Prevent Pounding. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 18(5):687-699, 1989.

Wilson E., Der-Kiureghian A., Bayo E. A Replacement for the SRSS Method in Seismic Analysis. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 9(2):187-194, 1981.

Zhu H., Iemura H. A Study of Response Control on the Passive Coupling Element Between two Parallel Structures. *Structural Engineering & Mechanics*, 9(4):383-396, 2000.

Semblanza de los autores

José Luis Pulido-Delgado: Ingeniero civil por la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro (1993). Obtuvo su maestría en ingeniería por la misma Universidad (1997), se doctoró por la Universidad Estatal de Construcción de Rostov, Rusia en 2001. Actualmente es profesor investigador de la UASLP.

Clemente Rodríguez-Cuevas: Ingeniero civil por la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (2000). Obtuvo la maestría en ingeniería por el Departamento de Estudios de Posgrado de Facultad de Ingeniería de la UNAM en 2003. Es doctor por la Universidad Aix-Marseille III (2007). Actualmente es profesor investigador de la UASLP.

Héctor Martín Durán-García: Es ingeniero agrónomo especialista en maquinaria agrícola por la Universidad Autónoma Chapingo. Maestro en ingeniería mecánica por la Universidad de Guanajuato y doctor por la Universidad Politécnica de Madrid. Actualmente es profesor investigador de la UASLP.

Diseño y construcción de un sistema de lavado en vivo para los aisladores de transformadores

Design and Construction of a Live Insulator Washing System for Transformers

Lizama-Cámara Y.A.

*Facultad de Ingeniería
Universidad Veracruzana
Correo: yahir_lizama@ieee.org*

Mendieta-Antúnez J.A.

*Industrias IEM
Tlalnepantla, Estado de México,
Correo: amendieta.antunez@gmail.com*

Blanco-Brisset E.

*Industrias IEM
Tlalnepantla, Estado de México,
Correo: unamanu@hotmail.com*

Olivares-Galván J.C.

*Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco
Correo: jolivare_1999@yahoo.com*

Escarela-Pérez R.

*Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco
Correo: r.escarela@ieee.org*

Información del artículo: recibido: septiembre de 2010, aceptado: abril de 2011

Resumen

A lo largo de la historia de la industria eléctrica se han desarrollado diferentes métodos de limpieza para evitar las fallas de los aisladores de los transformadores debido a la contaminación. Este artículo describe los principales métodos de limpieza aplicables a los aisladores de transformadores, enfatizando el sistema de lavado en vivo tipo fijo con agua a alta presión, método que fue aplicado para realizar la limpieza de los aisladores en el banco de transformadores de 900 MVA de la central eléctrica "Laguna Verde", ubicada en el estado de Veracruz, en México. Se propone una metodología para la limpieza de los aisladores de transformadores, donde se identifican las principales variables a tomar en cuenta (el nivel de tensión de los transformadores, nivel de contaminación de los aisladores, determinación del tiempo óptimo de lavado, cantidad de precipitación de agua, presión óptima del chorro de agua, máxima conductividad del agua y las velocidades de los vientos) y se dan valores de referencias de éstas. Además se presenta un análisis económico al aplicar un método de este tipo en una subestación eléctrica.

Descriptor

- métodos de limpieza
- lavado de aisladores
- contaminación
- aisladores
- transformadores
- no energizado
- energizado
- alta presión de agua

Abstract

Through the electrical industry history there have been developments of different cleaning methods to avoid the insulators flashovers due to pollution. This paper describes the principal cleaning methods applicable to transformers insulators, emphasizing the high pressure fixed-type live insulator washing method, which was applied for cleaning the insulators of 900 MVA transformer bank of the "Laguna Verde" power plant localized at the state of Veracruz in Mexico. We propose a transformer insulator cleaning methodology, which identifies the main variables to take into account (the voltage level of the transformers, the pollution level of the insulators, determination of the optimal wash time, the amount of water, the optimal pressure of water jet, the maximum conductivity of the water and the wind velocity), reference values are given for these variables. In addition, we present an economic cost analysis when applying a method of this kind in an electric substation.

Keywords

- cleaning methods
- washing of insulators
- pollution
- transformers
- de-energized
- energized
- high pressure water

Introducción

Los transformadores de potencia representan un componente costoso en los sistemas eléctricos de potencia y son de vital importancia en la transmisión de energía eléctrica (Georgilakis *et al.*, 2007). Uno de los principales problemas que se presentan en las centrales eléctricas y en las subestaciones tipo exterior ubicadas en zonas costeras e industriales es que material salino u otros materiales solubles e insolubles se pueden depositar en la superficie de los aisladores (boquillas) de los transformadores (Cakebread *et al.*, 1978). Si estos materiales no se remueven se forma una capa en la superficie de los aisladores que, al combinarse con la humedad, modifica las características dieléctricas de los mismos, facilitando con esto la producción de arcos eléctricos y cortes en el suministro de la energía, provocando pérdidas económicas debido a fallas en la continuidad del servicio. Investigaciones llevadas a cabo en diferentes países (Suwanasri *et al.*, 2008) muestran que las fallas en los transformadores de potencia, son resultado del envejecimiento (Jongen *et al.*, 2008), y de acuerdo con las estadísticas de ocurrencia, se pueden dividir en:

- Fallas en el cambiador de derivaciones.
- Problemas de fugas de aceite dieléctrico en el tanque.
- Fallas debidas a problemas en los aisladores de los transformadores.
- Problemas de cortocircuitos en los devanados del transformador.
- Problemas ocasionados en el núcleo.
- Otros, como los problemas ocasionados por la temperatura, humedad, etcétera.

En nuestro país, la estadística de ocurrencia de fallas en transformadores de potencia de CFE (Liñan *et al.*, 2001; Guardado *et al.*, 1998), indica que un 26% de las fallas se

deben a problemas en los aisladores de los transformadores (figura 1).

El problema de fallas por contaminación se presenta generalmente en temporadas largas de sequía con alta contaminación ambiental, aunado a la aparición esporádica de neblinas y ligeras lloviznas (Last *et al.*, 1966). Por lo tanto, existe la necesidad de implementar métodos de limpieza (Perin *et al.*, 1995) para eliminar los materiales contaminantes. El tipo de material del aislador, su construcción, si la línea está o no energizada (IEEE std., 1995), son factores importantes para seleccionar el método adecuado; cada método tiene diferentes requerimientos que se deben cumplir para asegurar la correcta limpieza de los aisladores y así evitar problemas que puedan surgir por una mala aplicación.

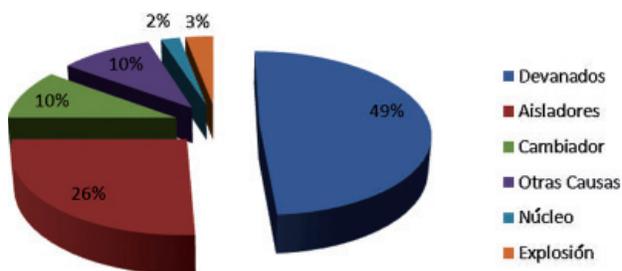


Figura 1. Estadística de fallas en transformadores de potencia 1983-1998 en la red de CFE

Además existen aspectos económicos que se deben considerar al elegir un método de limpieza de aisladores (Last *et al.*, 1966), estos son:

- El tipo de sistema.
- La frecuencia de lavado y la cantidad de agua disponible (para sistemas de lavado de aisladores).
- La localización geográfica de la subestación.

Los métodos usuales a elegir son: la limpieza a mano, la construcción de un recinto para evitar la contaminación, o con mayores costos, un sistema de lavado en vivo, en el que los costos más importantes corresponden a la bomba, el tanque de almacenamiento y la planta de purificación de agua. También el tamaño de la tubería a utilizar, las válvulas solenoides y el equipo de control aumentan el costo total del método de limpieza.

La tabla 1 muestra los costos de un sistema fijo de lavado en vivo con agua a alta presión. Esta inversión comparada con otros sistemas de limpieza de aisladores, como el sistema tipo móvil (Last, 1966), puede llegar a ser hasta tres veces el valor de dicho sistema; sin embargo, el gasto económico de operación del fijo son hasta dos veces menor que el del móvil, por lo que a largo plazo, la inversión se recuperará.

Tabla 1. Costos del sistema de lavado tipo fijo con agua a alta presión

Equipo a utilizar	Costo
	Sistema tipo fijo (En M.N.)
Equipo de distribución y almacenaje (ejemplo: tubería, tanque de almacenaje, conexiones, válvulas, etc.)	305 731
Equipo adicional (ejemplo: bomba, purificador de agua, boquillas de lavado, control, protección, instrumentación, etc.)	609 011
Costo total	914 742
Costos de operación	30 417

En esta investigación se muestra que el método de limpieza de lavado en vivo tipo fijo con presión alta de agua para aisladores de transformadores, al aplicarlo a una subestación localizada cerca de la costa o en zonas industriales da buenos resultados. Además se muestran varios aspectos del sistema de lavado para la central eléctrica de "Laguna Verde" y se describe una metodología para obtener de forma directa los diseños futuros.

Contaminación de aisladores

La contaminación que se acumula en la superficie de los aisladores puede estar formada, ya sea por partículas de sal de mar transportadas por el viento en las zonas costeras, o por partículas de cemento, polvo y arena, humos de horno, etcétera que están presentes en las zonas industriales (Hill, 1947). La gran variedad de estas partículas que están en suspensión en el ambiente

están descritas y clasificadas por Thompson (1944) y se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Rangos de tamaños de las partículas típicas de contaminación (derechos reservados © (Lambeth, 1971), reimpresión con permiso)

Naturaleza de la materia en suspensión.		Diámetro en μm
Inorgánico	Smog	0.001-0.3
	Humo	0.01-1.0
	Polvo	1.0-100.0
Orgánico	Bacterias	1.0-10.0
	Esporas de plantas	10.0-20.0
	Polen	15.0-50.0
	Neblina	1.0-50.0
Agua	Niebla	100.0-100.0
	Llovizna	50.0-400.0
	Lluvia	400.0-4000.0

El grado de contaminación sobre la superficie de los aisladores se puede expresar mediante la densidad del depósito equivalente de sal (ESDD por sus siglas en inglés) en mg/cm^2 (Yamamoto *et al.*, 1961). Este índice nos permite conocer la cantidad de los depósitos en cada aislador, y con base en el mismo, simular las condiciones de operación. Asimismo, mediante pruebas, aplicar los diferentes métodos de limpieza para determinar el más adecuado.

- Para estas pruebas es necesario simular la composición de los depósitos de contaminación alojados en la superficie de los aisladores, esto se logra de la siguiente manera: la materia conductiva de los depósitos de contaminación se simula con cloruro de sodio (NaCl) de acuerdo con el índice ESDD.
- La materia que absorbe la humedad en los depósitos de contaminantes en la superficie de los aisladores se simula con diatomita, ya que este mineral de sílice tiene una capacidad muy alta para absorber líquidos (Shaohua *et al.*, 2009).
- La adhesividad de la contaminación, factor que representa la fuerza necesaria para desprender los depósitos contaminantes de la superficie de los aisladores, se simula mediante la mezcla de un aglutinante (Ruzhang *et al.*, 1993) con la sal y la diatomita.

La concentración máxima permitida del depósito equivalente de sal en la superficie de los aisladores, con la que no se corre riesgo de producir fallas o arcos es

0.03mg/cm² (Sakshaug *et al.*, 1982). Con concentraciones del depósito de 0.1 a 0.23 mg/cm², los aisladores tipo estándar (no del tipo niebla) ya están en riesgo de fallar (Kansong *et al.*, 1980). Con base en estas investigaciones Yamamoto *et al.* (1961) dan un nivel de contaminación promedio de los aisladores, que se puede utilizar incluso si se trata de tifones que azotan un aislador, dicho valor es 0.05mg/cm² para zonas con contaminación promedio y 0.1mg/cm² para zonas con severa contaminación.

Existen instrumentos dedicados específicamente para el monitoreo de la contaminación en los aisladores, los cuales miden el pico de corriente de fuga en un periodo dado y el número de pulsos de corriente de fuga que exceden un valor límite dado (Oliviera *et al.*, 2009).

Métodos de limpieza con línea no energizada

Entre los métodos que se pueden utilizar para realizar la limpieza de los aisladores, los que se realizan con la línea no energizada, y a partir de ahí, trabajadores debidamente capacitados puedan empezar a realizar la labor de limpieza. De estos métodos el más utilizado es el de limpieza a mano, el cual es uno de los más completos y efectivos métodos de limpieza de aisladores, práctico en condiciones de alta contaminación; sin embargo, es muy tedioso, consume una gran cantidad de tiempo y es un proceso sumamente costoso por el simple hecho que el equipo tiene que ser desenergizado.

Al aplicar este método, los trabajadores se tienen que subir en los transformadores para poder llegar a la parte de los aisladores a realizar la limpieza; los trabajadores deben traer consigo lo siguiente: un dispositivo de puesta a tierra personal, fibras finas de acero necesarias para limpiar los aisladores, cinturones de seguridad y una línea de seguridad (IEEE std., 1995).

Aunque este método es necesario para aquellos sistemas que tengan lugares que no se puedan alcanzar con facilidad, como en transformadores, cuya colocación no se haya planeado haciendo imposible el paso de la maquinaria necesaria para el lavado, o donde los componentes a limpiar no pueden soportar altas presiones de agua o aire.

Métodos de limpieza con línea energizada

Debido a las desventajas que caracterizan a los métodos de limpieza con la línea no energizada, con el tiempo se idearon otros sistemas, éstos ya no necesitaban el corte de energía de la subestación y por lo tanto, su eficiencia era mayor que con los métodos de limpie-

za con la línea no energizada. Sin embargo, al tener que trabajar mientras se suministra energía a la red eléctrica, se deben tomar en cuenta precauciones especiales para evitar daños al equipo y al personal que pueda estar en las inmediaciones del transformador. Estos métodos se dividen en aquellos que utilizan aire a presión y los que utilizan agua a distintos niveles de presión. De acuerdo con Yasuda *et al.* (1976), los métodos con alta presión de agua son los mejores para la limpieza de los aisladores en condiciones de alta contaminación.

