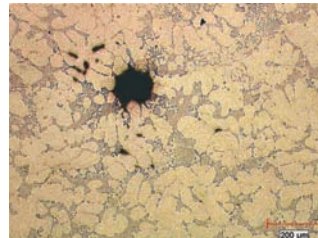
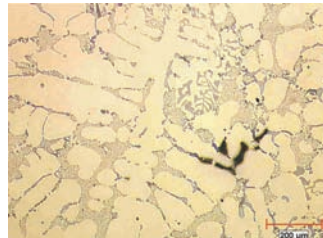
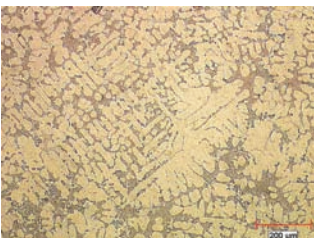
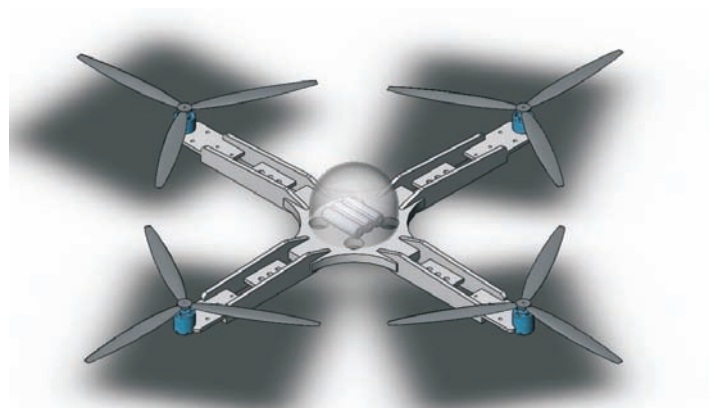




# INGENIERÍA

## Investigación y Tecnología

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO . FACULTAD DE INGENIERÍA . MÉXICO 2009





## UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

DR. JOSÉ NARRO ROBLES  
Rector

DR. SERGIO ALCOCER MARTÍNEZ DE CASTRO  
Secretario General

...

MTRO. JUAN JOSÉ PÉREZ CASTAÑEDA  
Secretario Administrativo

DRA. ROSAURA RUIZ GUTIÉRREZ  
Secretaria de Desarrollo Institucional

M.C. RAMIRO JESÚS SANDOVAL  
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 AIDAMA RODRÍGUEZ  
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

LEOVIGILDO CEPEDA DÁVILA  
Comisión Federal de Electricidad

RICARDO CHICUREL UZIEL  
Instituto de Ingeniería, UNAM

GUILLERMO CISNEROS PÉREZ  
Universidad Politécnica de Madrid

JOSÉ LUIS FERNÁNDEZ ZAYAS  
Foro Consultivo Científico y Tecnológico

DANTE FRATTA  
School Civil Environmental Engineering, Louisiana State University

POLIPTRO MARTÍNEZ AUSTRIA  
Comisión Nacional del Agua

JORGE GIL MENDIETA  
Coordinación de la Investigación Científica, UNAM

ROBERTO MELI PIRALLA  
Investigador Emérito, UNAM

FEDERICO MÉNDEZ LAVIELLE  
Facultad de Ingeniería, UNAM

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

DANTE JAIME MORÁN ZENTENO  
Instituto de Geología, UNAM

FELIPE OCHOA ROSSO  
Felipe Ochoa y Asociados Consultores

OCTAVIO RASCÓN CHÁVEZ  
Instituto Mexicano del Transporte

HUGH RUDNICK  
Pontificia Universidad Católica de Chile

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

CARLOS L.V. AIKEN  
University of Texas at Dallas

JAIME URRUTIA FUCUGAUCHI  
Instituto de Geofísica, UNAM

JACINTO VIQUEIRA LANDA  
Profesor Emérito, UNAM

...

### [ REVISTA INGENIERÍA INVESTIGACIÓN Y TECNOLOGÍA ]

MARCIA AIDA GONZÁLEZ OSUNA  
Directora Técnica y Editora

EVA MYRIAM SOROA ZARAGOZA  
Coordinación Editorial

CUITÁHUAC ERNESTO SÁNCHEZ BASILIO  
Coordinación de Arbitraje

YURITZI RENÉE OLIVERA RANGEL  
Coordinación de Diseño y Edición

...

[ CONTENIDO / INDEX ]

- 285-293 DISEÑO EXERGOECONÓMICO DE LA GEOMETRÍA DE UN CALENTADOR DE AIRE TUBULAR VERTICAL DE TRES PASOS  
EXERGOECONOMIC DESIGN OF THE GEOMETRY OF A VERTICAL, THREE STEPS, TUBULAR AIR HEATER  
J.J. Marín-Hernández, M.L. González-Petitlean y O.M. Cruz-Fonticiella
- 295-302 WIRELESS PROPAGATION CHARACTERISTICS FOR VEHICULAR Ad-HOC NETWORKS IN MOTORWAY ENVIRONMENTS  
CARACTERÍSTICAS DE PROPAGACIÓN INALÁMBRICA PARA REDES Ad-HOC VEHICULARES EN AUTOPISTAS  
R. Aquino-Santos, V. Rangel-Licea, LA. Villaseñor-González and A. Edwards
- 303-319 DESPACHO UNIFICADO DE ENERGÍA Y RESERVAS EN MERCADOS DE ELECTRICIDAD  
UNIFIED DISPATCH OF ENERGY AND RESERVES IN ELECTRICITY MARKETS  
J.A. Quiñónez-Osobampo, J.H. Tovar-Hernández y G. Gutiérrez-Alcaraz
- 321-330 FLUCTUACIONES DE PRESIÓN EN LA BASE DEL POZO DE OSCILACIÓN DEL P.H. ZIMAPÁN HGO., CON DIFERENTES ARREGLOS ESTUDIADOS EN MODELO HIDRÁULICO ANTE LAS CONDICIONES MÍNIMAS DE OPERACIÓN  
PRESSURE FLUCTUATIONS ON THE BED OF SURGE TANK AT THE H.P. ZIMAPAN, HGO., WITH DIFFERENT ARRANGEMENTS STUDIED ON HYDRAULIC MODELS, WITH THE LOWEST OPERATION CONDITIONS  
H. Marengo-Mogollón, F.J. Ochoa-Álvarez y C. Cortés-Cortés
- 331-342 EFECTO DEL NaCl SOBRE UNA ALEACIÓN DE Al-Si HIPOEUTÉCTICA VACIADA  
EFFECT OF NaCl UPON AN Al-Si CASTING ALLOY HIPOEUTEC  
E.J. Martínez-Delgado, R. Ortega de la Rosa, M.A. Cisneros-Guerrero y S. Haro-Rodríguez
- 343-352 LA ENERGÍA DEL VIENTO EN MÉXICO: SIMULACIÓN DE UN PARQUE EÓLICO Y APLICACIÓN DE ANÁLISIS PROBABILÍSTICO DE SEGURIDAD  
WIND POWER IN MEXICO: SIMULATION OF A WIND FARM AND APPLICATION OF PROBABILISTIC SAFETY ANALYSIS  
C. Martín del Campo-Márquez, P.F. Nelson-Edelstein y M.Á. García-Vázquez
- 353-361 CÁLCULO DE REGISTROS SINTÉTICOS DE INGRESOS POR CUENCA PROPIA DE UN SISTEMA DE PRESAS DE LA REGIÓN NOROESTE DE MÉXICO, CARACTERIZADA POR EVENTOS INVERNALES  
SYNTHETIC GENERATION OF INFLOWS IN A DAM SYSTEM OF A REGION CHARACTERIZED BY EXTRAORDINARY WINTER EVENTS  
R. Domínguez-Mora y M.L. Arganis-Juárez
- 363-372 EFECTO DE LA IMIDAZOLINA [IM-NH17] EN EL PROCESO DE CORROSIÓN DEL ACERO API 5L-X52 EN SALMUERAS ACIDIFICADAS  
EFFECT OF A IMIDAZOLINE [IM-NH17] ON THE CORROSION PROCESS OF API 5L-X52 STEEL EXPOSED IN ACIDIFIED BRINES  
A.G. Reynaud- Morales, M. Casales-Díaz, J.G. Chacón-Nava, L. Martínez-Gómez, A. Martínez-Villafañe y J.G. González-Rodríguez
- 373-382 NONLINEAR MOTION CONTROL OF A ROTARY WING VEHICLE POWERED BY FOUR ROTORS  
CONTROL NO LINEAL DEL MOVIMIENTO DE UN VEHÍCULO DE ALA ROTATIVA IMPULSADO POR CUATRO ROTORES  
S. Araujo-Estrada, E. Liceaga-Castro and H. Rodríguez-Cortés



Foto: Parque de la Venta II.  
Brenda Guadalupe Salazar Aguilar

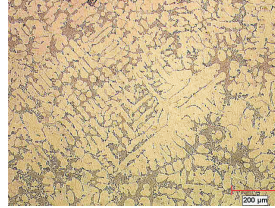


Foto: Aleacion de Aluminio A319  
Dendritas



Foto: Parque de la Venta II.  
de Jesús Serrano

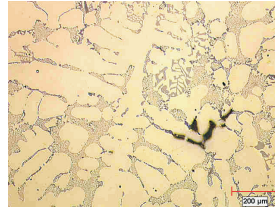


Foto: Aleacion de Aluminio A319  
Microrech



Foto: Parque de la Venta II.  
de Fernando Aguilar

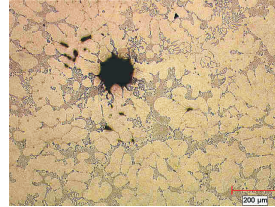


Foto: Aleacion de Aluminio A319  
Gas

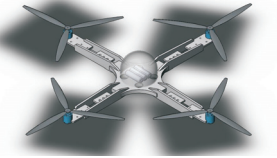


Foto: Tetra rotor

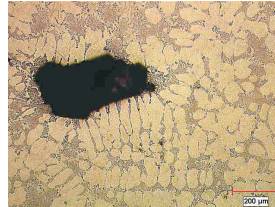


Foto: Aleacion de Aluminio A319  
Gas

Ingeniería. Investigación y Tecnología es una publicación trimestral de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México. (Editada desde 1908 como Ingeniería. Órgano de la Sociedad de la Escuela Nacional de Ingenieros).