Lavado con alta presión de agua, sistema con boquilla en mano

Este método de limpieza es el más utilizado para el lavado de aisladores con agua a presión alta en vivo, este sistema se basa en que trabajadores debidamente calificados pueden efectuar el lavado (Ruzhang *et al.*, 1993), ya sea desde el nivel del piso o mediante el uso de una canastilla elevadora que lo coloca en una posición en la que puede llegar a los aisladores (IEEE std. 1995).

Uno de los parámetros más importantes que se debe tomar en cuenta en este tipo de lavado es la magnitud de la corriente de fuga que pueda pasar desde la parte viva, recorrer el chorro de agua y llegar al trabajador que está operando el sistema. Investigaciones demuestran que se debe limitar dicha corriente de fuga a 1mA como valor máximo en las condiciones de tensión máxima de operación. Se debe limitar a 1mA, ya que este valor es la magnitud máxima de corriente que una persona puede sentir, como ligeras cosquillas. Valores arriba de este nivel (de 2-25mA) pueden llevar a actos involuntarios del cuerpo, como ya no poder soltarse del aparato eléctrico que conduce la corriente y valores aún mayores (de 80-5000mA) pueden ocasionar un paro cardíaco y la muerte (Lee, 1966). De acuerdo con Cawley *et al.* (2007) entre 1992 y 2002 sucedieron 3,378 incidentes fatales en Estados Unidos, debido a corrientes eléctricas a través del cuerpo de las personas, por lo tanto, es importante limitar la corriente de fuga. Para lograr esto se deben tener en cuenta dos aspectos importantes:

- Las características básicas aisladoras del chorro de agua.
- La distancia mínima que debe existir entre la boquilla de lavado y el aislador.

Ruzhang *et al.* (1993) encontraron que la corriente de fuga que pasa a través del chorro de agua cambia con el incremento de la distancia que hay entre la boquilla de

lavado y el aislador energizado, también que dicha corriente se incrementa rápidamente a medida que el diámetro del orificio de la boquilla de lavado se incrementa y que la corriente de fuga se reduce a medida que la resistividad del agua aumenta.

En la figura 2 se muestra la forma en que la corriente de fuga cambia con respecto a la resistividad del agua de lavado, para un diámetro de la boquilla de lavado de 8mm a un nivel de tensión eléctrica de 318kV, con una distancia de separación de la boquilla de lavado y la parte energizada de 5m.

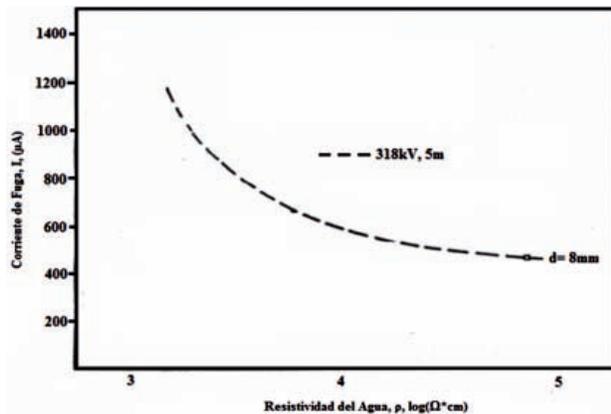


Figura 2. Relación entre la resistividad del agua y la corriente de fuga (derechos reservados © (Fujimura *et al.*, 1970), reimpressa con permiso)

Lavado a alta presión de agua, sistema tipo fijo

El sistema tipo fijo de lavado en vivo con alta presión (SLTFAP) es una medida eficiente contra la contaminación de los aisladores de los transformadores. Sin embargo, este sistema sin las debidas precauciones puede dar origen a arcos o fallas en el momento en que se está efectuando el lavado de los aisladores, debido a la disminución momentánea de sus propiedades aisladoras mientras son lavados. En la figura 3 se muestra el SLTFAP en operación para la central eléctrica "Laguna Verde", diseñado en esta investigación.

Uno de los requisitos importantes necesario para asegurar el correcto funcionamiento de este método, es el rendimiento de los aisladores mientras los están lavando, para conocer esto se aplica la prueba de resistencia de tensión en el lavado (Fujimura *et al.*, 1970), dicha prueba se describe a continuación: primero, se contamina el aislador a prueba esparciendo sobre el una solución de sal y caolín (Fujitaka *et al.*, 1968). La sal y el caolín representan las sustancias electrolíticas y las partículas de polvo insolubles de la contaminación natural, respectivamente. La tensión de prueba se aplica y

se mantiene constante durante todo el ensayo. Entonces se lava el aislador, si la falla o el arqueo ocurre durante el lavado, el mismo procedimiento se vuelve a llevar a cabo otra vez sobre el aislador, volviendo a esparcir la solución de sal y caolín, pero esta vez a 10kV menos de la tensión de prueba.

Finalmente, la tensión más alta que resistió el aislador cuatro veces consecutivas sin producir arqueo es el que se considera como la resistencia de tensión en el lavado, en otras palabras, es el nivel de tensión máxima que se le puede aplicar al aislador durante el lavado y no se producirá arqueo. Este nivel es muy importante, ya que indica las condiciones en las que el aislador puede fallar.

Otra de las características importantes que se debe tomar en cuenta en este sistema de lavado, es el nivel de contaminación que tienen los aisladores, esto se puede obtener mediante la guía publicada por Yamamoto *et al.* (1961), para el caso de los aisladores de transformadores, puede ser de hasta 0.10mg/cm² en condiciones de alta contaminación.

La cantidad de precipitación de agua es una variable importante, ya que modifica el valor de la resistencia de tensión en el lavado en los aisladores y, por lo tanto, la posibilidad de falla en éstos. La figura 4 mues-



Figura 3. SLTFAP funcionando sobre un transformador monofásico de 300 MVA marca IEM con su pararrayo. 1) transformador marca IEM de 300MVA, 2) pararrayo del transformador, 3) poste de lavado y 4) boquilla de lavado

tra la relación de la cantidad de precipitación de agua y la resistencia de tensión (Fujimura *et al.*, 1970). Como se puede observar, una baja cantidad de precipitación da como resultado un nivel de resistencia bajo; sin embargo, si la precipitación aumenta, la resistencia se incrementa de la misma forma, pero si la precipitación se eleva aún más, el valor de resistencia disminuye hasta llegar a valores por debajo de 100%, como lo es teniendo una precipitación de más de 25mm/min. Por lo tanto, lo ideal es escoger la precipitación que se encuentre sobre la cresta de la curva donde el porcentaje de resistencia de tensión es el más elevado.

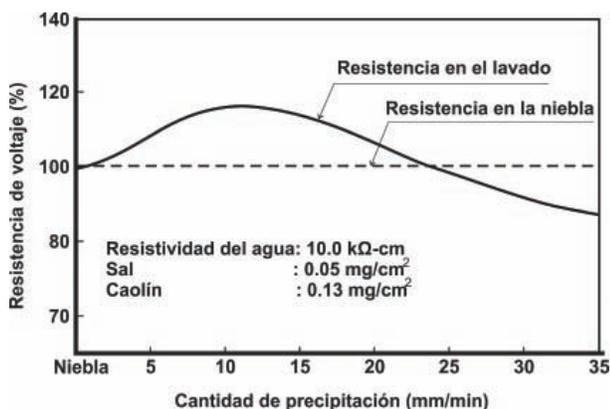


Figura 4. Precipitación y resistencia de tensión (derechos reservados © (Fujimura *et al.*, 1970), reimpressa con permiso)

Otra variable a tomar en cuenta en el método de lavado en vivo es el valor de la resistividad que debe tener el agua usada para lavar los aisladores, ya que un bajo nivel de resistividad podría producir arcos o fallas en los aisladores mientras son lavados. T. Fujimura *et al.* (1970) demuestran que cuando el agua tiene una resistividad por debajo de 3kΩ-cm, el nivel de resistencia de tensión en el lavado empieza a caer significativamente, por lo tanto, el nivel adecuado de resistencia que debe tener el agua que se usa en el sistema de lavado está en el orden de 5kΩ-cm, ya que la resistencia de tensión en el lavado tiende a decrecer en la misma forma en que disminuye el valor de la resistencia del agua.

Además, Cakebread *et al.* (1978) encontraron que la máxima conductividad para el agua de lavado, tiene los siguientes valores típicos: 50μS/cm (micro Siemens por centímetro) a 400kV, y de 200μS/cm a un nivel de tensión de 33kV.

Uno de los factores más importantes en este método de limpieza es el tiempo de lavado, ya que marca con qué frecuencia se debe accionar el sistema y esto repercute en el valor económico del mismo. Por lo tanto, se

debe calcular un tiempo efectivo para obtener el máximo lavado de los aisladores.

Yasuda *et al.* (1976) marcan que el tiempo de lavado ideal en el SLTFAP se encuentra en el orden de los 20-30s, para tiempos mayores a 30s el agua usada no tiene utilidad y solamente se desperdicia, también encontraron que la cantidad de agua descargada por la boquilla se incrementa en proporción al cuadrado del orificio de la boquilla y a la raíz cuadrada de la presión de descarga de la misma, esto se cumple hasta una presión de agua de 80kg/cm².

Matemáticamente:

$$Q = 0.66Cd^2\sqrt{p} \quad (2)$$

en donde:

Q es el gasto de agua en litros/min,

C es el coeficiente de flujo de la boquilla en m³/hr,

d es el diámetro de la boquilla en mm y

p es la presión en kg/cm².

Conociendo la cantidad de agua que consumirá el sistema podemos saber las dimensiones del tanque de almacenamiento.

Es necesario usar una cantidad pequeña de agua que impacte con suficiente fuerza en la superficie de los aisladores, capaz de remover los depósitos de contaminación y que además las gotas de agua no brinquen sobre la parte interior de los aisladores, esto para evitar fallas o arcos. De aquí que la presión de lavado sea también un importante factor a conocer para diseñar un sistema de lavado en vivo de aisladores. Yasuda *et al.* (1976) realizaron una comparación entre los sistemas que funcionan a 5kg/cm² y los que funcionan a 30kg/cm², obtuvieron que en los sistemas que utilizan la presión mayor, la resistencia de tensión en el lavado se eleva hasta 130%, que el tiempo de lavado es solamente 50% del requerido por el de menor presión y que la cantidad de agua necesaria es solamente 70% de la cantidad usada por el de 5kg/cm². Esto hace que el desempeño del sistema se incremente con la presión alta, por lo tanto, se demostró que la presión óptima para el lavado en alta presión de los sistemas fijos es del orden de 30kg/cm², a mayores presiones se necesitarían materiales especiales para que los aisladores sean capaces de soportar esta nueva presión y, por lo tanto, tampoco sería económicamente sostenible.

Otro factor de vital importancia para el correcto funcionamiento del sistema de lavado en vivo es la velocidad del viento, ya que éste puede cambiar la dirección del chorro de agua provocando que no se efectuó el la-

vado correctamente y que haya la posibilidad de falla o arqueo debido al humedecimiento de los depósitos de contaminación a causa del agua de lavado. El rociado de los aisladores solamente es efectivo y seguro hasta velocidades de viento del orden de 7m/s o menos (Kangson *et al.*, 1980). Para velocidades de viento mayores se requiere el uso de pantallas de agua, estas pantallas lanzan un chorro vertical de agua que es llevado por el viento hasta los aisladores, de tal forma que efectúan el lavado; por este motivo las pantallas se colocan sólo en la dirección del viento y son efectivas para velocidades de hasta 20m/s y rachas de viento de 40m/s.

La tabla 3 muestra algunos de los parámetros necesarios que deben considerarse cuando se aplica un sistema de lavado energizado (IEEE std, 1995).

En resumen, los factores que deben investigarse para obtener un diseño eficiente del sistema de lavado en vivo tipo fijo con alta presión de agua son los siguientes:

1. Nivel de tensión de la subestación.
2. Tipo de aisladores que se tienen.
3. Efecto de la contaminación sobre los aisladores.
4. Nivel de contaminación de los aisladores.
5. Máxima conductividad que debe tener el agua con relación a la cantidad necesaria para la instalación.
6. Cantidad total de agua tratada a almacenar.
7. Cantidad de precipitación de agua a usar.
8. Determinar la duración óptima de lavado.

9. Velocidades de los vientos en el lugar de la instalación
10. Óptima presión del chorro o del rociado de agua.
11. Control automático de lavado.

Diseño del sistema de lavado de aisladores de la central eléctrica "Laguna Verde"

La central nucleoelectrónica "Laguna Verde" propiedad de la Comisión Federal de Electricidad, ubicada sobre la costa del Golfo de México, en el km 42.5 de la carretera federal Cardel-Nautla municipio de Alto Lucero, estado de Veracruz en México, cuenta con dos generadores eléctricos de 600MW de la marca Mitsubishi Heavy Industries, con una tensión de salida de 22kV. La central suministra la potencia a la red eléctrica a través de tres líneas de 400kV, dos a la subestación Puebla II, y la tercera a la subestación Poza Rica II, y dos líneas de transmisión más de 230kV a la subestación de Veracruz II.

Uno de sus transformadores de 400kV, el cual tenía más de 30 años en operación, ya había excedido su vida útil y se cambió por tres transformadores monofásicos nuevos tipo acorazado, clase ONAN/OFAF (enfriamiento con aceite mineral, circulación natural y aire forzado/enfriamiento con aceite mineral, circulación forzada y aire forzado), capacidad de 300MVA cada uno, con una frecuencia eléctrica de trabajo de 60hz y sobreelevación de temperatura de 55°C, voltaje en alta tensión de 400kV (entre líneas) con conexión en estrella y voltaje en baja tensión de 21.5kV con conexión delta.

Tensión de línea (kV)	Mínima distancia de la boquilla al aislador (m)	Mínima resistividad del agua (Ω -cm)	Mínima presión de la boquilla (kPa)	Máximo diámetro del orificio de la boquilla (mm)
13	1.82	1300	2758	4.76
13	2.74	1300	2758	6.35
16	2.13	1300	2758	4.76
34.5	2.44	1300	2758	6.35
34.5	2.44	1300	2758	4.76
69	2.74	1300	2758	4.76
69	3.66	1300	2758	6.35
115	3.05	1300	2758	4.76
115	3.96	1300	2758	6.35
230	3.66	1300	2758	4.76
230	4.57	1300	2758	6.35
500	6.10	3000	3792	7.94
400 cd	6.10	50 000	5516	6.35

Tabla 3. Parámetros para el lavado con línea energizada (derechos reservados © (IEEE std., 1995), reimpressa con permiso)

El transformador "original" tenía su propio sistema de lavado en vivo tipo fijo, que actuaba sobre los aisladores de los transformadores y sus pararrayos, respectivamente; dicho sistema constaba de una serie de seis postes de lavado, divididos de la siguiente manera: dos para el lavado exclusivo de los aisladores, otros dos para el lavado exclusivo del pararrayos y un último para el aislador y para el pararrayo. Además de estos se contaba con un sexto poste para el lavado del neutro del transformador, el cual fue cancelado mediante una brida ciega. Ya que se contaba con la infraestructura del sistema original de lavado, la mejor opción era adaptar este sistema para que funcionara con el nuevo transformador, en vez de optar por aplicar otro método de limpieza, el cual se tendría que construir desde cero. La figura 5 muestra la localización de dichos postes para la nueva disposición del transformador. Todos los postes de lavado están conectados por medio de una tubería que suministra agua desionizada para el lavado.

Con el cambio de transformadores se procedió a rediseñar el sistema original de lavado para ser utilizado sobre los aisladores de los nuevos transformadores y sus pararrayos. Esto se logró de la siguiente manera: se tenía un total de cuatro postes de lavado diseñados para el viejo método de limpieza, sobre estos modelos se rediseñaron los nuevos postes y se llamaron RP-10, RP-11, RP-12 y RP-22, respectivamente. El material de los postes es tubería de acero A-106, y sus propiedades son: densidad de 7860kg/m^3 , esfuerzo de cedencia de 36259.445psi , módulo de Young de 2.901×10^7 libras/pulg², relación de Poisson de 0.266 (Megyesy, 1995).

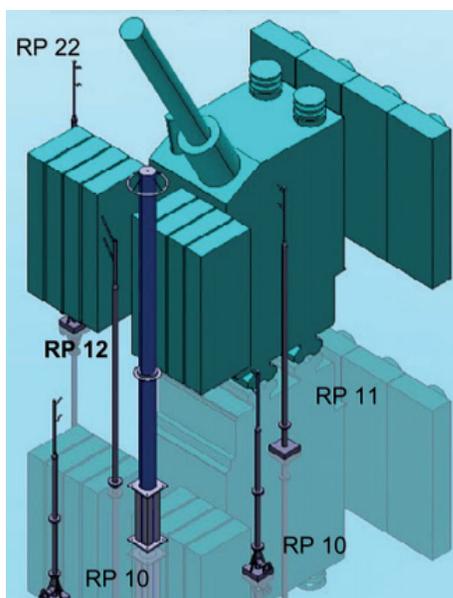


Figura 5. Localización de los postes de lavado

En la figura 6 se muestran los cambios que se realizaron en los postes de lavado RP-11 y se compara con los del sistema original.

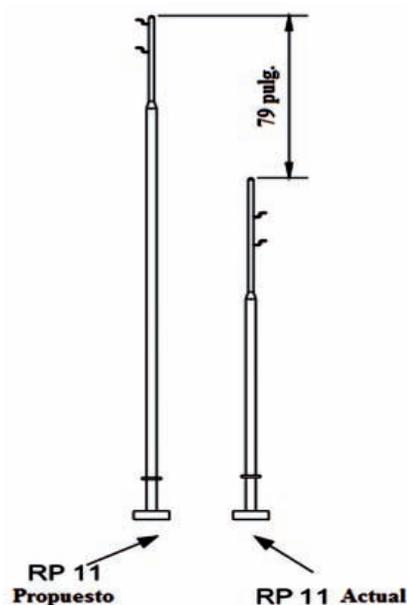


Figura 6. Comparación entre los postes de lavado original y nuevo

El aumento en la longitud de los postes propuestos se basa en la diferencia de alturas de los transformadores, dicha diferencia es la distancia que se aumentó a los postes actuales. Se conserva la distancia entre boquillas de lavado. Todos los postes nuevos se debieron recalcular por el cambio de altura, ya que serían sometidos a fuerzas inerciales provocadas por la probabilidad de la aparición de sismos en la zona, y por el mismo sistema de lavado de aisladores (boquillas de lavado), debido a la alta presión que maneja el sistema (36kg/cm^2). Matemáticamente,

$$F = PA + Q^2 \frac{\rho}{A} \quad (3)$$

en donde:

F es la fuerza de inercia resultante en Newtons,
 P la presión del sistema de lavado (36kg/cm^2),
 A el área del orificio de las boquillas de lavado en cm^2 ,
 Q el gasto de agua en litros/min y
 ρ la densidad del agua en kg/m^3 .

La tabla 4 muestra el cálculo de las fuerzas de inercia en cada tipo de poste, en donde A y B se refieren a las boquillas superior e inferior de cada poste de lavado.

Tabla 4. Cálculo de las fuerzas resultantes del sistema de lavado

Tipo de poste (RP)	Presión (kg/cm ²)	Área (cm ²)	Gasto (l/min)	Fuerza (N)
11A	36	0.981	64	358.043
11B	36	0.981	56	355.324
12A	36	0.981	87	367.877
12B	36	0.981	79	364.117
22A	36	0.981	74	361.950
22B	36	0.981	64	358.043

La presión interna a la que está sometida el tubo es la presión del sistema (36kg/cm²), dicha presión incrementa la rigidez del poste de lavado. Además, también se toman en consideración los posibles sismos y, por lo tanto, se deben considerar en el cálculo de los esfuerzos.

Se tomará como nivel máximo para un sismo que podría suceder en el área lo siguiente: 0.26 g de aceleración horizontal y 0.19 g de aceleración vertical, que equivale a un sismo de grado 6.5 en la escala de Richter (Towne *et al.*, 2001), más la fuerza de operación del sistema de lavado.

En este caso, tomamos el poste con mayor fuerza de reacción, si éste es capaz de resistir dichas fuerzas más las creadas por los sismos, los demás postes también serán capaces de soportar y no se presentará la falla del sistema. De acuerdo con la hipótesis de la energía de deformación (Shigley, 2002) en los materiales dúctiles, el poste de lavado se encuentra alejado de la región de falla de fluencia. La figura 7 muestra los esfuerzos máximos de deformación del poste de lavado, debido a las fuerzas de operación de las boquillas, a la presión interna y a las fuerzas debidas a un sismo, de donde se obtuvo que el mayor esfuerzo, al cual está sometido el poste de lavado es de 8810 lb/pulg².

De acuerdo con Megyesy (1995), el esfuerzo máximo permitido de diseño para tubería y accesorios es 17 500 lb/pulg² para tubo A-106 DEC 80. Considerando las posibles fallas que puedan ocurrir en las uniones soldadas, se toma 85% del esfuerzo máximo de diseño, esto es:

$$8810 \text{ lb/pulg}^2 < 17500 \text{ lb/pulg}^2 * 85\%$$

Además, la presión crítica de pandeo para un tubo que está sometido a una presión interna está dada por:

$$P_{cr} = \frac{2\pi^2 EDt}{(1-\nu)L^2} \quad (4)$$

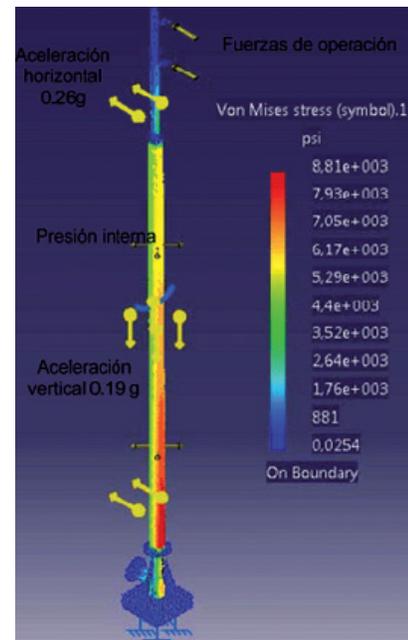


Figura 7. Esfuerzos máximos en el poste de lavado

donde:

P_{cr} es la presión crítica de pandeo en kPa,
 E es el módulo de Young en Pa,
 D es el diámetro de la tubería en metros,
 t el espesor de la pared en metros,
 L la longitud de pandeo en metros y
 ν es la razón de Poisson (adimensional).

por lo que la presión crítica de pandeo será igual a:

$$P_{cr} = \frac{2\pi^2 * 200 * 10^9 * 0.127 * 0.0065532}{(1 - 2(0.28)) * (2(7.406))^2}$$

$$P_{cr} = 34,035 \text{ kPa}$$

Como la presión que maneja el sistema de lavado es de 3,530.4kPa, concluimos que el diseño de los postes de lavado es satisfactorio para los esfuerzos máximos a los que serán sometidos.

Conclusiones

De los diferentes métodos de limpieza de aisladores, el de lavado a mano es el históricamente más usado en condiciones de línea no energizada; sin embargo, consume una gran cantidad de recursos económicos. Por esta razón los métodos de limpieza con línea energizada o "en vivo" se prefieren, ya que limpian los aislado-

res de transformadores de forma eficiente, sin embargo, se deben tomar medidas que aseguren el correcto funcionamiento del sistema para evitar posibles fallas que puedan dañar los equipos y a las personas que trabajan en las cercanías de los mismos. Un sistema de este tipo se rediseñó y fue implementado en la subestación eléctrica "Laguna Verde". Debido a que se tenía disponible la infraestructura del sistema original de lavado, la mejor opción era rediseñar dicho sistema para que funcionara apropiadamente con los nuevos transformadores instalados, y no que se instalara un nuevo sistema desde cero o se optara por otro método de limpieza. Para el diseño y construcción de este nuevo sistema de lavado se tomaron en cuenta todas las propiedades eléctricas y mecánicas para poder asegurar que el diseño fuera funcional y se logró el objetivo con excelentes resultados, además, gracias a la experiencia obtenida se pueden diseñar estos tipos de sistemas para otros transformadores. En el diseño del sistema de lavado en vivo tipo fijo con presión alta de agua, que se encuentra operando exitosamente en "Laguna Verde", se consideraron los siguientes factores: nivel de tensión de la subestación, tipo de aisladores que se tienen, nivel de contaminación de los aisladores, máxima conductividad que debe tener el agua con relación a la cantidad necesaria para la instalación, cantidad total de agua tratada a almacenar, cantidad de precipitación de agua a usar, determinar la duración óptima de lavado, velocidades de los vientos en el lugar de la instalación, óptima presión del chorro o del rociado de agua y control automático de lavado.

Referencias

- Cakebread R.J., Brown H.J., Dawkins R.B. Automatic Insulator-Washing System to Prevent Flashover Due to Pollution. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 125(12): 1363-1366, diciembre 1978.
- Cawley J.C., Homce G.T. Trends in Electrical Injury in the US, 1992-2002, en: Petroleum and Chemical Industry Conference (6th, 2006, Philadelphia, PA). *IEEE Transactions on Industry Applications*. Philadelphia, PA. IEEE, 2007, p. 1.
- Fujimura T., Okayama M., Isozaki T. Hot-line Washing of Substation Insulators. *IEEE Transactions on Power apparatus and Systems*. PAS-89 (5): 770-774, mayo 1970.
- Fujitaka S., Kawamura T., Tsurumi S., Kondo H., Seta T., Yamamoto M. Japanese Method of Artificial Pollution Test on Insulators. *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, PAS-87(3):729-73, marzo 1968.
- Georgilakis P.S., Eleftherios I. Spotlight on Modern Transformer Design. *IEEE Power and Energy Magazine*, 5(1):40, enero-febrero 2007.
- Hill G.L. Tests and Developments in Connection with Hot-Line Insulator Washing. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 66(1):1203-1216, enero 1947.
- Guardado J.L., Olivares J.C., Melgoza E., Venegas V. Modeling of the Non-linear Voltage Distribution in Transformer Windings, en: American Power Conference (60th, 1998, Chicago, US). *Proceeding of the American Power Conference*, pp. 1147-1152.
- IEEE Guide for Cleaning Insulators Standard 957-1995.
- Jongen R., Gulski E., Morshuis P., Smith J., Janssen A. Statistical Analysis of Power Transformer Component Life Time Data, en: International Power Engineering Conference (1st, 2007, Singapore), IPEC 2007, IEEE, 2008, pp. 1273-1277.
- Kansog J.O.C., Mark D. The Laguna Verde 400kV/230kV Hybrid Gas Insulated Substation (HGIS), en: IEEE PES Winter Meeting (1980). *IEEE PES Winter Meeting*, IEEE, 1980. Paper A-80-095-0.
- Lambeth P.J. Effect of Pollution on High-Voltage Outdoor Insulators. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 118(9):1107-1130, septiembre 1971.
- Last F.H., Pegg T.H., Sellers N., Stalewski A., Whittaker E.B. Live Washing of H.V. Insulators in Polluted Areas. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 113(5):847-860. Mayo 1966.
- Lee W.R. Death from Electric Shock. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 113(1):144-148, enero 1966.
- Liñan R., Ramírez J., Pascacio A., Nava A. Experiencias en el desarrollo de sistemas de monitoreo y diagnóstico para transformadores de potencia, en: Segundo Congreso Bienal (2^{do}, 2001, Irapuato, Guanajuato). Segundo Congreso Bienal, 2001.
- Megyesy E.F. *Pressure Vessel Handbook*, 10rd edition, US: Pressure Vessel Publishing, Inc. 1995, pp. 18-31.
- Oliviera S.C., Fontana E., Do Monte de Melo F.J. Real-Time Monitoring of the Leakage Current of 230kV Glass Type Insulators During Washing. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 24(4): 257-2260, octubre 2009.
- Perin D., Pignini A., Visintainer I., Ramamoorty C.M. Live-Line Insulator Washing: Experimental Investigation to Assess Safety and Efficiency Requirements. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 10(1):518-525, enero 1995.
- Ruzhang W., Lin S. Safety and Technique of Hot Washing, en: Sixth International Conference on Transmission and Distribution Construction and Live Line Maintenance (6th, 1993, Las Vegas, NV). *Proceedings from ESMO-93*, IEEE, 1993, pp. 225-239.
- Sakshaug E.C., Kresge J.S., Mark D.A., Karady G.G. Contamination & Hot Wash Performance of Zinc Oxide Station Arresters. *IEEE Transactions on Power Apparatus and System*, 101(5): 1095-1104, mayo 1982.
- Shaohua H., Zhipan G., Jing L., Shuibo X. Adsorption of Brilliant Scarlet 3R by Natural Diatomite, en: International Conference on Energy and Environment Technology (2nd , 2009, Guilin, Guangxi). *Proceedings from ICEET'09*, IEEE, 2009, pp. 397-400.