Ingeniería. Investigación y Tecnología is a magazine published quarterly by the Facultad de Ingeniería, UNAM. (Edited since 1908 as Ingeniería. Órgano de la Sociedad de la Escuela Nacional de Ingenieros).

ISSN 1405-7743

Publicación indizada en Periódica (Índice de Revistas Latinoamericanas en Ciencias), Latindex (Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal), Índice de Revistas Mexicanas de Investigación Científica y Tecnológica del CONACYT, Índice de Revistas del CREDI, perteneciente a la Organización de Estados Iberoamericanos, Índice Internacional de Revistas Actualidad Iberoamericana de Chile, así como en los Índices Electrónicos E-Journal, Red AL y C (Red de Revistas Científicas de América Latina y El Caribe, España y Portugal) y SciELO México (Scientific Electronic Library Online).

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, DF. 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 ó Apartado Postal 70-440, Administración de Correos "Ciudad Universitaria". Tel. 5622 0876, Fax. 5616 1899. Lada Nacional (0155), Lada Internacional (5255).

Derechos Reservados (All rights reserved). DR ©  
Universidad Nacional Autónoma de México, 2009.

Sitio Web: [www.ingenieria.unam.mx/~revistafi](http://www.ingenieria.unam.mx/~revistafi)

E-mail: [iit.revista@gmail.com](mailto:iit.revista@gmail.com)

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.

## Diseño exergoeconómico de la geometría de un calentador de aire tubular vertical de tres pasos

### *Exergoeconomic Design of the Geometry of a Vertical, Three Steps, Tubular Air Heater*

J.J. Marín-Hernández

*Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica.  
Universidad Veracruzana, Campus Xalapa. Veracruz, México.  
E-mail: jmarin@uv.mx*

M.L. González-PetitJean

*Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica.  
Universidad Veracruzana, Campus Xalapa. Veracruz, México  
E-mail: mgonzalezpetitjean@gmail.com*

O.M. Cruz-Fonticiella

*Facultad de Ingeniería Mecánica.  
Universidad Central de las Villas. Cuba.  
E-mail: ocf@uclv.edu.cu*

(Recibido: noviembre de 2006; aceptado: septiembre de 2008)

#### **Resumen**

En este trabajo se aplica el método estructural termoeconómico para hallar el diseño geométrico óptimo de un calentador de aire tubular vertical, cuyo diseño original es ampliamente utilizado en calderas instaladas en ingenios azucareros. La función objetivo describe el costo total de operación asociado a las irreversibilidades debidas a la diferencia de temperaturas y la caída de presión en función de los principales parámetros geométricos. Dicha función objetivo es continua dentro del rango de análisis, aunque tiene un fuerte comportamiento no lineal, por lo tanto, para resolverla se utilizó el Toolbox de Optimización del Software MATLAB 6.5, a través de la función FMINCON, que utiliza un algoritmo de media escala, la Programación Secuencial Cuadrática (PQS) y el método Cuasi-Newton. Se concluye, principalmente, con que el nuevo diseño propicia un decremento en los costos de operación del equipo de 1,97US\$/s al compararse con el de la caldera RETO45-28.

**Descriptores:** Termoeconomía, optimización geométrica, intercambiadores de calor.

#### **Abstract**

*In this paper, the structural method of thermoeconomics is applied to find the optimal geometrical design to a vertical tubular air heater, whose original design is widely used on boilers installed on sugar mills. The objective function describes the running cost due to the temperature difference and pressure drop in function of the main geometrical parameters. The objective function is continuous in the interval of analysis and has a strong non linear behavior, then for solving it, the Optimization Toolbox from MATLAB 6.5 was used, through the function FMINCON, which uses an algorithm of medium*

*scale, the Sequential Quadratic Programming (SQP) and the Cuasi Newton method. The new design reduces the running cost of equipment 1,97 US\$/s compared to the one of RETO 45-28 system.*

**Keywords:** *Thermoeconomics, geometric optimization, heat exchangers.*

## Introducción

Uno de los retos más grandes que enfrenta la ciencia y la tecnología en los inicios del siglo XXI es diseñar sistemas energéticos más eficientes, tomando en cuenta consideraciones técnicas, económicas, normativas y medioambientales (Gong et al., 1997) que garanticen el suministro de bienes y servicios a la sociedad actual en base a los recursos limitados con los que cuenta el planeta, pero sin comprometer el consumo de las futuras generaciones (Cornelissen, 1997).

“Surge la termoeconomía como una técnica de análisis integradora que permite asignar costos, diagnosticar, mejorar y optimizar el diseño de sistemas térmicos tomando en cuenta no los valores subjetivos de las cosas sino el costo real, es decir, su costo exergético” (Valero, 2001).

Actualmente, dentro de la industria azucarera no se cuenta con los recursos suficientes para realizar grandes inversiones en la modernización de sus unidades, por ello, tienen prioridad aquellos proyectos que con un mínimo de recursos obtengan grandes beneficios en aprovechamiento de la energía. Los Equipos de Recuperación de Calor (ERC) de calderas adquieren un rol fundamental en este sentido.

Los Calentadores de Aire (CA) tubulares verticales de tres pasos en donde los gases circulan por el interior de los tubos y el aire realiza tres pasos en flujo cruzado a contracorriente, son equipos tradicionalmente utilizados como recuperadores de calor en calderas instaladas en ingenios azucareros; sin embargo, su diseño obedece sólo a criterios técnico-económicos basados en el primer principio de la termodinámica.

Varios autores (Holman, 1998; Hugot 1986; Incropera et al., 1996; entre otros) recomiendan amplios rangos de valores para definir su geometría (diámetros, pasos, espesores, velocidades, etc.), aunque se carece de la influencia del segundo principio.

Es por ello que en el presente trabajo se aplica el método estructural termoeconómico para hallar el diseño geométrico óptimo de un calentador de aire tubular vertical de tres pasos. Se concluye principalmente que la nueva propuesta provoca un decremento en los costos de operación del equipo de 1,97 US\$/s con respecto al

diseño tradicional instalado en una caldera RETO 45-28.

## Desarrollo

### Método

Una vez conocidos los parámetros óptimos de frontera (flujo de gases, flujo de agua, flujo de aire, temperaturas de entrada y salida de las corrientes en análisis) del calentador de aire a partir de la primera etapa de optimización bajo una estrategia global (Marín, 2003), se determinan los parámetros geométricos óptimos a partir de una estrategia termoeconómica local de optimización, basada en los costos de producción asociados a las irreversibilidades totales.

La optimización geométrica de los calentadores de aire, idealmente debería llevarse a cabo en interacción termoeconómica con el resto de los elementos de la caldera, lo cual sería un procedimiento demasiado complejo.

Sin embargo, el carácter de la exergía como parámetro universal de la calidad de la energía para la asignación de costos, permite aproximadamente plantear una técnica de optimización local, siendo entonces la función objetivo definida por los costos totales de operación formados por los costos asociados a la irreversibilidad por transferencia de calor (IDT) y a los asociados a la caída de presión (ICP).

La ecuación 1 representa la función objetivo, la cual se desarrolla en función de parámetros de operación conocidos, constantes, propiedades termofísicas y de las variables geométricas libres de diseño.