- Shigley J.E. *Mechanical Engineering Design*, 8th. Ed., US, Editorial McGraw-Hill, 2002, pp.328-334.
- Suwanasri T., Chaidee E., Adsoongnoen C. Failure Statistics and Power Transformer Condition Evaluation by Dissolved Gas Analysis Technique, en: International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (1st, 2008, Beijing). Proceedings from CMD 2008, IEEE, 2008, pp. 492-496.
- Thompson W.G. The Mechanism of the Contamination of Porcelain Insulators. *Journal of the Institution of Electrical Engineers - Part II: Power Engineering*, 91(22):317-327, agosto 1944.
- Towne R.G., Roybal D.D., Ahmed M.A. Earthquake Requirements and Cutler-Hammer Distribution and Control Electrical Equipment Seismic Capabilities. Pittsburg, Pennsylvania: Eaton Corp.SA.125.S.E, mayo 2001.
- Yamamoto M., Ohashi K.. Salt Contamination of External Insulation of High-Voltage Apparatus and its Countermeasures. Part III. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers Power Apparatus and Systems*, 80(3):380-387, abril 1961.
- Yasuda M., Fujimura T. A Study and Development of High Water Pressure Hot-Line Insulator Washing Equipment for 500kV Substation. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 95(6):1919-1928, noviembre 1976.

Bibliografía

- Ahmad A.S., Ahmad H., Salam M.A., Tamsir T., Buntat Z., Mustafa M.W. Prediction of Salt Contamination on High Voltage Insulator in Rainy Season Using Regression Technique. *Proceedings TENCON 2000*, 3(1):184-189, 24-27, septiembre 2000.
- Chun S., Park C. Analysis of Contaminants Adhered on Polymeric Insulator Used in Coastal an Industrial Areas, en: Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (1st, 2008, Quebec, QC). Annual Report CEIDP, IEEE, 2009, p.1.
- Javoronkov M., Abdelaziz C., Fethi G., Zohra B. Prevention of the Interruptions Due the Phenomena of Electric Insulators Pollution, en: First International Symposium on Control, Communications and Signal Processing (1st, 2004). First International Symposium on Control, Communications and Signal Processing, IEEE, 2004, pp.493-497.
- Vitols A.P., Stead J. Conditioning of Post Insulators and Surge Arresters, en: Electrical Insulation Conference (1st, 2009, Montreal, QC). Proceedings from EIC 2009, IEEE, 2009, pp.551-554.

Semblanza de los autores

Yahir Abraham Lizama-Cámara. Técnico en refrigeración industrial pesquera (2006) por el Centro de Estudios Tecnológicos del Mar Núm. 07 del puerto de Veracruz. Actualmente estudia la licenciatura en ingeniería mecánica eléctrica en la Universidad Veracruzana del puerto de Veracruz. Participó en el Verano de la Investigación Científica 2010 haciendo estancia en la UAM-Azcapotzalco y es miembro del IEEE.

Jesús Antonio Mendieta-Antúnez. Es ingeniero mecánico y en sistemas energéticos egresado de la Escuela de Ingeniería de la Universidad La Salle en 2005. Obtuvo el grado de maestro en ciencias en la especialidad de ingeniería eléctrica en el CINVESTAV. Sus áreas de investigación son el control de máquinas eléctricas, sistemas mecánicos vibratorios y control por retroalimentación de estados. De 2009 a la fecha, labora en el área de tecnología de transformadores en industrias IEM SA de CV.

Emmanuel Blanco-Brisset. Estudió ingeniería química con especialidad en tecnología química en la Universidad Iberoamericana. Desde 2003 trabaja en industrias IEM SA de CV en el Departamento de Tecnología y Desarrollo de Transformadores de Potencia como ingeniero en investigación y desarrollo. Sus áreas de interés son modelos de secado por transporte de masa, análisis fisicoquímicos de materiales, sistemas contra incendio y lavado.

Juan Carlos Olivares-Galván. Es ingeniero electricista (1993) y maestro en ciencias (1997) por el Instituto Tecnológico de Morelia. Obtuvo el doctorado en 2004 por el CINVESTAV, unidad Guadalajara. Trabajó por ocho años en la industria como diseñador de transformadores de distribución. En 2004, ingresó como profesor en el Instituto Tecnológico de Zapopan y desde el 2007 es profesor de tiempo completo de la UAM-A. Es miembro del SNI (Nivel I) y Senior Member del IEEE.

Rafael Escarela-Pérez. En 1992 obtuvo el grado de ingeniero electricista de la Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco. En 1993, comenzó sus estudios de posgrado en el Imperial Collage de la Universidad de Londres, donde obtuvo el grado de doctor en 1996. En el mismo año ingresó como profesor de tiempo completo en la Universidad Autónoma Metropolitana. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores (Nivel II) y Senior Member del IEEE.

Monitoreo en línea de accesorios de instalaciones eléctricas subterráneas mediante emisiones acústicas

Online Monitoring of Accessories for Underground Electrical Installations through Acoustics Emissions

Casals-Torrens P.

*Departamento de Ingeniería Eléctrica
Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España
Correo: p.casals@upc.edu*

González-Parada A.

*Departamento de Ingeniería Eléctrica
División de Ingenierías Campus Irapuato-Salamanca
Universidad de Guanajuato
Correo: gonzaleza@salamanca.ugto.mx*

Bosch-Tous R.

*Departamento de Ingeniería Eléctrica
Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España
correo: bosch@ee.upc.edu*

Información del artículo: recibido: septiembre de 2010, aceptado: marzo de 2011

Resumen

Las ondas acústicas provocadas por las descargas parciales en el interior de un dieléctrico pueden ser detectadas por sensores de Emisiones Acústicas (EA) y analizadas en el dominio del tiempo. Los resultados experimentales que se presentan, evidencian la capacidad de detección en línea de estos sensores, en el entorno próximo a un accesorio de cable, empalme o terminal. Los sensores EA son inmunes a las interferencias electromagnéticas, son un método de detección no destructivo y garantizan desacople galvánico respecto a la red eléctrica; esta técnica de detección de descargas parciales puede ser aplicada como método de prueba para mantenimiento preventivo o predictivo (mantenimiento basado en la condición), en equipos o instalaciones de media y alta tensión en servicio, y representa una alternativa a los sistemas eléctricos de detección, convencionales o no, que continúan basándose en la detección del impulsos de corriente. En el presente trabajo se presentan las pruebas de caracterización de los sensores EA por medio de pruebas comparativas de descargas parciales en accesorios para cables subterráneos de energía.

Descriptor

- cables de energía
- instalaciones subterráneas
- descargas parciales
- detección de fallas
- detección en línea
- detección acústica

Abstract

The acoustic waves caused by Partial Discharges inside the dielectric materials, can be detected by acoustic emission (AE) sensors and analyzed in the time domain. The experimental results presented, show the online detection capability of these sensors in the environment near a cable accessory, such as a splice or terminal. The AE sensors are immune to electromagnetic interference and constitute a detection method non-intrusive and non-destructive, which ensures a galvanic decoupling with respect to electric networks, this technique of partial discharge detection can be applied as a test method for preventive or predictive maintenance (condition-based maintenance) to equipments or facilities of medium and high voltage in service and represents an alternative method to electrical detection systems, conventional or not, that continue to rely on the detection of current pulses. This paper presents characterization tests of the sensors AE through comparative tests of partial discharge on accessories for underground power cables.

Keywords

- power cables
- underground installation
- partial discharges
- failure detection
- online detection
- acoustic detection

Introducción

La fiabilidad y continuidad del suministro eléctrico en las redes subterráneas de distribución y transporte de energía eléctrica en alta tensión, se ven afectadas por la elevada tasa de falla de los accesorios empleados para su instalación, como son los empalmes y las terminales, en comparación con las fallas presentadas en los propios cables (Working Group, 1991; Bucci *et al.*, 1994; Mashikian, 2000).

Esto esencialmente se debe a que finalizada la fabricación de los cables y antes de su instalación, estos son sometidos a rigurosos ensayos de calidad, tanto de rigidez dieléctrica, como de descargas parciales, que aseguran la ausencia de defectos de fabricación en los mismos. Los accesorios, en cambio, no pueden ser evaluados al 100% como conjunto (Standard IEC 60840, 2004; Standard IEC 60502-4, 2005), ya que después de la fabricación y ensayo de sus partes, sufren un proceso de manipulación durante el montaje que también afecta la instalación del cable. Todo este proceso está propenso a errores y daños que difícilmente pueden ser detectados durante los ensayos de puesta en servicio de la instalación, debido a las limitaciones en las pruebas de campo, ya que son menos rigurosas que las pruebas de laboratorio (como el menor nivel de tensión, tiempos de prueba inferiores y menor sensibilidad en los equipos de detección de descargas parciales) y que en muchos casos, la prueba de descargas parciales no se exige (Standard IEC 60840, 2004) y normalmente tampoco se realiza, lo cual puede derivar en una mala instalación con la consecuente falla prematura, como es el caso de las fallas presentadas en las instalaciones subterráneas en el centro histórico de la Cd. de México.

En este sentido, toda nueva tecnología que pueda contribuir a garantizar la confiabilidad en el servicio y

facilitar la obtención de la información, que permita con antelación, identificar potenciales situaciones de falla en los accesorios, sin duda reviste un especial interés, ya que permitirá efectuar de manera planificada los descargos y las operaciones preventivas de mantenimiento en las instalaciones, sin la urgencia, el costo económico y el consecuente desprestigio del servicio que provocan las interrupciones debidas a fallas “imprevistas”.

Por otro lado, los métodos eléctricos ofrecen una alta confiabilidad cuando se usan en laboratorios de prueba apantallados o zonas libres de interferencias, pero en pruebas de campo resultan costosos y muy sensibles a las interferencias de Radio Frecuencia (RF); lo cual abre un espacio de oportunidades a sistemas no convencionales, no eléctricos, como el sistema propuesto en este trabajo, basado exclusivamente en EA, cuyos resultados se presentan.

Detección de descargas parciales (DP)

Existen diferentes métodos para la detección de las DP, los cuales están caracterizados en función del tipo de sensor que se emplea para la detección, estos se pueden clasificar en dos grandes grupos:

- Detección con sensores eléctricos (inductivo, capacitivo, inductivo-capacitivo).
- Detección con sensores acústicos.

Detección con sensores eléctricos

Los sistemas de detección de DP convencional sean normalizados (IEC) o no (Standard IEC 60885-3, 1988), se basan en la detección de impulsos de corriente y de tensión (Casals, 2008), los cuales presentan una serie de ventajas y desventajas que a continuación se presentan:

Desventajas:

- En pruebas de campo son muy sensibles a las interferencias de RF, al no estar apantallados.
- Las interferencias son reducidas o eliminadas por sofisticados sistemas de discriminación (hardware o software), que pueden filtrar o cubrir las descargas.
- Los inductivos están limitados por el tipo constructivo de la pantalla del cable.
- La sensibilidad de los capacitivos está limitada por su bajo valor de capacidad de acoplamiento con respecto a la capacidad del objeto bajo ensayo (accesorio + cable).
- El tratamiento de la respuesta del sensor, en la mayoría de los casos, se realiza con equipos de medida de descargas parciales.
- Son costosos, del orden del medio centenar de miles de USD (equipo de detección más accesorios), lo cual limita su uso generalizado y su instalación permanente en campo.

Ventajas:

- Permiten conocer el nivel de descarga.
- Se pueden complementar con sistemas de localización de descargas.
- El uso de doble sensor permite auto calibración y analizar la dirección de descargas en empalmes.
- Existen sistemas comerciales para alta tensión (AT).

Detección con sensores acústicos

Con una metodología diferente, basada en la detección de variaciones de presión en la superficie del aislamiento se ofrece una solución al problema de detección de descargas parciales en accesorios, en línea y en campo, sin presentar las mismas desventajas de los sensores eléctricos (Casals, 2008), éstas se presentan a continuación:

Desventajas:

- Actualmente la mayoría de sensores y sistemas de detección están en desarrollo.
- No se comercializan equipos para aplicaciones específicas en accesorios de cables de AT.
- Reducción de sensibilidad, debido a la atenuación con la distancia y con las elevadas temperaturas que pueden alcanzar el material de aislamiento.
- Los detectores de uso externo en cables de Media Tensión (MT), tienen una sensibilidad limitada por

las interfases de aire (baja transmisión acústica) que hay en el interior de los cables o empalmes.

- No permiten conocer el nivel de descarga.
- La calibración es compleja.

Ventajas:

- Insensibles a las interferencias de Radio Frecuencia (RF), no requieren pantalla.
- Insensibles a los campos electromagnéticos.
- Es un método de ensayo no destructivo.
- Sensores de alta sensibilidad, sólo requieren amplificación y visualización con osciloscopio digital, sin tratamientos complejos de señal.
- Tienen amplio espectro de frecuencia.
- El tipo constructivo de pantalla del cable no impide su aplicación.
- Alta robustez mecánica.
- Alta resistividad eléctrica que ofrece separación galvánica respecto al equipo ensayado.
- Pueden ofrecer precios de comercialización de un orden de magnitud 10 veces menor, (con sensores y osciloscopio de medición), lo cual permite un uso generalizado y su instalación unitaria por empalme.

Conceptos de detección acústica de Descargas Parciales (DP)

La DP en el interior de un sistema aislante representa una pequeña explosión con colisiones entre moléculas, la cual excita la emisión de ondas de presión acústica (Harrold, 1986; Kreuger, 1991; Lundgaard, 1992), que se propagan a través del material del aislamiento. Estas ondas mecánicas pueden ser detectadas por sensores de EA, sensibles a los cambios de presión que se producen en la superficie del aislamiento y que envuelve la cavidad o defecto, especialmente en las capas finas semiconductoras.