El problema de optimización es:

$$\text{Min } \dot{C}_T = c_I^{\Delta T} \dot{I}^{\Delta T} + c_I^{\Delta P} \dot{I}^{\Delta P} \quad (1)$$

La ecuación 1 se puede representar desarrollada por 2.

$$\dot{C}I_T = T_0 \left\{ c_I^{\Delta T} \left[ C_{gas} \ln \left( \frac{T_{gas,s}}{T_{gas,e}} \right) + C_{air} \ln \left( \frac{T_{air,s}}{T_{air,e}} \right) \right] + c_I^{\Delta P} \left[ \dot{m}_{gas} R_{gas} \ln \left( \frac{P_{gas,e}}{P_{gas,s}} \right) + \dot{m}_{air} R_{air} \ln \left( \frac{P_{air,e}}{P_{air,s}} \right) \right] \right\} \quad (2)$$

donde  $C_{gas} = \dot{m}_{gas} c_{p,gas}$

y  $C_{air} = \dot{m}_{air} c_{p,air}$

Para este análisis se realizaron las siguientes consideraciones:

1. Las propiedades termo físicas son constantes y se determinan para el promedio de temperatura de las corrientes de entrada y salida.
2. El arreglo de tubos es al tresbolillo.
3. El número de Nusselt para el aire se calcula para una relación  $S_T/S_L < 2$ .
4. Aunque se trata de un arreglo en flujo cruzado a contracorriente, la relación  $\epsilon = f(NTU, C, Arr)$  se aproximará a la de un arreglo a contracorriente.
5. El espesor de los tubos es invariable.
6. Los tubos son de acero al carbono.
7. El calentador de aire se encuentra bien aislado y no tiene pérdidas de calor al medio.
8. No existen infiltraciones en el calentador.

Las variables geométricas a optimizar son: el diámetro de los tubos, la longitud de los tubos, el número total de tubos y el número de tubos a lo ancho de la caldera. Para simplificar el problema, se consideró al paso transversal y longitudinal como dados. Las restricciones son expresadas por las ecuaciones 8 a 13. De forma indirecta se pueden determinar también los siguientes parámetros óptimos: la velocidad de gases y aire, el área de transferencia de calor, el coeficiente global de transferencia de calor, etc.

En el anexo se enumeran las ecuaciones necesarias que han sido utilizadas para hallar la IDT en función de los parámetros geométricos más importantes, expresada por 5 y 6.

$$\dot{I}^{\Delta T} = T_0 \left\{ C_{gas} \ln \left[ 1 - C \left( \frac{1 - e^{-\pi D_e LNU \left( \frac{1}{C_{gas}} - \frac{1}{C_{air}} \right)}}{1 - C e^{-\pi D_e LNU \left( \frac{1}{C_{gas}} - \frac{1}{C_{air}} \right)}} \right) \left( 1 - \frac{T_{air,e}}{T_{gas,e}} \right) \right] + C_{air} \ln \left[ 1 + C \left( \frac{1 - e^{-\pi D_e LNU \left( \frac{1}{C_{gas}} - \frac{1}{C_{air}} \right)}}{1 - C e^{-\pi D_e LNU \left( \frac{1}{C_{gas}} - \frac{1}{C_{air}} \right)}} \right) \left( \frac{T_{gas,e}}{T_{air,e}} - 1 \right) \right] \right\} \quad (5)$$

siendo:

$$U = \left[ 4,51 \frac{(D_e - 2\epsilon)^{1,8} \mu_{gas}^{0,5} \left( \frac{N}{\dot{m}_{gas}} \right)^{0,8}}{c_{p,gas}^{0,3} k_{gas}^{0,7}} + 0,23 \frac{\mu_{air}^{0,27} (D_e - 2\epsilon) \left( (S_T - D_e)(L/3) N_A \right)^{0,6}}{D_e^{0,6} c_{p,air}^{0,33} k_{air}^{0,66}} \left( \frac{S_T}{S_L} \right)^{1/6} + \frac{(D_e - 2\epsilon) \ln \left( \frac{D_e}{(D_e - 2\epsilon)} \right)}{2k_{AC}} \right]^{-1} \quad (6)$$

La ICP queda definida por 7, (ver anexo)

$$\dot{I}^{\Delta P} = T_0 \left\{ \dot{m}_{gas} R_{gas} \ln \left[ 1 + \frac{0,014L}{(D_e - 2\epsilon)^5 \rho_{gas} P_{gas,s}} \left( \frac{\dot{m}_{gas}}{N} \right)^2 \left( 1 + \left( \frac{914}{(D_e - 2\epsilon)} + 730494 \left( \frac{\mu_{gas} (D_e - 2\epsilon) N}{\dot{m}_{gas}} \right)^{1,3} \right)^{0,5} \right) \right] - \dot{m}_{air} R_{air} \ln \left[ 1 - \frac{1,93}{\rho_{air} P_{air,e}} \left( \frac{\mu_{air}}{D_e} \right)^{0,25} \left( \frac{3N}{N_A} + 1 \right) \left( \frac{1 - D_e / \sqrt{S_T / 2)^2 + S_L^2}}{S_T / D_e - 1} \right)^{0,5} \left( \frac{\dot{m}_{air}}{(S_T - D_e)(L/3) N_A} \right)^{1,75} \right] \right\} \quad (7)$$

La función objetivo se considera acotada por las siguientes restricciones:

$$a) 0.01 < D_e < 0.15 \quad (8)$$

$$b) S_T > D_e \quad (9)$$

$$c) \frac{S_T}{S_L} < 2 \quad (10)$$

$$d) N_A(D_e + s_T) < B_{cal} \quad (11)$$

$$e) D_e < \sqrt{s_T^2 + s_L^2} \quad (12)$$

$$f) 1 - \frac{De}{\frac{s_L}{\frac{s_T}{D_e} - 1}} > 0,53 \quad (13)$$

### Caso estudio (Resultados y análisis de resultados)

La función objetivo es continua dentro del rango de análisis, tiene un fuerte comportamiento no lineal, por lo tanto, para resolverla se utilizó el Toolbox de Optimización del Software MATLAB 6.5, a través de la función FMINCON, que utiliza un algoritmo de media escala, la Programación Secuencial Cuadrática (POS) y el método Cuasi-Newton.

Se introducen al problema los datos mostrados en la tabla 1. Los costos de irreversibilidad asociados a

diferencia de temperatura y caída de presión se obtienen de Marín (2003).

Los valores óptimos de las variables libres de diseño se comparan con el calentador de aire instalado en la caldera RETO 45-28 en la tabla 2. Algunos de los parámetros óptimos importantes se listan a continuación y se comparan con el calentador de aire instalado en la caldera RETO 45-28 en la tabla 3.

Dentro de los resultados se observa que, para las consideraciones realizadas, es recomendable ocupar todo el ancho de la caldera con tubos, así mismo, utilizar la máxima longitud posible de los tubos, hasta donde el espacio del generador de vapor lo permita; el diámetro de los tubos del CA optimizado y el diseño tradicional son iguales para los pasos transversal y longitudinal dados; el número de tubos se incrementa considerablemente para el diseño optimizado, así también, aumenta el número de tubos en la profundidad del equipo de 28 a 50 unidades; las velocidades del aire y gases disminuyen como una consecuencia del incremento de las áreas transversales de paso del aire y gases, de tal forma que el coeficiente global de transferencia de calor disminuye de 29,18 a 20,30 W/(m<sup>2</sup> K); los NTU del diseño optimizado pasan de 2,51 a 7,22 y el área total de transferencia de calor se cuadruplica. Se observa que para el primer caso, la irreversibilidad provocada por la caída de presión es sólo 3% de la total generada, mientras que en el diseño optimizado pasa a ser 1,9%, todo esto provoca un decremento en los costos de operación del equipo de 1,97 US\$/s al compararse con el de la caldera RETO 45-28.

Tabla 1. Datos del calentador de aire (continúa...)

Nombre	Símbolo	Cantidad	Unidades
Espesor de tubos	$\epsilon$	$1,6 \times 10^{-3}$	m
Paso transversal	$S_T$	0,06	m
Paso longitudinal	$S_L$	0,04	m
Conductividad del acero	$k_{AC}$	50,2	W/(m°C)
Conductividad de gases	$k_{gas}$	0,0401	W/(m°C)
Conductividad de aire	$k_{air}$	0,0393	W/(m°C)
Calor específico de gases	$c_{p, gas}$	1,19	kJ/(kg K)
Calor específico de aire	$c_{p, air}$	1,005	kJ/(kg K)
Viscosidad dinámica de gases	$\mu_{gas}$	$24,5 \times 10^{-6}$	Pa.s
Viscosidad dinámica de aire	$\mu_{air}$	$26 \times 10^{-6}$	Pa.s
Flujo de gases	$\dot{m}_{gas}$	29,5	kg/s



Tabla 1. Datos del calentador de aire (...continuación)

Nombre	Símbolo	Cantidad	Unidades
Flujo de aire	$\dot{m}_{air}$	17,48	kg/s
Costo de irr. por diferencia de temp. del CA	$c_l^{\Delta T}$	$3.36 \times 10^{-6}$	\$/kJ
Costo de irr. por caída de presión del CA	$c_l^{\Delta P}$	$16 \times 10^{-6}$	\$/kJ
Temperatura de referencia	$T_0$	298,15	K
Temperatura de gases de entrada	$T_{gas,en}$	609,75	K
Temperatura de aire de entrada	$T_{air,en}$	298,15	K
Rugosidad del tubo	Rug	$45,7 \times 10^{-6}$	m
Constante R de gases	$R_{gas}$	0,3023	kJ/(kg K)
Constante R de aire	$R_{air}$	0,287	kJ/(kg K)
Densidad de gases	$\rho_{gas}$	0,748	kg/m <sup>3</sup>
Densidad de aire	$\rho_{air}$	0,746	kg/m <sup>3</sup>
Presión de salida de gases	$P_{gas,s}$	98 806	Pa
Presión de entrada de aire	$P_{air,e}$	102 809	Pa
Ancho de la caldera	$B_{CAL}$	6,84	m

Tabla 2. Parámetros geométricos óptimos

Variable	Sistema RETO 45-28	Sistema óptimo	Unidades
$D_e$	0.04	0.04	m
$L$	3,6	10	m
$N$	3192	5000	tubos
$N_A$	114	100	tubos

Tabla 3. Comparación de parámetros del calentador de aire entre el diseño tradicional y el diseño optimizado termoeconómicamente (continúa...)