La energía que transfiere una descarga, en un defecto tipo cavidad, se puede calcular por la diferencia entre la energía almacenada antes y después de la descarga parcial. La magnitud de la energía liberada (W) en Joule, expresada en función del valor eficaz de la tensión de excitación de la descarga (V_i) en volts, a una carga eléctrica q_c en Coulombs, que es transferida cuando se presenta una descarga en un defecto tipo cavidad se puede expresar como:

$$W \cong (1/\sqrt{2}) \cdot q_c \cdot V_{i(\text{rms})} = 0,707 \cdot q_c \cdot V_{i(\text{rms})} \quad (1)$$

Esta energía puede presentar órdenes de magnitud de 10^{-9} a 10^{-5} J (Naidu y Kamaraju, 1995; Mason, 1995) y va-

ría con el espesor de aislamiento, provocando localmente diferentes efectos, entre ellos, la radiación de energía en forma de ondas acústicas.

Con el fin de verificar la cantidad de energía presente durante la descarga en una cavidad del tipo esférico, se realizó una simulación por medio de elementos finitos de una cavidad de 1 mm de diámetro en el interior de un aislamiento de 18 mm de espesor de un cable de energía de alta tensión, con aislamiento de Polietileno de cadena cruzada (XLPE), con un conductor de aluminio de $1 \times 400 \text{ mm}^2$, para una tensión de 76/132 kV. En la figura 1 se muestra el resultado obtenido de la simulación, en donde se aprecia el incremento del gradiente de tensión en la cavidad cercana a la pantalla semiconductora interior, encontrándose que esta energía, antes de que se produzca una descarga parcial, cuando el cable tiene una tensión de 76 kV, se encuentra en un rango que varía de $25,6 \times 10^{-5} \text{ J}$ a $5,59 \times 10^{-5} \text{ J}$, entre la zona de máximo gradiente y mínimo gradiente, respectivamente (Casals, 2008).

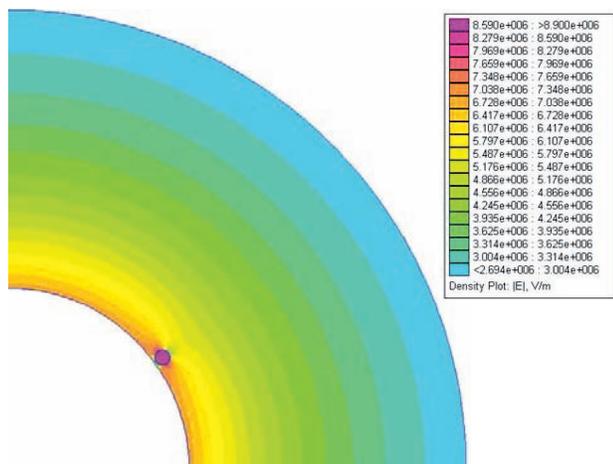


Figura 1. Simulación por elemento finito de una cavidad adyacente a la capa semiconductora interior

El sonido de la descarga se propaga a través de un medio de densidad (ρ) en kg/m^3 , a una velocidad (c) m/s, de forma mecánica, mediante el movimiento de ondas longitudinales que provocan cambios locales de presión (p) en Pascals y desplazamiento de las moléculas del medio. La ecuación de propagación de onda para campos de presión esféricamente simétricos se representa en la ecuación 2 (Kinsler *et al.*, 2004; Blackstock, 2000):

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (2)$$

Los pulsos de descargas parciales tienen duraciones muy cortas, que oscilan desde 1 ns a cientos de ns (Harrold, 1986; Naidu y Kamaraju, 1995; Boogs, 1990), esto provoca que el espectro de frecuencia de las ondas acústicas generadas sea muy amplio en el rango de los ultrasonidos, los cuales pueden ser del orden de kHz hasta los MHz.

Si consideramos la descarga parcial en una cavidad como una fuente puntual simple, generalmente muy pequeña e inferior a $1 \mu\text{m}^3$; cuando inicia su actividad emite ondas acústicas esféricas de simetría radial, como se muestra en la figura 2.

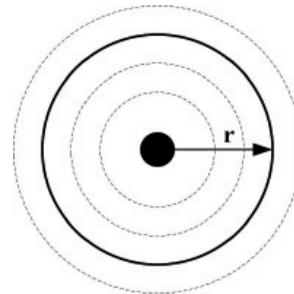


Figura 2. Propagación de ondas acústicas de fuente puntual

En el interior del empalme en un cable, la descarga parcial se produce siguiendo la dirección radial de máxima variación del campo eléctrico. Esta misma dirección es la más corta en la propagación de las ondas acústicas esféricas, hasta la frontera con un medio diferente al aislamiento, de acuerdo con la representación de la figura 3, donde (r) representa el radio que alcanza en m.

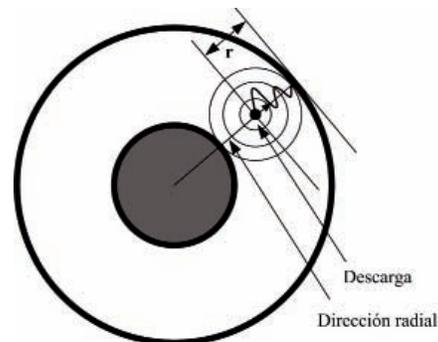


Figura 3. Representación de la propagación radial de una onda acústica

En consecuencia, lo primero que alcanzan los frentes de presión de las ondas acústicas son ambas capas semiconductoras y el conductor, con una diferencia de tiempo que dependerá de la posición de la descarga en el interior del aislamiento. Entre estos medios se produce

la refracción o reflexión de dicha onda, en función de la impedancia acústica específica (\bar{z}) de los mismos, la cual se define como la razón de la presión acústica del medio (\bar{p}) en Pascals y la velocidad de partícula asociada (\bar{v}) en m/s:

$$\bar{z} = \frac{\bar{p}}{\bar{v}} \quad (3)$$

que también puede expresarse como:

$$\bar{z} = \rho_o c \cos \beta e^{i\beta} \quad (4)$$

donde (ρ_o) es la densidad característica del material en kg/m^3 y β el ángulo entre la dirección de la presión acústica y la velocidad de partícula en el material. $\beta = 0$ cuando la onda es plana.

Los frentes de ondas que siguen direcciones no radiales, como la dirección axial del cable (figura 4), recorren un camino más largo, pero finalmente también alcanzan e inciden oblicuamente sobre las capas semiconductoras y el conductor.

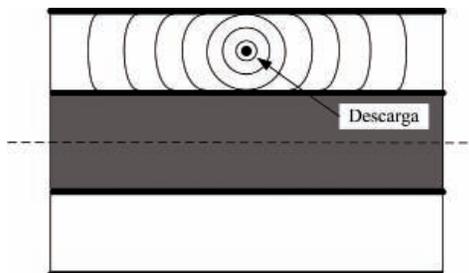


Figura 4. Representación de la propagación axial de ondas acústicas

La velocidad longitudinal del sonido en el polietileno se incrementa linealmente con la densidad y puede variar aproximadamente entre 2003 m/s y 1977 m/s (Piche *et al.*, 1992), dependiendo del grado de reticulación del material.

En la mayoría de polímeros, comúnmente usados en aislamientos de media y alta tensión, el coeficiente de atenuación se reduce aproximadamente de forma lineal con el incremento del módulo de Young del material (E) (Harrold, 1986). En la ecuación 5 se muestra el módulo de Young en función del grado de rigidez del material, y su magnitud disminuye con el incremento de temperatura (Suzuki *et al.*, 1988).

$$E = \rho_o c^2 \quad (5)$$

La incidencia de la atenuación es el condicionante que limita el uso de esta técnica a detecciones en cortas distancias, pero a su vez, la hace adecuada para el control

focalizado en equipos de poca longitud, como los accesorios de cables.

Evaluación del sistema de detección acústica

Para la evaluación del comportamiento de un sistema de detección acústica en una instalación de cable de energía subterránea se empleó un transformador de prueba de alta tensión e instalaciones de cables de energía para media y alta tensión, incorporando sensores de Emisión Acústica (EA), externos y próximos al accesorio del cable, tal como se observa en la figuras 5.

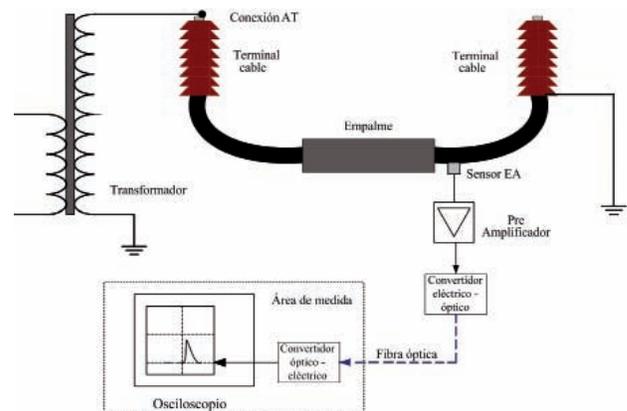


Figura 5. Esquema de prueba del sistema de detección acústico con un sensor colocado próximo a un empalme

El sensor o sensores, se recomiendan uno en cada extremo, activados por las ondas acústicas generan una señal de respuesta que se envía a un pre amplificador donde pueden combinarse las diferentes señales, tal como se muestra en la figura 6.

Los sensores EA, ofrecen la sensibilidad para asegurar una información permanente (sistema en línea) o periódica (lectura según plan preventivo) de la actividad de DP detectada y en especial, de las variaciones de la misma en el tiempo, pudiendo generar alarmas según los diferentes niveles de actividad, como consecuencia de la degradación del accesorio.

En la figura 7 se muestra la ubicación del sensor EA en la cercanía de un empalme para alta tensión, en donde los componentes del sistema son: el sensor EA, un pre amplificador de banda ancha de 20 kHz a 5000 kHz, convertidor electro óptico, salida por fibra óptica y convertidor óptico-eléctrico.

El equipo necesario para medida o análisis es un osciloscopio digital o un analizador de espectro. Se utilizó un osciloscopio de 200 MHz y 1GSa/s, pero con un osciloscopio de mayores prestaciones se mejora la capacidad de detección.

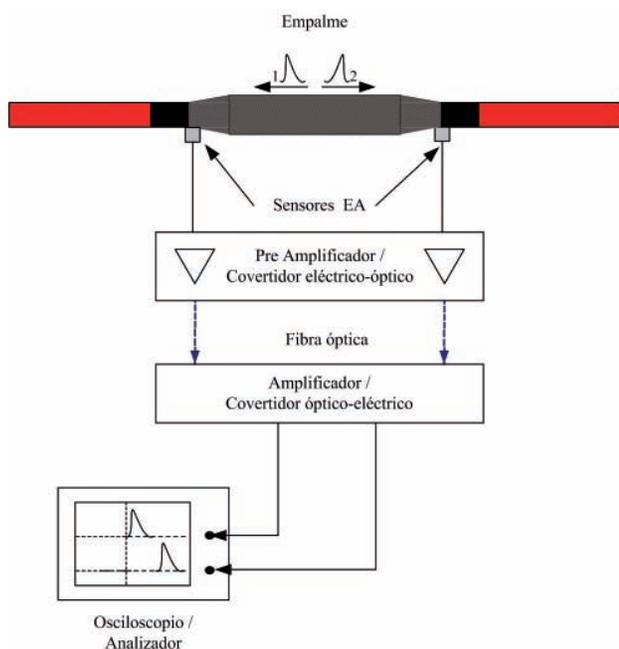


Figura 6. Esquema del sistema de detección acústico con dos sensores colocados al interior de un empalme



Figura 7. Sensor ubicado próximo a un empalme de alta tensión

Dada la importancia que tiene la seguridad para el técnico que realiza ensayos y mediciones en alta tensión, ésta se asegura con la elevada resistividad del sensor y la conexión mediante fibra óptica, garantizando además el desacople galvánico entre el sensor y el equipo de medida, considerando que la fibra óptica también permite alejar este último del accesorio bajo ensayo.

Resultados experimentales

Las detecciones de las DP se realizaron conjuntamente de forma eléctrica por medio de un detector convencio-

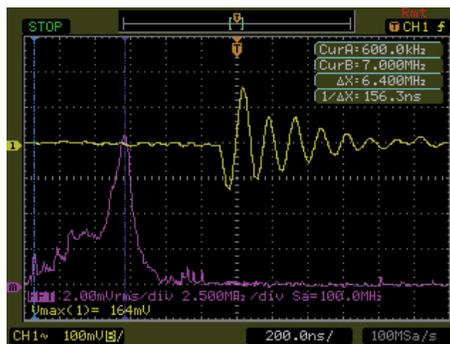
nal de DP y por medio de sensores EA. La detección eléctrica nos permitió obtener las magnitudes de descarga en pC y verificar que el sistema acústico detecta la presencia de las DP, en la figura 8 se muestran los resultados de ambos sistemas de detección.



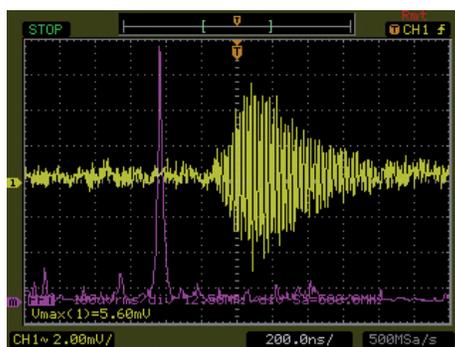
Figura 8. Detección eléctrica y acústica de DP

Con el fin de caracterizar cada una de las señales de DP, se utilizaron defectos típicos de cable o preparación de accesorios, como restos de material semiconductor, cortes en el semiconductor externo y huecos en el aislamiento, provocados durante la preparación del empalme, con el fin de obtener de manera artificial las descargas parciales. Estos defectos fueron realizados en dos tipos de cables, uno de ellos fue para alta tensión, de XLPE 76/132 kV 1x800 mm² Al y el otro para media tensión, de XLPE 12/20 kV 1x240 mm² Al.

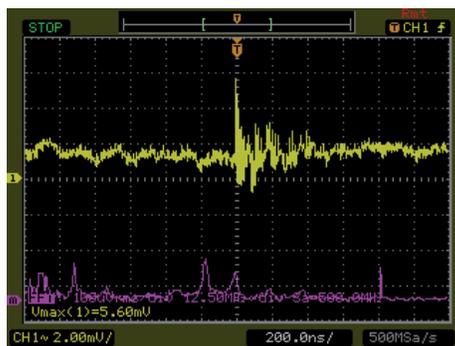
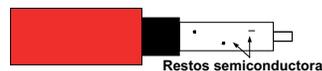
La señal característica de cada uno de estos defectos se presenta en la figura 9, conjuntamente con la respuesta acústica obtenida y la correspondiente transformada rápida de Fourier.



(a) Corte en el semiconductor - cable AT



(b) Cavidad $\varnothing = 2$ mm en aislamiento - cable MT



(c) Restos de semiconductor - cable MT

Figura 9. Modelos de descarga parcial

En la tabla 1 se resumen los resultados para los tres tipos de defectos y la ubicación del sensor EA respecto a cada una de las fallas presentadas.

Tipo Defecto	Tensión (kV)	Medida DP (pC)	Medida acústica (mV)	Ubicación del sensor
a	70	40	136	Sobre semicon. a 25cm del defecto
a	70	80	164	Sobre semicon. a 50cm del defecto
b	12	40	3,68	Sobre semicon. a 50cm del defecto
b	14	50	5,6	Sobre semicon. a 50cm del defecto
b	17	70	10	Sobre cubierta a 50cm del defecto
c	8,4	60	5,6	Sobre semicon. a 10cm del defecto
c	8,2	64	No detecta	Sobre semicon. a 90cm del defecto
c	16,2	80	2	Sobre semicon. a 90cm del defecto

Tabla 1. Medidas obtenidas dependiendo del defecto en el accesorio

Conclusiones

La evolución de los sensores EA se presenta como un refuerzo o alternativa a los sistemas eléctricos, en la detección de DP en accesorios de cables, para aplicaciones en línea y en campo.

El sistema presenta mayor sensibilidad ante descargas internas del aislamiento, tipo cavidad, contenidas bajo el semiconductor.

El nivel de sensibilidad alcanzado, descargas a partir de 40pC, pueden ser una alternativa en aplicaciones de MT, pero requiere mejorarse para AT.

La respuesta de los sensores EA, ofrece diferentes formas ante diferentes tipos de defecto, lo cual da pie a continuar el trabajo con el análisis detallado de la transformada rápida de Fourier (FFT), que también reflejan estas diferencias.

Referencias

Blackstock D.T. *Fundamentals of Physical Acoustic*, New York, Wiley-Interscience, 2000.

Boogs S.A. Partial Discharge: Overview and Signal Generation. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 6(4):33-39, julio-agosto, 1990.

Bucci R.M., Rebbapragada R.V., McElroy A.J., Chebli E.A., Driller S. Failure Prediction on Underground Distribution Feeder Cables. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 9(4):D2.1-D2.7, octubre 1994.

Casals-Torrens P. *Sistema en línea para detección preventiva de descargas parciales en accesorios de cables de alta tensión mediante sensores de emisiones acústicas*. Tesis (doctoral). Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya, Dpto. de Ingeniería Eléctrica, 2008.

Harrold R.T. Acoustic Theory Applied to the Physics of Electrical Breakdown in Dielectrics. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, EI-21(5):781-792, octubre 1986.

- Kinsler L.E, Frey A.R., Coppens A.B., Sanders J.V. *Fundamentals of Acoustic*, 4a ed., New York, John Wiley & Sons, Inc, 2004.
- Kreuger F.H. *Industrial High Voltage*, Editorial Delf University Press, Delf-Netherlands, 1991.
- Lundgaard L.E. Partial Discharge-Part XII. Acoustic Partial Discharge Detection-Fundamental Considerations. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 8(4):25-31, julio-agosto 1992.
- Mashikian M.S. Partial Discharge Location as a Diagnostic Tool for Power Cables. Power Engineering Society Winter Meeting, 2000. *IEEE*, 3:1604-1608, January 2000.
- Mason J.H. Enhancing the Significance of PD Measurements. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2(5):876-888, octubre 1995.
- Naidu M.S., Kamaraju V. *High Voltage Engineering*, 2a ed., USA, Mc Graw Hill, 1995.
- Piche L., Pelissou S., Crine J.P. Cable Insulation Density Profile Determined from Ultrasonic Velocity Measurements. *Electrical Insulation Magazine*, *IEEE*, 8(3):33-36, mayo-junio 1992.
- Standard IEC 60840: 2004. Power Cables with Extruded Insulation and their Accessories for Rated Voltages Above 30 kV ($U_m=36$ kV) up to 150kV ($U_m=170$ kV)-Test Methods and Requirements.
- Standard IEC 60502-4: 2005. Power Cables with Extruded Insulation and their Accessories for Rated Voltages from 1 kV ($U_m=1,2$ kV) up to 30 kV ($U_m=36$ kV). Part 4: Test Requirements on Accessories for Cables with Rated Voltages from 6 kV ($U_m=7,2$ kV) up to 30 kV ($U_m=36$ kV).
- Standard IEC 60885-3: 1988. Electrical Test Methods for Electric Cables. Part 3: Test Methods for Partial Discharge Measurements on Lengths of Extruded Power Cables.
- Suzuki H., Kanaoka, M., Sekii Y. Measurements on the Frozen Strain in XLPE Insulated Cables Using Thermo Mechanical Analysis, en: Proceedings of the Twenty-First Symposium on Electrical Insulating Materials, septiembre, 1988, 26, pp. 255-258.
- Working Grup 21.10. Survey on the Service Performance on HV AC Cable Systems. Report of Study Committee 21 Insulated Cables. *Electra*, (137):47-59, agosto 1991.

Semblanza de autores

Pau Casals-Torrens. Doctor en ingeniería industrial por la Universidad Politécnica de Cataluña (España, 2007). Ingeniero electricista por la Universidad de Oriente (Venezuela, 1984), realizó estudios de maestría en sistemas de potencia eléctrica en la Universidad Central de Venezuela, 1989. Ese mismo año ingresó como ingeniero en el departamento de calidad y ensayos eléctricos de la empresa BICC-General Cable, Manlleu, España. Desde 2001 es profesor del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica de Cataluña. Combina sus actividades docentes y de investigación con la participación en proyectos con empresas del sector eléctrico.

Adrián González-Parada. Ingeniero eléctrico por el Instituto Tecnológico de Querétaro, realizó estudios de maestría en ingeniería eléctrica con especialidad en alta tensión en la F.I.M.E.E. de la Universidad de Guanajuato y obtuvo el doctorado en ingeniería eléctrica por la Universidad Politécnica de Cataluña en Barcelona, España. Es profesor-investigador en la DICIS de la Universidad de Guanajuato y responsable del laboratorio de máquinas eléctricas y dispositivos especiales. Sus áreas de interés son la superconductividad aplicada en equipos eléctricos, el uso eficiente de la energía en los sistemas eléctricos y la confiabilidad de los equipos eléctricos en la red eléctrica.

Ricard Bosch-Tous. Doctor en ingeniería industrial por la Universidad Politécnica de Cataluña. Cuenta con 15 años de experiencia industrial en el ámbito de mantenimiento de equipos con mando electrónico de potencia en industria siderúrgica y automotriz. Desde 1984 es profesor del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la ETSEIB-UPC. Actualmente dirige el laboratorio de alta tensión, alternadores y máquinas eléctricas especiales de la ETSEIB-UPC, su trabajo se centra en la optimización de toda la cadena energética en sistemas que utilicen electricidad.

Comportamiento de la sedimentación en un sistema de micropartículas

Behaviour of the Sedimentation in a System of Microparticles

Salinas-Salas G.

*Departamento de Tecnologías Industriales
Facultad de Ingeniería
Universidad de Talca
Correo: gsalinas@utalca.cl*

Información del artículo: recibido: octubre de 2010; aceptado: mayo de 2011

Resumen

El artículo presenta la determinación experimental del comportamiento de la velocidad de sedimentación de un sistema de micropartículas, y a partir de los resultados alcanzados, se evalúa si existe alguna diferencia entre el valor del exponente de la función de obstrucción determinado por Richardson y Zaki (1954), para el caso de sistemas de micropartículas no coloidales de orden de tamaño entre 1.500 nm y 200 nm, se describe además el comportamiento de dicho exponente.

Conjuntamente, se expone el trabajo de carácter experimental desarrollado bajo la Norma DIN 66111 (1989), utilizando para éste una centrífuga analítica, así como el análisis de los datos extraídos. Los datos mostraron que existe una diferencia entre el valor propuesto por Richardson y Zaki en 1954, respecto a los determinados experimentalmente. Esto permite concluir, que para sistemas de micropartículas menores a un tamaño de 1.000 nm, existe un nuevo valor del exponente de la función de obstrucción del orden de 11,5. Además, se pudo determinar que existe una relación entre dicho exponente y el tamaño medio de las micropartículas que conforman el sistema de partículas que sedimenta.

Descriptores

- experimental
- velocidad de sedimentación
- micropartículas
- no coloidales
- función de obstrucción
- exponente

Abstract

This paper presents the experimental determination of the behaviour of the sedimentation velocity of systems of micro particles based on the results achieved, evaluating whether there is any difference between the value of the exponent of hindrance function, determined by Richardson and Zaki (1954), in the case of noncolloidal micro particles in order of size between 1,500 nm to 200 nm, as well as describing the behaviour of the already mentioned exponent.

At the same time, exposed the experimental work developed under the standard DIN 66111 (1989), using an analytical centrifuge, as well as the analysis of data extracted from it. The data showed that there is a difference between the value proposed by Richardson and Zaki in 1954, in relation to those experimentally determined. This allows us to infer that for micro-systems smaller than 1,000 nm, there is a new value of the exponent of the hindrance function, approximately of the order of 11.5. Additionally, it was determined that there is a relation between the already mentioned exponent and the average size of micro particles that comprise the system of particles settled.

Keywords

- experimental
- sedimentation velocity
- micro particles
- noncolloidal
- hindrance function
- exponent

Introducción

El comportamiento del proceso de sedimentación de una micropartícula no coloidal rígida, lisa, de forma esférica, en un fluido viscoso del tipo newtoniano, fue modelado matemáticamente por Stokes en 1850, asumiendo un régimen de escurrimiento laminar del fluido por sobre la esfera. Lo que permitió evaluar la velocidad terminal de sedimentación de una partícula esférica, a la que se le denomina velocidad de Stokes (u_{Stokes}) y se evalúa a través de la ecuación (1).

$$u_{Stokes} = \frac{(\rho_p - \rho_f) \cdot x^2 \cdot z \cdot g}{18 \cdot \mu} \quad (1)$$

donde:

- Z factor de aceleración (-),
- ρ_p densidad media de la partícula (kg/m^3),
- ρ_f densidad media del fluido (kg/m^3),
- x diámetro medio del sistema de micropartículas (m),
- g aceleración de gravedad (m/s^2),
- z factor de aceleración (-),
- μ viscosidad dinámica del fluido ($\text{Pa}\cdot\text{s}$).

Empero, esta modelación no considera el comportamiento de un sistema de micropartículas que sedimentan simultáneamente en un fluido, donde se genera una corriente en sentido opuesto al movimiento de las micropartículas, reduciendo así su velocidad de sedimentación terminal. A esto se debe sumar la existencia de fuerzas de carácter hidrodinámico que se manifiestan

en la formación de puentes hidráulicos entre micropartículas, en el arrastre viscoso, en la succión que las micropartículas de mayor diámetro realizan sobre las de menor diámetro y por el cambio de impulso de las micropartículas que desarrollan una mayor velocidad sobre otras de menor velocidad. Además, se debe considerar los efectos de las fuerzas de origen electroquímico, entre las micropartículas. Estas fuerzas se originan a partir de la carga electrostática superficial de las micropartículas y las características del fluido, que se comporta como un electrolito. Luego, la magnitud como la polaridad de la carga eléctrica superficial de las micropartículas y la concentración del ion hidrógeno libre o índice de acidez (pH) del electrolito, pasan a ser elementos dominantes en el fenómeno de sedimentación. Estos efectos se cuantifican a través del potencial Zeta. La suma de todos estos efectos produce una significativa disminución en la velocidad de sedimentación terminal efectiva de un sistema de micropartículas. Esto dio lugar a la aparición de la denominada función de obstrucción (Fr), la que se aplica a la velocidad de Stokes y permite predecir la velocidad de sedimentación terminal efectiva de un sistema de micropartículas ($u_{SedimentaciónEfectiva}$). La función de obstrucción está definida matemáticamente a través de la ecuación (2).

$$Fr = \frac{u_{SedimentaciónEfectiva}}{u_{Stokes}} \quad (2)$$

De los distintos modelos matemáticos existentes para evaluar la función de obstrucción, el propuesto por Richardson y Zaki en 1954 de carácter semiempírico, es el

más aceptado y empleado actualmente. Su forma matemática se representa a través de la ecuación (3).

$$Fr = (1 - c)^n \quad (3)$$

donde:

- c concentración volumétrica de micropartículas en la suspensión (-),
- $(1 - c)$ porosidad de la suspensión (-),
- n exponente de la función de obstrucción, dependiente del valor del Número de Reynolds del escurrimento del fluido sobre la micropartícula (-).

El valor del exponente de la función de obstrucción, según Richardson y Zaki para sistemas de micropartículas, es $n = 4,65$, independiente de su tamaño en régimen laminar.

El presente trabajo tiene como objetivos determinar si existe alguna diferencia entre el valor del exponente de la función de obstrucción propuesto por Richardson y Zaki para micropartículas de tamaño del orden de 1.000 nm o submicrométricas y determinar si existe alguna diferencia de comportamiento para sistemas de micropartículas de tamaño mayor a 1.000 nm, respecto a sistemas de menor tamaño, a fin de considerar estos efectos en el diseño de equipos de medida y de sistemas de separación de materiales particulados en suspensión, lo que incrementaría tanto su precisión de medida como su eficiencia de separación.