Variable	Sistema RETO 45-28	Sistema óptimo	Unidades
Número de tubos en la profundidad	28	50	tubos
Área transversal de gases	3,39	6,22	m <sup>2</sup>

Tabla 3. Comparación de parámetros del calentador de aire entre el diseño tradicional y el diseño optimizado termoeconómicamente (...continuación)

Variable	Sistema RETO 45-28	Sistema óptimo	Unidades
Velocidad de gases	14,35	7,50	m/s
Número de Reynolds de flujo gases	13051	8380	-
Coefficiente de convección lado gases	51,78	31,25	W/(m <sup>2</sup> C)
Área transversal de aire	3,17	6,74	m <sup>2</sup>
Velocidad de aire	6,35	3,48	m/s
Número de Reynolds de flujo de aire	9829	3970	-
Coefficiente de convección lado aire	61,63	14,12	W/(m <sup>2</sup> C)
Coefficiente global de transferencia de calor	29,18	20,30	W/(m <sup>2</sup> C)
Área de transferencia de calor	1385	6250	m <sup>2</sup>
NTU	2,51	7,22	-
Irreversibilidad por diferencia de temperatura	762,58	652,5	kW
Irreversibilidad por caída de presión	23,63	12,58	kW
Costo de irr. por diferencia de temperatura	9,22	7,89	\$/s
Costo de irr. por caída de presión	1,36	0,72	\$/s
Costo de operación	10,59	8,62	\$/s

### Nomenclatura

$A$  Área de transferencia de calor [m<sup>2</sup>]  
 $A_{gas}$  Área transversal del flujo de gases [m<sup>2</sup>]  
 $A_{air}$  Área transversal del flujo de aire [m<sup>2</sup>]  
 $Arr$  Arreglo  
 $B_{CAL}$  Ancho de caldera [m]  
 $C$  Costo total de operación del sistema global [\$], Capacidad calorífica [kJ/(s K)], razón de capacidades caloríficas [adimensional]  
 $c_p$  Calor específico a presión constante [kJ/(kg K)]  
 $c_i$  Costo por irreversibilidad [\$/kJ]  
 $D_e$  Diámetro exterior de tubos [m]  
 $D_i$  Diámetro interior de tubos [m]  
 $Eu$  Número de Euler [adimensional]  
 $he$  Coeficiente de transferencia de calor por convección, lado externo [W/m<sup>2</sup>C]  
 $hi$  Coeficiente de transferencia de calor por convección, lado interno [W/m<sup>2</sup>C]  
 $I$  Irreversibilidad [kJ]

$I_T$  Irreversibilidad total [kJ]  
 $k$  Conductividad de térmica [W/(m °C)]  
 $L$  Longitud de tubos [m]  
 $Min$  Minimizar  
 $m$  Masa [kg]  
 $N$  Número total de tubos [tubos]  
 $N_A$  Número de tubos a lo ancho de la caldera [tubos]  
 $N_p$  Número de tubos a lo profundo [tubos]  
 $Nu$  Número de Nusselt [adimensional]  
 $NTU$  Número de unidades de transferencia [adimensional]  
 $P$  Presión [MPa]  
 $Pr$  Número de Prandtl [adimensional]  
 $R$  Constante particular del gas [kJ/(kg K)]  
 $Re$  Número de Reynolds [adimensional]  
 $Rug$  Rugosidad de tubos [m]  
 $S_T$  Paso transversal [m]  
 $S_L$  Paso longitudinal [m]  
 $T$  Temperatura [°C]  
 $U$  Coeficiente global de transferencia de calor [W/(m<sup>2</sup> °C)]

V Velocidad [m/s]  
 Z Relación de número de tubos [adimensional]

**Griegos**

$\Delta$  Gradiente  
 $\varepsilon$  Espesor de tubo [m]  
 $\epsilon$  Eficacia [%]  
 $\lambda$  Factor de fricción [adimensional]  
 $\mu$  Viscosidad dinámica [Pa.s]  
 $\nu$  Viscosidad cinemática [m<sup>2</sup>/s]  
 $\rho$  Densidad [kg/m<sup>3</sup>]

**Subíndices**

AC Acero  
 0 Estado del medio ambiente  
 air Aire  
 e Corriente de entrada  
 gas Gases de combustión  
 s Corriente de salida

**Superíndices**

$\Delta T$  Asociado a la diferencia de temperatura  
 $\Delta P$  Asociado a la caída de presión  
 $\cdot$  Variable por unidad de tiempo

**Anexos**

Ecuaciones utilizadas para determinar la IDT en función de los parámetros geométricos de un calentador de aire tubular vertical de flujo cruzado a contracorriente de tres pasos instalado en una caldera bagacera.

$C_{air} < C_{gas}$  A.1

$C_{air} = C_{min}$  A.2

$\epsilon = \frac{T_{air,s} - T_{air,e}}{T_{gas,e} - T_{air,e}}$  A.3

$C_{gas} (T_{gas,e} - T_{gas,s}) = C_{air} (T_{air,s} - T_{air,e})$  A.4

$C = \frac{C_{min}}{C_{max}}$  A.5

$\epsilon = \frac{1 - \text{Exp}[-NTU(1-C)]}{1 - C \text{Exp}[-NTU(1-C)]}$  A.6

$NTU = \frac{UA}{C_{min}}$  A.7

$A = \pi D_e LN$  A.8

$U = \left[ \frac{1}{h_i} + \frac{D_i \ln(D_e / D_i)}{2k_{AC}} + \frac{D_e}{D_i h_e} \right]^{-1}$  A.9

Análisis lado gases

$Nu_{gas} = 0.023 Re_{gas}^{0,8} Pr_{gas}^{0,3}$  A.10

$Re_{gas} = \frac{V_{gas} D_i}{\nu_{gas}}$  A.11

$\nu_{gas} = \frac{\mu_{gas}}{\rho_{gas}}$  A.12

$Pr_{gas} = \frac{c_{p,gas} \mu_{gas}}{k_{gas}}$  A.13

$\dot{m}_{gas} = \rho_{gas} V_{gas} A_{gas}$  A.14

$A_{gas} = \frac{\pi D_i^2 N}{4}$  A.15

$N = N_A N_p$  A.16

$Nu_{gas} = \frac{h_i D_i}{k_{gas}}$  A.17

Análisis lado aire

$Nu_{air} = 0.41 Re_{air}^{0,6} Pr_{air}^{0,33} \left( \frac{s_T}{s_L} \right)^{1/6} \text{ si } \frac{s_T}{s_L} < 2$  A.18

$Nu_{air} = \frac{h_e D_e}{k_{air}}$  A.19

$Re_{air} = \frac{V_{air} D_e}{\nu_{air}}$  A.20

$\nu_{air} = \frac{\mu_{air}}{\rho_{air}}$  A.21

$Pr_{air} = \frac{c_{p,air} \mu_{air}}{k_{air}}$  A.22

$\dot{m}_{air} = \rho_{air} V_{air} A_{air}$  A.23

$$A_{air} = (s_T - D_\epsilon) \left(\frac{L}{3}\right) N_A \quad A.24$$

Ecuaciones utilizadas para determinar la ICP en función de los parámetros geométricos de un calentador de aire tubular de flujo cruzado a contracorriente de tres pasos instalado en una caldera bagacera.

Análisis lado gases

$$\Delta P_{gas} = \lambda \rho_{gas} \frac{L}{(D_\epsilon - \epsilon)} \frac{V_{gas}^2}{2} \quad A.25$$

$$\Delta P_{gas} = P_{gas} - P_{gas,s} \quad A.26$$

$$\lambda = 0,0055 \left[ 1 + \left( 20000 \frac{Rug}{(D_\epsilon - \epsilon)} + \frac{10^6}{Re^{1,3}} \right)^{0,5} \right] \quad A.27$$

Análisis lado aire

$$\Delta P_{air} = P_{air,e} - P_{air,s} \quad A.28$$

$$\Delta P_{air} = Eu \rho_{air} V_{air}^2 \quad A.29$$

$$Eu = 1,93 \left( 3 \frac{N}{N_A} + 1 \right) \left( \frac{1 - \frac{D_\epsilon}{\sqrt{s_T^2 - s_L^2}}}{\frac{s_T}{D_\epsilon} - 1} \right)^{0,5} Re^{-0,25}$$

para

$$\frac{1 - \frac{D_\epsilon}{\frac{s_L}{D_\epsilon}}}{\frac{s_T}{D_\epsilon} - 1} > 0,53 \quad A.30$$

**Conclusiones**

La optimización bajo una perspectiva termoeconómica de las variables geométricas de los CA del tipo tubular vertical con flujo cruzado a contracorriente, los cuales son típicos de calderas bagaceras, propone novedosamente algunos cambios en la construcción tradicional. Para las consideraciones realizadas se recomienda: mantener el diámetro en 40 mm; hasta donde los espacios de la caldera lo permitan, utilizar tubos más largos (10 m); colocar 100 tubos a lo ancho de la caldera y 50 en la

profundidad para conformar un total de 5000 tubos. De esta forma, el coeficiente global de transferencia de calor se reduce a 20,30 W/(m<sup>2</sup> K), los NTU se incrementan a 7,22 y las velocidades de gases y aire se reducen a 7,50 y 3,48 m/s respectivamente. Así, el diseño del CA optimizado geoméricamente provoca un decremento en los costos de operación del equipo de 1,97 US\$/s al compararse con el de la caldera RETO 45-28.

**Referencias**

Cornelissen R.L. Thermodynamics and Sustainable Development. (PhD. Thesis). The Netherlands. Twente University. 1997.  
 Gong M., Wall G. On Exergetics Economics and Optimization of Technical Processes to Meet Environmental Conditions. Presented at TAIES '97, Beijing, China, June 10-13, pp. 453-460. 1997.  
 Holman P.J. *Transferencia de calor*. Octava Edición. España. Mc Graw-Hill. 1998.  
 Hugot E. *Handbook on Cane Sugar Engineering*. Third edition. New York. Elsevier Science Publishing Company Inc. 1986.  
 Incropera F.P., De Witt D.P. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 4<sup>th</sup> edition. USA. Wiley and Sons. 1996.  
 Marín J.J. Optimización termoeconómica para el diseño de recuperadores de calor instalados en calderas bagaceras. Tesis (Doctorado). Santa Clara, Cuba. Centro de Estudios Energéticos y Tecnologías Ambientales, Facultad de Mecánica, Universidad Central de las Villas. 2003.  
 Valero A. *Termoeconomía: El punto de encuentro de la termodinámica, la economía y la ecología*. CIRCE, Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad de Zaragoza. Noviembre 1997.

---

#### **Semblanza de los autores**

*Juan José Marín-Hernández.* Ingeniero mecánico electricista por la Universidad Veracruzana, obtuvo el grado de doctor en ciencias técnicas por la Universidad Central de las Villas, República de Cuba. Actualmente es investigador y profesor de tiempo completo en la FIME de la Universidad Veracruzana.

*Miguel Luis González-Petit-Jean.* Es ingeniero mecánico electricista por la Universidad Autónoma de Nuevo León, obtuvo el grado de maestría en ciencias térmicas por la Universidad de París y el grado de doctor en ciencias técnicas por la Universidad Central de las Villas, República de Cuba. Actualmente es profesor de tiempo completo en la FIME de la Universidad Veracruzana.

*Oscar Miguel Cruz-Fonticiella.* Es ingeniero mecánico y doctor en ciencias técnicas por la Universidad Central de las Villas, República de Cuba. Actualmente es investigador y profesor titular en la misma universidad.

# Wireless Propagation Characteristics for Vehicular Ad-Hoc Networks in Motorway Environments

## *Características de propagación inalámbrica para redes Ad-Hoc vehiculares en autopistas*

R. Aquino-Santos  
Universidad de Colima.  
E-mail: [aquinor@ucol.mx](mailto:aquinor@ucol.mx)

V. Rangel-Licea  
Universidad Nacional Autónoma de México.  
E-mail: [victor@fi-b.unam.mx](mailto:victor@fi-b.unam.mx)

L.A. Villaseñor-González  
Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, CICESE.  
E-mail: [luisvi@cicese.mx](mailto:luisvi@cicese.mx)

A. Edwards  
Universidad de Colima.  
E-mail: [arted@ucol.mx](mailto:arted@ucol.mx)

(Recibido: mayo de 2007; aceptado: noviembre de 2008)

### **Abstract**

This paper presents the measurements and analytical results regarding important characteristics of wireless propagation for vehicular ad-hoc networks in motorway environments, including Doppler Effect, Free Space Signal propagation, path loss and system operating margin. In this work, we employ IEEE 802.11b wireless cards for inter-vehicular communication to analyze large and small-scale propagation models. According to large-scale models, the maximum distance between the transmitter and receiver vehicle is 446 m using 5 dBi omni-directional antennas. Additionally, the feasible System Operating Margin (SOM) of 446 m is greater than 13 dB, which is over the minimum margin recommended. Our results show that the Doppler Effect does not affect the transmission between communication partners at high speeds in small-scale models. Finally, we realize an experiment to validate the results in the worst case scenario, when the transmitter and receiver vehicle are traveling in opposing directions on a straightaway. Results show that at least 8 packets can be relayed when the transmitter and receiver antennas are mounted on automobile dashboards.

**Keywords:** Wireless propagation characteristics, vehicular ad-hoc networks, Doppler Effect, free space signal propagation, path loss, system operating margin.

### **Resumen**

*Este trabajo presenta los resultados de medición y análisis realizados sobre importantes características de propagación inalámbrica en redes ad-hoc vehiculares. Las*

*variables estudiadas incluyen: Efecto Doppler, propagación de las señales en espacio libre, pérdidas por trayectoria y el margen de operación del sistema. Se emplearon tarjetas inalámbricas 802.11b para la comunicación inter-vehicular. El estudio analítico consideró dos modelos de propagación: modelos a pequeña y gran escala. De acuerdo a los modelos de gran escala, la máxima distancia entre el vehículo transmisor y receptor es de 446 m, empleando antenas omni-direccionales con 5dBi de potencia y margen de operación del sistema (MOS) de 13 dB, el cual está sobre el mínimo margen recomendado. Los resultados señalan que en modelos a pequeña escala, el efecto Doppler no afecta la comunicación entre el vehículo transmisor y receptor en altas velocidades. Finalmente, se realizaron pruebas para validar resultados en el caso más complicado, cuando el vehículo transmisor y receptor viajan en sentidos opuestos. Los resultados experimentales muestran que es posible enviar un mínimo de 8 paquetes cuando las antenas del transmisor y receptor se montan al interior de los automóviles.*

**Descriptores:** *Características de propagación inalámbrica, redes ad-hoc vehiculares, efecto Doppler, Propagación de señales en el espacio libre, pérdidas por trayectoria, margen de operación del sistema.*

## Introduction

Current tendencies show that future wireless communication services will increasingly depend on the vehicular ad-hoc network (VANET) concept to more efficiently communicate mobile networks and provide inexpensive infrastructureless networks. This concept involves relatively short radio multi-hops (between 200-1000m), low cost antennas deployed in each car, and low transmitter power (around 32 mW). Communication in future vehicular ad-hoc networks will not be restricted to neighboring vehicles traveling within a specific radio transmission range, which is presently the case in typical wireless networks. The VANET system will provide multi-hop communication capabilities by using intermediate “relay” vehicles that are located between the source and destination. Vehicles traveling between the source-destination pair act as intermediate relay nodes which forward the data to the destination. As a result, the multi-hop capability of the VANET system significantly increases the virtual transmission range, as it enables communication with more distant vehicles.

Several measurements have been conducted in microcellular (Xia *et al.*, 1993 and Xia *et al.*, 1994) and wireless environments (Michel *et al.*, 1998, Maltz *et al.*, 2001, Singh *et al.*, 2002, D’Amico and Lauss, 2004, Mosque *et al.*, 2004, Singh *et al.*, 2005 and Wang *et al.*, 2005). However, only one of these studies has focused on potential Doppler Effect impact, which can significantly shift carrier frequencies.

A survey on Inter-vehicle communication Systems is presented in (Mihail L. Sichitiu and Maria Kihl, 2008), where several experiments and projects are presented, as well as a review of common performance evaluation techniques for IVC systems.

Two simple large-scale and small-scale propagation models can be used to estimate the radio coverage area of a transmitter and receiver. Large-scale models are characterised by their substantial signal power over large Transmission – Reception (T–R) separation distances, which can range from several hundred to several thousand meters.

Propagation models that suffer from rapid received signal strength fluctuations over very short travel distances (a few wavelengths) or short time duration (on the order of seconds) are called small-scale or fading models.

### Large-scale fading

As the distance increases between mobile nodes, the local average received signal will gradually decrease, and it is the local average signal level that is predicted by large-scale propagation models. Propagation models are used extensively in the design of routing algorithms, particularly for conducting feasibility studies and initial deployment. They are also very useful for performing interference studies as the deployment proceeds. Mobile computing applications are becoming increasingly common in indoor, outdoor, pedestrian and vehicular scenarios.

These models can be broadly categorized into three types: empirical, deterministic and stochastic as described in (Abhayawardhana *et al.*, 2005). Empirical models are those based solely on observations and measurements. These models are mainly used to predict path loss. The deterministic models use the laws governing electromagnetic wave propagation in order to determine the received signal power at a particular location. Stochastic models, on the other hand, simulate the environment as a series of random variables.