Trabajo experimental

El trabajo experimental se desarrolló siguiendo la norma DIN 66111 sobre ensayos de sedimentación en el Laboratorio de Partículas del Grupo de Trabajo de Técnicas de Procedimientos Mecánicos de la Universidad Técnica de Dresde (Arbeitsgruppe für Mechanische Verfahrenstechnik an der Technische Universität Dresden), empleando micropartículas calibradas de óxido de silicio (SiO_2) suspendidas en agua con hidróxido de potasio (KOH), lo que permitió que las suspensiones alcanzaran un índice de acidez (pH) del orden de 9,2 potenciales Zeta entre -50 y -60 mV, los que aseguran la estabilidad de la suspensión. Las micropartículas empleadas, son estándares calibrados, producidos por Geltech Inc. Son de forma esférica, rígidas, lisas y su densidad es 2.135 kg/m^3 . Sus diámetros medios ($x_{50,3}$) y de Sauter (x_{ST}), se presentan en la tabla 1.

Las figuras 1 y 2 presentan imágenes de los sistemas de micropartículas empleados, capturadas mediante un microscopio electrónico Zeiss Gemini 942.

Tabla 1. Tamaños característicos de los sistemas de micropartículas utilizados

Micropartículas	$x_{50,3}$ (nm)	x_{ST} (nm)
Geltech S201	320	270
Geltech S501	420	320
Geltech S1001	1.220	1.210
Geltech S1501	1.550	1.560

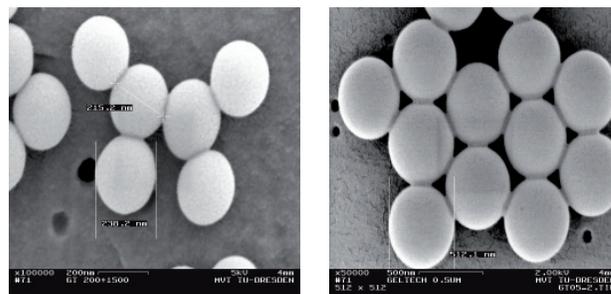


Figura 1. Imágenes de las micropartículas de Geltech S201, Geltech S501, presentadas de izquierda a derecha

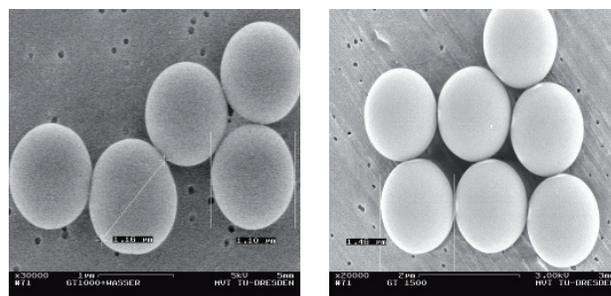


Figura 2. Imágenes de las micropartículas de Geltech S1001 y Geltech S1501, presentadas de izquierda a derecha

A su vez, la figura 3 muestra las distribuciones acumulativas e incrementales del tamaño de partículas para los sistemas empleados en el trabajo experimental.

Como se aprecia en la figura 3, el sistema de partículas empleado presenta una distribución incremental muy estrecha en torno a su valor nominal, esto indica que los sistemas ensayados, fueron en la práctica, conformados por partículas con un diámetro único, lo que se confirma por su distribución acumulativa. Esto es relevante, ya que durante el proceso de sedimentación no se presentarían turbulencias e interferencias hidrodinámicas por las distintas velocidades de sedimentación que adquieren partículas de diferente tamaño y masa.

La metodología de preparación de las muestras consiste en amasar el material particulado y el agua, empleando una balanza de laboratorio Sartorius Analytic AC 210S. Se procede a mezclarlos y dispersar las partículas en el agua en fases, comenzando con el empleo de

un agitador magnético IKA. Se continúa el proceso de dispersión empleando un homogenizador mecánico de alta velocidad ULTRATurrax T50. Para finalizar el proceso de dispersión, se emplea un equipo de ultrasonido modelo CV 33, fabricado por Bioblock Scientific.

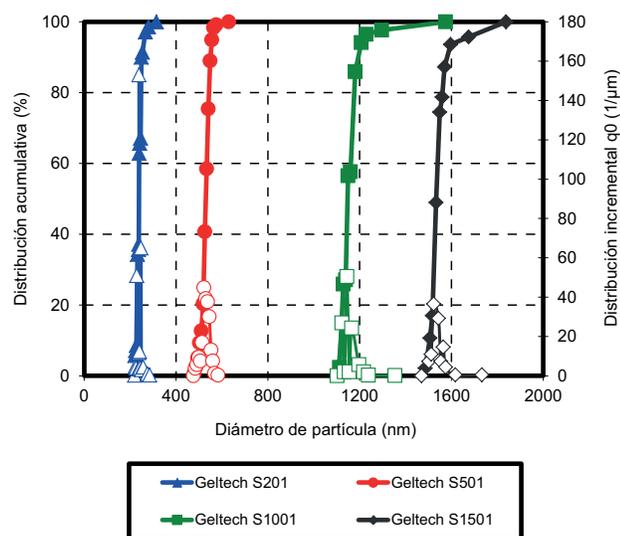


Figura 3. Distribución de tamaño acumulativo (izquierda) y la distribución de tamaño incremental (derecha) para los sistemas de micropartículas de Geltech S201, Geltech S501, Geltech S1001 y Geltech S1501

A continuación se determina el índice de acidez de la suspensión mediante un pH-Meter WTW Multilab 540 y se agrega el hidróxido de potasio a fin de alcanzar un pH del orden de 9,2. Se procede a determinar la eficacia de la dispersión a través de las distribuciones de tamaño, empleándose para esto un espectrómetro láser HELLOS, fabricado por Sympatec y el potencial Zeta de la suspensión mediante un espectrómetro de ultrasonido DT1200 fabricado por Dispersion Technology Inc.

Las muestras se cargan en una centrífuga analítica LUMiFuge 116, fabricada por L.U.M. GmbH, que se empleó en los ensayos. Se utilizó esta máquina, ya que la reducida masa de las micropartículas obliga a generar un campo de fuerzas de mayor magnitud que el gravimétrico (centrífugo), para obtener una sedimentación estable y tiempos de medida razonables. Las principales especificaciones técnicas de este equipo se presentan en la tabla 2. Especificaciones detalladas se encuentran disponibles en el sitio web de la firma L.U.M. GmbH. (www.lum-gmbh.com/pages/products/lumifuge/products_lumifuge_specifications.htm).

Una discusión detallada de la metodología de preparación de las muestras, así como el rango de las mediciones y el análisis de los datos suministrados por la

centrífuga analítica LUMiFuge 116 se presenta en Babick *et al.* (2006), Babick *et al.* (2007) y Ripperger *et al.* (2002).

Tabla 2. Datos técnicos de la centrífuga analítica LUMiFuge 116

Tipo de equipo	Sistema de análisis de suspensiones LUMiFuge™
Intervalo de medida	10 s - 600 s
Velocidad de centrifugación	300 - 3.000 rpm
Fuente de luz	nir-led
Foto sensor	CCD sensor de una fila
Número de cubetas	8
Cubetas	Rectangulares de polystyrol, 3x7 mm ²
Volumen de prueba	0,3 cm ³
Rango de tamaños de partículas	50 nm - 100.000 nm
Rango de velocidades de sedimentación	1 nm/s - 750.000 nm/s

Resultados y discusión

Los ensayos realizados mostraron claramente la existencia de una función de obstrucción, como se desprende de la figura 3, donde se presenta la función de obstrucción con el valor del exponente propuesto por Richardson y Zaki (1954) y los valores experimentales obtenidos de los ensayos realizados respecto a la porosidad de las suspensiones.

Si bien, el exponente propuesto por Richardson y Zaki (Fr por R&Z), permite predecir el valor que alcanzaría la velocidad terminal de sedimentación y su comportamiento respecto a la porosidad y/o concentración volumétrica, ya que tiene en cuenta elementos empíricos que permiten considerar los efectos de las fuerzas electroquímicas a las fuerzas mecánicas e hidrodinámicas. No obstante, el hecho de emplear suspensiones elaboradas a partir de sistemas de micropartículas de orden de tamaño menores a 1.500 nm, genera una magnitud relativa de las fuerzas de tipo electroquímico, respecto a las mecánicas e hidrodinámicas, lo que origina una reducción mayor de la velocidad terminal de sedimentación que la predicha por Richardson y Zaki.

Al respecto, cabe considerar que a medida que el tamaño de las partículas micrométricas existentes en las suspensiones disminuye, se genera un mayor número de partículas en ella a igualdad de concentración volumétrica. Esto produce que tanto la masa como el volumen individual de cada micropartícula decrezca a medida que disminuye su tamaño en una mayor pro-

porción en comparación a su área exterior, lo que conduce a que disminuya la magnitud de las fuerzas generadas por la acción de un campo mecánico de fuerzas, como el gravitatorio o centrífugo, mientras que las fuerzas electroquímicas se incrementan, ya que están asociadas a la superficie expuesta de la micropartículas al fluido viscoso o electrolito, como se plantea en la teoría DVLO, propuesta por Deryarin y Landau (1941).

Estas fuerzas electroquímicas, que corresponden a la suma de las fuerzas electroestáticas, las de van der Waals y las de atracción de Born, dan por resultado una fuerza neta de repulsión entre las micro partículas, de acuerdo a la magnitud del potencial Zeta del electrolito de la suspensión, como lo indican Batchelor (1982), Ettmayr *et al.* (2001) y Babick *et al.* (2007). Esto conduce a la conformación de una red tridimensional dinámica de micropartículas, la cual se encontraría en un equilibrio de fuerzas cuasi estable. Por lo que esta situación genera una reducción significativa de la velocidad de sedimentación individual de las micropartículas, que redundaría en la disminución de la velocidad de sedimentación de todo el sistema.

Esto es especialmente notorio en los sistemas de partículas de menor tamaño, ya que su fuerza inercial o peso se compensa por las fuerzas electroestáticas o superficiales que tienden a inmovilizar a las micropartículas.

Para determinar los valores que adopta el exponente n de la función de obstrucción para las micropartículas ensayadas, se procedió a ajustar los valores medios experimentales de la velocidad terminal de sedimentación normalizada, mediante curvas de tendencia lineales. Esto permitió determinar los valores del exponente n , y sus respectivos coeficientes de determinación múltiples (R^2). Para esto se utilizó el software Excel de Microsoft Office® 2007, que también se empleó para evaluar los coeficientes de variación (C.V.) de los datos experimentales.

La tabla 3 presenta los exponentes de la función de obstrucción, obtenidos a partir de los datos experimentales, sus coeficientes de variación (C.V.) y los respectivos coeficientes de determinación múltiples (R^2) del ajuste, los que evidencian la alta confiabilidad de los resultados obtenidos, ya que todos los coeficientes de variación se encuentran bajo un valor de 1,5%; mientras que los coeficientes de determinación múltiples se encuentran por sobre el valor 0,99.

De la figura 4 y la tabla 3, se deduce que existe una relación directa entre el valor que adopta el exponente de la función de obstrucción respecto al tamaño de las micropartículas que conforman el sistema que sedimenta. Esta relación es un incremento del valor del exponente, a medida que disminuye el tamaño de las

micropartículas, tendiendo a un valor cuasi constante del orden de 11,5 para sistemas de micropartículas de tamaño menor o igual a 1.000 nm. Para los sistemas de micropartículas de tamaño 1.500 nm, este exponente alcanza el valor de 8,77.

Tabla 3. Exponentes, coeficientes de variación y coeficientes de determinación obtenidos para la función de obstrucción

Diámetro medio de micropartículas (nm)	Exponente n (-)	C.V. (%)	R^2 (-)
320	11,88	1,4	0,992
420	11,07	1,3	0,997
1.220	11,02	1,2	0,992
1.550	8,77	1,0	0,991

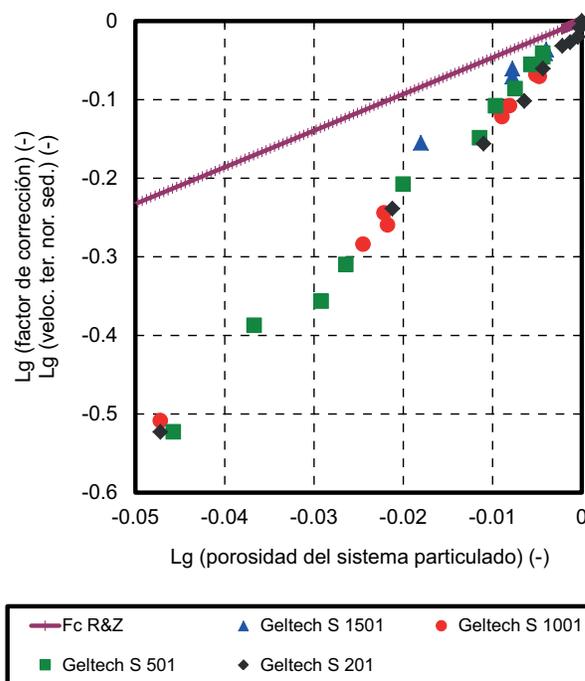


Figura 4. Contrastación del comportamiento de la función de obstrucción y los valores experimentales obtenidos respecto a la porosidad de la suspensión

Conclusiones

Se puede concluir que la función de obstrucción de velocidad de sedimentación, para el caso de sistemas de micropartículas del orden de tamaño micrométrico, requiere utilizar un exponente mayor al propuesto por Richardson y Zaki (1954), convencionalmente empleado ($n = 4,65$).

A su vez, estos valores no son constantes, sino que dependen del tamaño medio de las micropartículas que

conforman el sistema que sedimenta. El valor del exponente de la función de obstrucción se incrementa a medida que disminuye el tamaño de las micropartículas, tendiendo a estabilizarse para sistemas de tamaño medio menor o igual a 1.000 nm, por lo que, considerar un valor para este exponente del orden de 11,5 es conveniente, ya que da cuenta, de mejor manera, de la compleja fenomenología de la sedimentación de sistemas o conjuntos de partículas no coloidales de ese orden de tamaño. Esto tiene especial importancia en el diseño de equipos de medida y de los sistemas de separación de material particulado en suspensión, ya que al considerarlo tanto en su diseño y operación permite incrementar su precisión y eficiencia, con el consecuente incremento de productividad y reducción de consumo de energía.

Agradecimientos

El autor expresa su agradecimiento al Grupo de Trabajo de Técnicas de Procedimientos Mecánicos de la Universidad Técnica de Dresde, (Arbeitsgruppe für Mechanische Verfahrenstechnik an der Technische Universität Dresden), por las facilidades prestadas para el desarrollo del trabajo experimental.