### Free space propagation model

The Free Space Propagation model (FSP) is used to predict received signal strength when the transmitter and receiver have a clear, unobstructed line-of-sight (LOS) path between them (Rappaport, 2002). The FSP model can be calculated with equation (1), which represents the transmission range between a transmitter-receiver pair.

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2} \quad (1)$$

where  $P_t$  is the transmitted power;  $P_r(d)$  is the receiver power, which is a function of the transmission-reception separation.  $G_t$  is the transmitter antenna gain,  $G_r$  is the receiver antenna gain,  $d$  is the transmission-reception separation distance in meters and  $\lambda$  is the wavelength in meters.

Received power  $P_r(d)$  is generally the most important parameter predicted by large-scale propagation models.

The fundamental aim of a radio link is to deliver sufficient signal power at the receiving end of the link. The effect by which the loss of a transmission link is measured is the loss that would be expected in free space—in other words, the loss that would occur in a region which is free of all objects that might absorb or reflect radio energy.

The free space path loss equation can be expressed logarithmically as:

$$P_{loss} = 32.4 + 20 \log_{10} d + 20 \log_{10} f \quad (2)$$

where 32.4 is the reference loss constant,  $d$  is the distance in kilometers (km) and  $f$  is the frequency in Megahertz (MHz). Equation (2) can be simplified if we exclusively utilize the 2400 MHz frequency band.

$$P_{loss} = 40 + 20 \log_{10} d \quad (3)$$

### Ad-Hoc 802.11 model

While the commonly used path loss equation model is fairly accurate for free space loss, mobile WLAN systems typically operate with antennas that are between one and two meters above the ground. Basically, this model is an extension to the free space model and can be analyzed using the following equation:

$$P_{loss} = 40 \log_{10} d + 20 \log_{10} f - 20 \log_{10} h_t h_r \quad (4)$$

where  $f$  is the frequency in gigahertz (GHz),  $h_t$  and  $h_r$  are the antenna heights for Tx and Rx respectively, and  $d$  is the overall distance. Equation (4) can be also simplified and applied in the 2.4 GHz frequency band.

$$P_{loss} = 7.6 + 20 \log_{10} d - 20 \log_{10} h_t h_r \quad (5)$$

### System operating margin

System Operating Margin (SOM) (also referred to as Fade Margin) is defined as the difference between the received signal level and the receiver sensitivity (in dBm) needed for error free reception. Also, the System Operating Margin can be calculated using the formula listed below. SOM, basically, is the difference between the signals a radio actually receives vs the signal quality required for adequate data recovery (receiver sensitivity).

$$SOM = Received\_signal(dBm) - Receiver\_sensitivity(dBm) \quad (6)$$

The System Operating Margin predicts the area of optimal reception between the transmitter and receiver. The minimum SOM recommended is 10 dB, and 20 dB is considered excellent.

### Small-scale fading

As a mobile node moves over very small distances, the instantaneous received signal strength may oscillate rapidly giving rise to small scale-fading. Small-scale fading, also known as simple fading, is used to describe rapid fluctuations of amplitude and phase or multi-path delay of a radio signal over a short period of time or travel distance, so that large-scale path loss effects may be ignored.

In vehicular ad-hoc wireless networks (VANET), each multi-path wave experiences an apparent shift in



frequency due to the relative motion between the transmitter and receiver.

### Impact of doppler shift

We have considered the worst case scenario to evaluate the impact of Doppler shift and have assumed an average vehicular speed of 42 m/s (150 km/h), with each vehicle equipped with an IEEE 802.11b wireless card. One of the goals of our research is to determine the maximum speed at which two vehicles can travel in opposing directions without being affected by Doppler shift. The relative speed in the scenario is 84 m/s. There are two types of small-scale fading based on Doppler Spread: fast fading and slow fading.

#### Fast fading

Depending on how rapidly the transmitted base band signal changes compared to the rate of channel change, a channel may be classified either as a fast fading or slow fading. Therefore, a signal undergoes fast fading if

$$T_S > T_C \text{ and } B_S < B_D$$

where  $T_S$  is the reciprocal bandwidth,  $T_C$  is the coherence time,  $B_S$  is the Bandwidth, and  $B_D$  is the Doppler Spread. The coherence time describes the time varying nature of the channel in a small-scale region and is caused by the relative motion between the vehicles.

Here, we test if our scenario is fast fading or slow fading. The signal base band in IEEE 802.11b is 11 MHz, so  $T_S = 90$  ns. The coherence time is defined in (Rappaport, 2002), as the period of time over which the time correlation function is greater than 0.5,

$$T_C = \frac{0.423}{B_D} \quad (7)$$

where  $f_m$  is the maximum Doppler shift. Using equation (7), we obtain:  $T_C = 629 \mu\text{s}$ ,  $T_S = 90 \text{ ns} < 629 \mu\text{s} = T_C$  and  $B_S = 11 \text{ MHz} > 672 \text{ Hz} = B_D$ . This is not a fast fading channel.

#### Slow fading

A slow fading channel may be assumed to be static over one or several reciprocal bandwidth intervals. In the frequency domain, this implies that the Doppler spread of the channel is much less than the bandwidth of the base band signals. Therefore, a signal undergoes slow fading if:

$$T_S \ll T_C \text{ and } B_S \gg B_D.$$

It should be clear that the velocity of the mobile node (or velocity of objects in the channel) and the base band signal determines whether a signal undergoes fast or slow fading. The channel in our scenario is slow fading because:

$$T_S = 90 \text{ ns} \ll 629 \mu\text{s} = T_C \text{ and} \\ B_S = 11 \text{ MHz} \gg 672 \text{ Hz} = B_D$$

If the base band signal bandwidth is much greater than  $B_D$ , the effect of Doppler Spread is negligible at the receiver (Rappaport, 2002).

Now, we are able to analytically determine the speed that the vehicle can travel before it is affected by Doppler Effect. The 802.11b standard defines a receiver center frequency tolerance of  $\pm 60$  kHz (IEEE Std 802.11b, 1999), we obtain:

$$v = f_m \cdot \lambda, v = 27,000 \text{ km/h}$$

An experiment realized in (D'Amico and Lauss, 2004), shows that at Mach 5, the Doppler Effect does not affect the wireless 802.11b communication.

The results obtained in the experiment and the analytical equation indicate that the Doppler Effect will not affect the communication between vehicles, using the IEEE 80.11b Wireless cards, which use Direct Sequence Spread Spectrum and speed lower than Mach 1.

### Test set-up and experimental details

The first part of our experiment focuses on determining the maximum distance of the received power between the transmitter and the receiver. To do this, we employed two Enterasys wireless cards and two omni-directional antennas. According to technical specifications, the Enterasys wireless card has a transmission power of 15 dBm or 32 mW, and the omni-directional antennas have a 5 dBi gain. We realized the experiment at the local private airport of Colima, Mexico, and repeated the test three times.

Figure 1 provides the theoretical, experimental and analytical results of the received signal power over different distances between the transmitter and receiver. The values theoretically expressed are the values shown for Enterasys Wireless cards. On the other hand, the values obtained experimentally correlated well with those used to obtain the analytical results. The maximum experimental distance between the transmitter and the

receiver with 802.11b Enterasys Wireless cards and 5 dBi car-mounted omni-directional antennas is 446 m and a data throughput of 1 Mb/s.

Figure 2 indicates experimental and analytical results of the free space loss over specific distances between the transmitter and receiver. Figure 2 shows the

free space loss using car-mounted omni-directional antennas and Enterasys wireless cards. The path loss directly increases with the distance, starting with 40 dB at one meter to 93 dB at 450 meters.

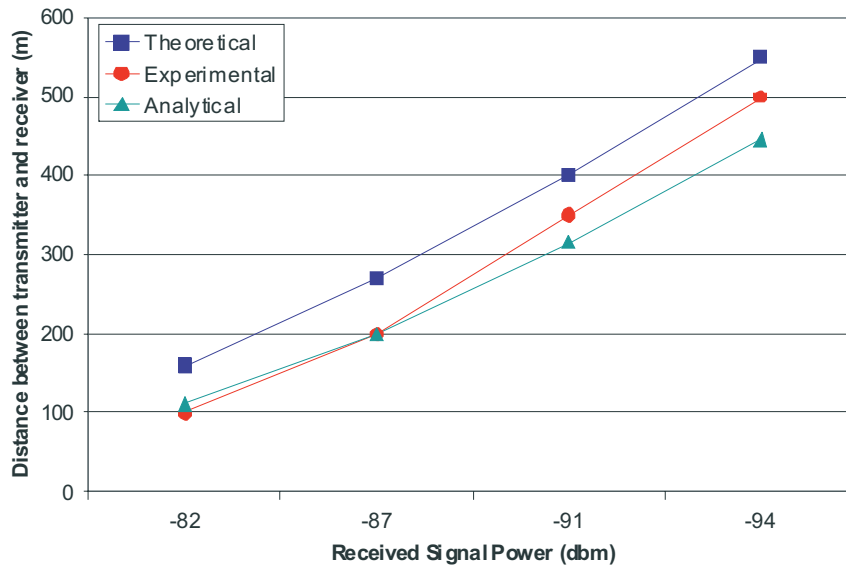


Figura 1. Received signal power over different distances between the transmitter and receiver