Referencias

- Babick F., Stintz M., Salinas-Salas G. Sedimentation of Colloidal Particles, Experimental Study on the Influence of the Ionic Strength on the Hindrance Function, en: 12th IACIS International Conference on Surface and Colloid Science 2006, Beijing, China, 2006.
- Babick F., Salinas-Salas G., Sobisch T., D. Lerche D. Particle Interactions in Dispersions of Micro and Nanoparticles. PARTEC 2007-Word Congress on Particle Technology, 2007, Nürnberg, Deutschland, 2007.
- Batchelor G. Sedimentation in a Dilute Dispersion of Spheres. *Journal Fluid Mechanics* 119:379-408, 1982.
- Deryarin B.V., Landau L. Theory of the Stability of Strongly Charged Hydrophobic Sols and the Adhesion of Strongly Charged Particles in Solution Electrolytes. *Acta Physiochim, URSS* 14, pp. 633-662, 1941.
- DIN Norme 66111 Über Sedimentationsmethoden, 1989.
- Ettmayr A., Bickert G., Stahl W. Zur Konzentrationsabhängigkeit des Sedimentationsvorgangs von Feinstpartikelsuspensionen in Zentrifugen. *F & S (Filterieren und Separieren)* 15(2):58-65, 2001.
- Richardson J., Zaki W. Sedimentation and Fluidisation. Part I. *Trans. Inst. Chem. Eng.*, pp. 35-53, 1954.
- Ripperger S., Salinas-Salas G., Stintz M., Bessely B. Untersuchungen der Sedimentation von nanoskaligen Partikeln im Zentrifugalfel. *Filtrieren & Separieren*, 15(2):220-238, 2002.
- Stokes G.C. On the Effect of the Internal Friction of Fluids on the Motion of Pendulums. *Trans. Cambridge Phil. Soc.* 9, Pr II, X. *Math. and Phys. Papers* III. 61, 1850.

Semblanza del autor

Gonzalo Salinas-Salas. Es ingeniero civil mecánico de la Universidad Técnica del Estado y posee el grado de doctor ingeniero, otorgado por la Universidad Técnica de Dresde. En su carrera ha sido profesor del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Santiago de Chile y de la Universidad Católica del Maule. Actualmente es profesor asistente en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Talca, teniendo a su cargo cátedras del área de termofluidos de ingeniería mecánica. Su área de investigación son los procesos de sedimentación de partículas aplicados al diseño de procesos industriales, en particular, los de descontaminación.

LA REVISTA INGENIERÍA, INVESTIGACIÓN Y TECNOLOGÍA
ES IMPRESA POR EL DEPARTAMENTO DE PUBLICACIONES
DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UNAM.

ESTA EDICIÓN SE TERMINÓ DE IMPRIMIR EN
MARZO DE 2012 EN MÉXICO DF Y CONSTA DE 1800
EJEMPLARES MÁS SABRANTES POR REPOSICIÓN.

DERECHOS RESERVADOS ©

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO, 2012.

Editorial Policy [extract]

www.ingenieria.unam.mx/~revistafi/PEA-Autores.pdf

Instructions for authors

Ingeniería, Investigación y Tecnología is an arbitrated journal for scientific and technological research, edited by the Engineering Faculty of UNAM. Its purpose is to spread original and unpublished knowledge and information related to all areas of engineering. It is a forum for professors, researchers, professionals and students of the world, which includes articles both in English and Spanish.

This guide is an extract of the document available in our Web Site, for elaborating and submitting manuscripts, and can be modified without previous notice; therefore it is the responsibility of the authors, to be sure they have consulted the last version. It is recommended that you open and download it before you submit your work, and that you verify the date of the last version, which appears at the end of the document.

About the papers

Only articles related to areas of engineering will be considered for evaluation and its possible publication.

The following types of papers will not be accepted:

- General information articles.
- Historic reviews, even if their topic is focused on some engineering problem.
- Studies of the state of the art (or reviews) in engineering that do not contribute a solution or innovation alternative to the problem in question.
- Papers whose objective is essentially to promote or attack persons, work teams, products and/or services, or third parties in general.

About submitting

The articles will be received through the Open Journal System in the following address:

<http://www.journals.unam.mx/index.php/ingenieria>

In order to submit an article for evaluation, you must register as an author of our Journal in the system. In the event of any problems registering or submitting your paper, the alternative is to send the corresponding files by e-mail to: iit.arbitraje@gmail.com

The files uploaded must include one that contains a **Letter of Introduction**, addressed to the Editor or to the Arbitrage Coordinator and signed by all the authors. The letter constitutes the first of many formal communications between the authors and the Editor about the paper and it allows you to request the consideration of your work for evaluation. See the instructions for authors mentioned above for the complete description of the issues it must include.

At the time the paper is received, an e-mail to the main author will be sent with the corresponding **Acknowledgment of Receipt** as an attachment. In case of a delay in receiving such e-mail, you should ask for it by the same means to the address: iit.arbitraje@gmail.com

About the format of the manuscript

- Written in **Microsoft Word**.
- Only **one column** with single line spacing.
- There is no restriction on margins or font.
- **Figures, photographs y tables** should be inserted in their **corresponding place** throughout the article, not at the end.
- The figures and photos used lose resolution when inserted in Word and are accepted only for evaluation purposes. The authors must have **TIFF** o **JPG** versions with at least 300 dpi quality, ready to be sent in case the paper is accepted for publication. Color figures and photographs may be included, and will appear in color in the electronic version of the Journal.
- The article must be approximately **ten pages** long (around 3000 to 6000 words) including tables and figures or photos. The Editor reserves the right to ask that long articles be shortened. In exceptional cases the Editor can agree to an extension.
- The mathematical expressions must be written clearly and the **International System of Units** must be used.

About the contents

The papers must have the following not necessarily exhaustive structure sequence.

- Title, complete identification of authors, abstract and keywords in English and Spanish.
- Introduction, methods, results, discussion, conclusion, acknowledgments, appendices, and references
- About the authors.

It is the responsibility of the authors:

- To have the necessary permissions for publication from the institution that financed all or part of the work.
- To timely obtain the necessary reproduction permissions for the material used from other publications, as well as to include the appropriate references.

Once more you are reminded that this is an extract of the complete version of the document **Editorial Policy** (instructions for authors) available in our website that must be thoroughly read to comply with all the requirements.

Política Editorial [extracto]

www.ingenieria.unam.mx/~revistafi/PEA-Autores.pdf

Instrucciones para los autores

Ingeniería, Investigación y Tecnología es una publicación arbitrada, de investigación científica y tecnológica editada por la Facultad de Ingeniería de la UNAM. Su propósito es difundir información y conocimientos originales e inéditos relacionados con la ingeniería en todas sus áreas. Es un foro para profesores, investigadores, profesionales y estudiantes de todo el mundo, el cual incluye artículos tanto en español como en inglés.

La presente guía es un extracto del documento disponible en nuestro sitio Web, para la elaboración y envío de manuscritos, y puede ser modificado sin previo aviso, por lo que es responsabilidad de los autores, asegurarse de haber consultado la última versión. Se recomienda verlo o descargarlo en nuestro sitio web antes de enviar su trabajo y verificar la fecha de la última modificación, la cual aparece al final de ese documento.

Sobre el tipo de artículos

Serán considerados para evaluación y posible publicación únicamente los artículos relacionados con cualquiera de las ingenierías.

No serán considerados los siguientes tipos de trabajos:

- Artículos de divulgación.
- Reseñas históricas aún cuando la reseña trate sobre algún problema de la ingeniería.
- Estudios del estado del arte de la ingeniería que no aporten alguna solución o alternativa de innovación a lo analizado.
- Artículos cuya finalidad esencial sea promover o agredir a particulares, grupos de trabajo, productos y/o servicios o terceros en general.

Sobre el envío

Los artículos serán recibidos a través del **Open Journal System** en la siguiente dirección:

<http://www.journals.unam.mx/index.php/ingenieria>

Para someter un artículo a evaluación, deberá registrarse en dicho sistema como autor de nuestra revista. En caso de tener problemas con el registro o al momento del envío, puede hacernos llegar su manuscrito y los archivos correspondientes al correo: iit.arbitraje@gmail.com

Se debe incluir como archivo anexo, una **carta de presentación**, dirigida a la Dirección de la Revista o a la Coordinación de Arbitraje y firmada por todos los autores. Esta carta constituye la primera comunicación formal de los autores con el Editor acerca del artículo que se envía y les permite solicitar la consideración del trabajo para su evaluación. Consulte las instrucciones para autores en nuestra página de Internet para ver la descripción completa de los puntos que debe incluir.

Al recibir el artículo, le será enviado por correo electrónico al autor principal, el **Acuse de Recibo** correspondiente. En caso de no recibirlo a la brevedad, deberá solicitarlo por la misma vía a la dirección: iit.arbitraje@gmail.com

Sobre el formato del manuscrito

- Escrito en **Word**.
- **Una sola columna** con interlineado sencillo.
- No hay restricción en cuanto al tipo de fuente o los márgenes.
- Las **figuras, fotografías y tablas** deben ir colocadas en el **lugar que les corresponde** a lo largo del artículo, no al final.
- Las figuras y fotografías utilizadas, al insertarlas en Word pierden resolución y se admiten sólo para la evaluación. Los autores deben contar con las versiones **TIFF o JPG** con calidad mínima de 300 dpi, para enviarlas en caso de que su artículo sea aceptado para publicación. Pueden incluirse figuras y fotos a color, las cuales aparecerán así en la versión electrónica.
- El artículo debe constar aproximadamente de **diez páginas** (de 3000 a 6000 palabras aproximadas), incluyendo tablas y figuras. El Editor puede pedir que artículos más largos se recorten. En casos excepcionales se podrá acordar con el Editor una extensión.
- Las expresiones matemáticas deben estar escritas claramente y se debe utilizar el **Sistema Internacional de Unidades**.

Sobre el contenido del manuscrito

Los artículos deberán llevar la siguiente secuencia en su estructura.

- Título, identificación completa de autores, resumen y palabras clave en español e inglés.
- Introducción, desarrollo, discusión o resultados y análisis, conclusiones, agradecimientos apéndices y referencias.
- Semblanza de los autores.

Es responsabilidad de los autores:

- Contar con los permisos necesarios para su publicación por parte de la institución que financió la investigación.
- Obtener oportunamente los permisos de reproducción parcial de material de otras publicaciones, así como citar correctamente su procedencia.

Se les recuerda una vez más que este es un extracto del documento de la **Política Editorial** disponible en nuestra página de Internet y que deben consultar en la versión completa todos los puntos de las instrucciones para cumplir los requerimientos.

127-139

Sincronización de sistemas electrónicos en un mismo circuito integrado

Linares-Aranda M.
González-Díaz O.
Salim-Maza M.

175-184

Control neuronal auto-ajutable en tiempo real de un proceso de producción de fibra óptica polimérica

Fuentes-Silva C.
Noriega-Ponce A.
Ocampo-Mortera M.A.
Serroukh I.

227-235

Respuesta sísmica de estructuras adyacentes conectadas por amortiguadores viscosos lineales

Pulido-Delgado J.L.
Rodríguez-Cuevas C.
Martín Duran-García H.

141-153

Wideband Indoor Radio Propagation Measurements at 5.4 GHz

Aragón-Zavala A.
Mavrakis D.
Castañón G.
Cuevas-Ruiz J.L.

185-197

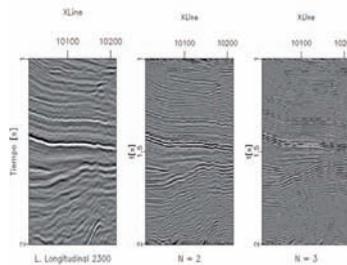
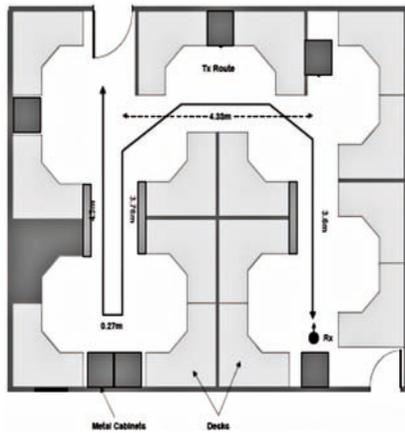
Reproducibilidad en representación sísmica

González-Verdejo O.
Chávez-Pérez S.

237-247

Diseño y construcción de un sistema de lavado en vivo para los aisladores de transformadores

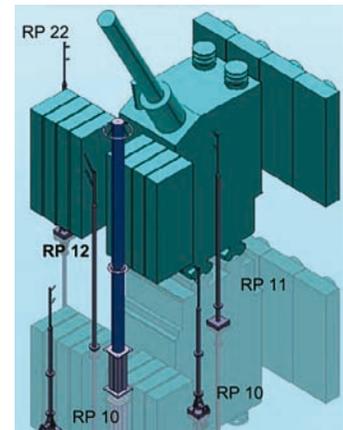
Lizama-Cámara Y.A.
Mendieta-Antúnez J.A.
Blanco-Brisset E.
Olivares-Galván J.C.
Escarela-Pérez R.



199-213

Análisis de impacto causado por estructuras coherentes en sistemas de combustión de flujo giratorio

Valera-Medina A.
Syred N.
Griffiths A.



155-168

Avances tecnológicos en la producción de alginatos en México

Hernández-Carmona G.
Rodríguez-Montesinos Y.E.
Arvizu-Higuera D.L.
Reyes-Tisnado R.
Murillo-Álvarez J.J.
Muñoz-Ochoa M.

215-225

Herramienta educativa para la formación de ingenieros en protecciones eléctricas: relevador de distancia

Trujillo-Guajardo LA.
Conde-Enríquez A.

249-256

Monitoreo en línea de accesorios de instalaciones eléctricas subterráneas mediante emisiones acústicas

Casals-Torrens P.
González-Parada A.
Bosch-Tous R.

169-174

Aplicación inversa del método de Krylov para obtener una matriz de orden tres

Cortés-Rosas J.J.
Arganis-Juárez M.L.



257-262

Comportamiento de la sedimentación en un sistema de micropartículas

Salinas-Salas G.