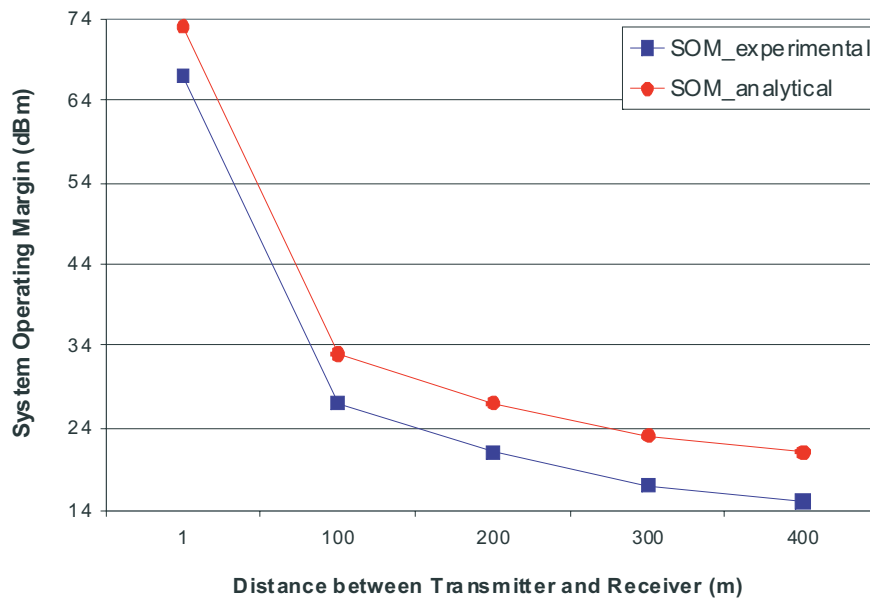


Figure 2. Free space loss between transmitter and receiver

The following experiment focused on determining the System Operating Margin between transmitter and receiver (figure 3). The analytical results are achieved using equation 6. Experimental results show good System Operating Margin values between the transmitter and the receiver at a distance of 300 m. and a SOM of 17dBm.

The following experiment consisted of sending Hello messages in the worst case scenario. Vehicle speed was maintained constant at 5 selected speeds in each test. The 5 speeds, ranging from 60 and 140 km/h, were repeated three times to validate results. Hello messages were periodically transmitted to announce the presence of mobile nodes because they are often used to disseminate location information between neighboring nodes in most common position-based routing algorithms (Basagni *et al.*, 1998; Li *et al.*, 2000 and Karp *et al.*, 2000).

The tests were conducted by driving in opposing directions on a straightaway at the 5 previously selected speeds. The two vehicles had laptops running Linux and were equipped with Enterasys IEEE 802.11b WLAN cards. The connectivity range was enhanced by deploying an omni-directional antenna inside each car.

One laptop was configured as a receiver and the other as a transmitter that streamed UDP packets. Additionally, the wireless cards were configured to operate in broadcast ad-hoc mode and the UDP packets were of 64 bytes in length.

Figure 4 shows the results for delivery ratio using OPNET for simulation of the worst case scenario and compares the results with those obtained experimentally. 8 packets were received in the worst case scenario when both vehicles were traveling in opposing directions.

Our results are slightly different from the OPNET network simulator because our omni-directional antennas were mounted inside the cars instead of on their respective roofs. The pigtail cable used in the experiment was too small to extend it more than 1m. Similar results are reported in (Michel, 1998), who investigated the effect antenna position had on the packet delivery ratio and degradation. They found that antennas mounted on rooftops provide better reception than those mounted on dashboards.

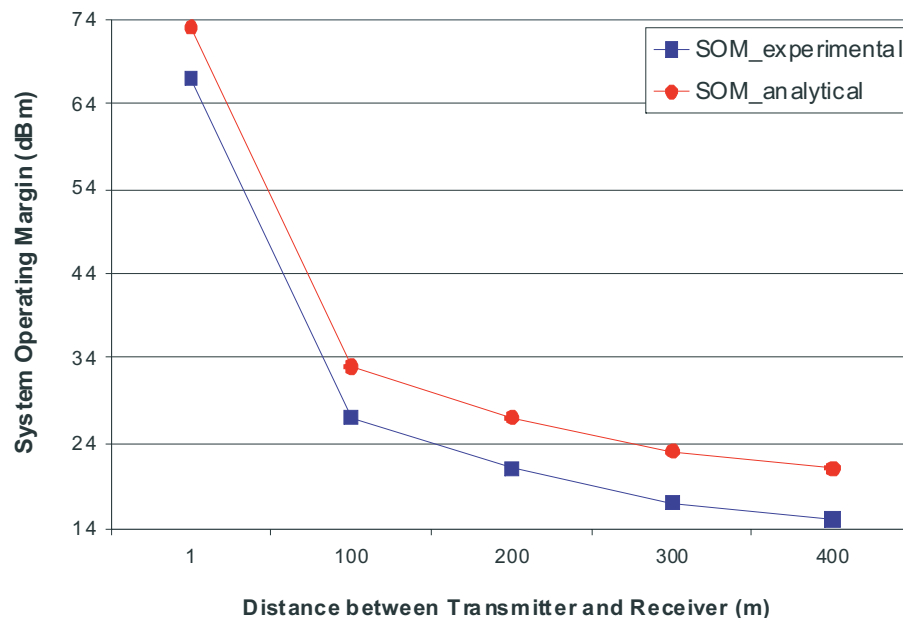


Figure 3. System Operating Margin (SOM)

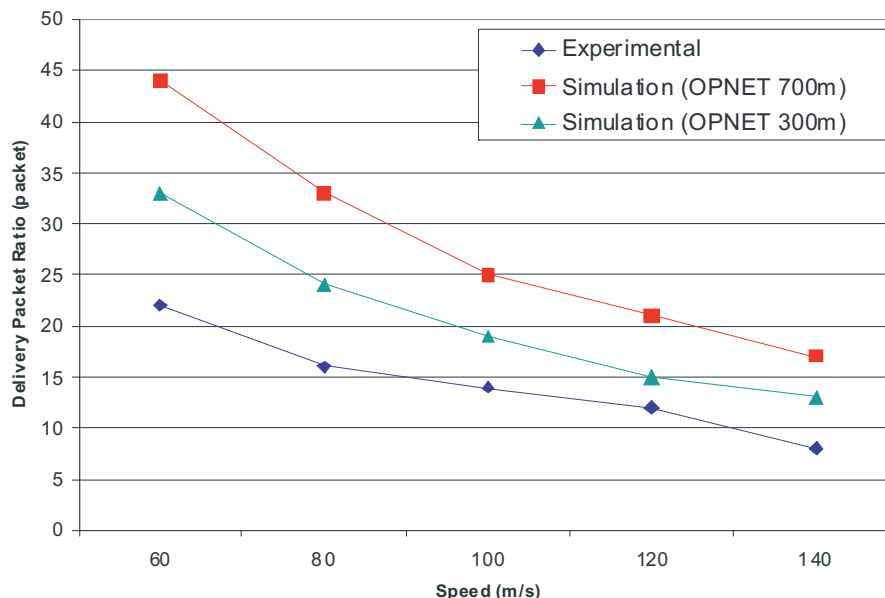


Figure 4. Delivery Ratio compared between experimental and OPNET results

## Conclusions

In this work, we have shown that IEEE 802.11b wireless networks are suitable for inter-vehicular communication and confirm our hypothesis with the results of two propagation models.

According to large scale models, the maximum distance between the transmitter and the receiver is 446 m; however the System Operating Margin (SOM) feasible at 446 m is over 13 dB, which is above the minimum margin recommended. Nevertheless, we have found that the Doppler Effect does not alter the communication between the communication pairs at high speeds in small-scale models.

Finally, we realized an experiment to validate the analytical results represented in the worst case scenario, when the transmitter and receiver are traveling in opposing directions. Although not optimal, results show that a minimum of 8 packets can be delivered when the transmitter and receiver antennas are mounted on the dashboard.

## Acknowledgements

Our tanks to the Dirección General de Asuntos del Personal Académico of UNAM for the Support and financing for the projects PAPIIT IN 104907 and PAPIIME PE103807.

## References

- Abhayawardhana V.S., Wassell I.J., Crossby D., Sellars M.P., Brown M.G. Comparison of Empirical Propagation Path Loss Models for Fixed Wireless Access Systems. *IEEE, 61<sup>st</sup>. Vehicular Technology Conference, 2005*, Vol. 1, pp. 73-77.
- Brad Karp B., Kung H.T. GPSR: Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Networks. *Proceedings of the 6<sup>th</sup> Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2000)*, pp. 1-12.
- D'Amico W.P., Lauss M.H. Wireless Local Area Networks Flight Demonstration for High Doppler Conditions. *John Hopkins Apl Technical Digest*, 25(4):335-342. 2004.
- David A. Maltz D.A., Broch J., Johnson D.B. Lessons From a Full-Scale Multihop Wireless Ad-Hoc Network Testbed. *IEEE Personal Communication*, 8(1):8-15. 2001.
- Jatinder Pal Singh J.P., Bambos N., Srinivasan B., Clawin D. Wireless LAN Performance under Varied Stress Condition in Vehicular Traffic Scenarios. *IEEE Vehicular Technology Conference, fall 2002*, Vol. 2, pp 743-747.
- Howard H. Xia H.H., Bertoni H.L., Maciel L.R., Lindsay-Stewart A., Rowe R. *Radio Propagation Characteristics for Line-of-Sight Microcellular and Personal Communications. IEEE Transactions on antennas and propagation*, 41(10): 1439-1447. 1993.
- Howard H. Xia H.H., Bertoni H.L., Maciel L.R., Lindsay-Stewart A., Rowe R. *Microcellular Propagation Characteristics for Personal Communication in Urban and Suburban*

- Environments. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 43(3): 743-752. 1994.
- Jinyang Li J., Jannotti J., De Couto D.S.J., Karger D.R., Morris R. *A Scalable Location Service for Geographic Ad Hoc Routing*. ACM Mobicom 2000. Boston, MA. 2000.
- Michel L.B. DS/SS Inter-Vehicular Communication Experiments in 2.4 GHz ISM Band. IEEE International Conference on Intelligent Vehiculars. 1998.
- L.B. Mosque M., Fussler H., Hartenstein H., Franz W. Performance Measurements of a Vehicular Ad Hoc Networks. 59<sup>th</sup> IEEE Vehicular Technology Conference, 2004, Vol. 4, pp. 2116-2120.
- Mosque M., Fussler H., Hartenstein H., Franz W. Performance Measurements of a Vehicular Ad Hoc Networks. 59<sup>th</sup> IEEE Vehicular Technology Conference, 2004, Vol. 4, pp. 2116-2120.
- Part II: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. Part 11. IEEE Std. 802.11b-1999.
- Singh J.P., Bambos N., Srinivasan B., Clawin D., Yonchun Y. IEEE Wireless Communication Networking Conference, 2005, Vol. 3, pp. 1676-1682.
- Stefano Basagni, Imrich-Chalamtac S.B., Syrotiuk V.R. *A Distance Routing Effect Algorithm for Mobility (DREAM)*. MOBICOM 98. 1998. Pp. 76-64.
- Theodore S. Rappaport T.S. *Wireless Communications: Principles and Practice*. Prentice Hall. Communications Engineering and Emerging Technologies Series. 2002.
- Wang S.Y., Lin C.C., Hwang Y.W., Tao K.C., Chou C.L. A Practical Routing Protocol for Vehicle-Formed Mobile Ad Hoc Networks on the Road. IEEE Intelligent Transportation Systems. 2005. Pp. 161-166.

---

#### About the authors

*Raúl Aquino-Santos*. Graduated from the University of Colima with a BE in Electrical Engineering, received his MS degree in Telecommunications from the Centre for Scientific Research and Higher Education in Ensenada, Mexico in 1990. He holds a PhD from the Department of Electrical and Electronic Engineering of the University of Sheffield, England. Since 2005, he has been with the College of Telematics, at the University of Colima, where he is currently a research professor in telecommunications networks. His current research interests include wireless and sensor networks.

*Victor Rangel-Licea*. Received the B. Eng (Hons.) degree in Computer Engineering in the School of Engineering from the "Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)", Mexico in 1996 and the M.Sc. in Telematics from the University of Sheffield, U.K. in 1998. He holds a Ph.D. from the Centre for Mobile Communication Research, EEE Department, at the University of Sheffield, U.K. Since 2002, he has been with the School of Engineering, UNAM, where he is currently a Research-Professor in telecommunications networks. His research focuses on fixed, mesh and mobile broadband wireless access networks, QoS over IP, traffic shaping, scheduling, handoff procedures and performance optimization for IEEE 802.16 (WiMAX) based networks.

*Luis A. Villaseñor-González*. Received an engineering degree in electronics from UABC, Mexico (1993); M.Sc. in electronics and telecommunications from CICESE, Mexico (1997); and PhD in electrical engineering from the University of Ottawa in 2002. He is currently a research professor at the CICESE research center. He collaborated as a network research engineer at the Communications Research Centre in Ottawa, Canada. At CRC he was involved in a variety of research activities in network technologies for the Government of Canada between 1999 and 2003. His current research interests include Mobile Ad-hoc Networks, wireless communications networks, QoS protocol architectures, performance analysis and evaluation of Internet technologies and computer networks. He is currently a member of the IEEE.

*Arthur Edwards*. Received his masters degree in Education from the University of Houston in 1985. He has been a research professor at the University of Colima since 1985, where he has served in various capacities. He has been with the School of Telematics since 1998. His primary areas of research are Computer Assisted Language Learning (CALL), distance learning, collaborative learning, multimodal leaning and mobile learning. The primary focus of his research is presently in the area of mobile collaborative learning.

# Despacho unificado de energía y reservas en mercados de electricidad

## *Unified Dispatch of Energy and Reserves in Electricity Markets*

J.A. Quiñónez-Osobampo

*Programa de Graduados e Investigación en Ingeniería Eléctrica.  
Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica.  
Instituto Tecnológico de Morelia, Morelia Michoacán, México.  
E-mail: jago\_18@hotmail.com*

J.H. Tovar-Hernández

*Programa de Graduados e Investigación en Ingeniería Eléctrica.  
Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica.  
Instituto Tecnológico de Morelia, Morelia Michoacán, México.  
E-mail: horaciotovar@mexico.com*

G. Gutiérrez-Alcaraz

*Programa de Graduados e Investigación en Ingeniería Eléctrica.  
Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica.  
Instituto Tecnológico de Morelia, Morelia Michoacán, México.  
E-mail: ggutiera@gmail.com*

(Recibido: septiembre de 2007; aceptado: junio de 2008)

### **Resumen**

En los primeros modelos de mercados competitivos, el costo asociado a los servicios auxiliares era incluido en el precio de la energía. En un modelo con mayor grado de descentralización en la toma de decisiones por parte de los productores y consumidores, es posible que cada servicio sea tratado como un servicio separado y contratado a través de un mercado independiente. Sin embargo, se ha visto que el planteamiento de modelos de mercados simultáneos con el de energía, resulta una mejor opción para elevar la eficiencia de los recursos económicos dedicados al mercado de energía y al de servicios auxiliares. En este trabajo, se presenta una formulación unificada para realizar el despacho de energía y reservas de potencia activa en mercados de electricidad, con el objetivo de analizar la eficiencia global de ambos mercados. La formulación permite ofertar el servicio de reserva, tanto por compañías de generación como por compañías de distribución en forma simultánea con el de energía. A través de un caso de estudio se analiza con detalle el comportamiento de ambas formulaciones de mercados, llegando a la conclusión de que el mercado unificado de energía y reservas, permiten aumentar la eficiencia global, debido a que los beneficios para generadores y distribuidores son mayores.

**Descriptores:** Asignación de unidades, despacho económico, mercados de electricidad, flujos óptimos, reservas de potencia activa, servicios auxiliares.

### **Abstract**

*Ancillary services costs were included within the energy price in the first electricity market models. In a decentralized electricity market, it is conceivable to have a separate market for energy and each one of the Ancillary Services. However, when the problem is solved jointly it seems to be a better alternative to optimize resources. This paper presents a unified formulation for solving the economic dispatch and reserve scheduling problems in electricity*

*markets, in order to investigate the global efficiency of energy and reserve markets. The formulation allows generation and distribution companies to offer in the market reserve services. Concluding remarks are offered about the results obtained, which proves in a detailed way that these operated-simultaneously-markets provides more economical benefits for generation or distribution companies.*

**Keywords:** *Electricity market, economic dispatch, reserve dispatch.*

## Introducción

La nueva organización del sector eléctrico tiende hacia una estructura de mercado para la realización de transacciones de compraventa de energía, así como a la creación de mercados adicionales para la satisfacción de necesidades de confiabilidad, seguridad y calidad del suministro.

La asignación del precio para servicios auxiliares es difícil de determinar, debido a que la procuración de un servicio auxiliar generalmente está ligada con la procuración de energía eléctrica u otros servicios auxiliares. En los primeros modelos de mercados competitivos, este problema no fue analizado y entendido completamente, de tal forma que los costos asociados a servicios auxiliares eran despreciados o incluidos en el precio de la energía. En un modelo basado en principios económicos, es posible que cada servicio sea tratado en un mercado particular (Singh, 1999).

Independientemente del modelo de mercado que se adopte en un sector eléctrico o país, el operador del sistema (OS) es responsable de mantener en un nivel adecuado de seguridad al sistema eléctrico en todo instante de tiempo. Para ello, debe realizarse una asignación adecuada de servicios auxiliares, entre los cuales se encuentran las reservas de generación de potencia activa (Hirst *et al.*, 1997). Ante contingencias, el operador del sistema deberá mantener el mismo nivel de seguridad de acuerdo a su nuevo punto de operación, mediante la consideración de una serie de acciones, ya sean preventivas o correctivas (Wood *et al.*, 1996). La práctica tradicional en sistemas verticalmente integrados ha sido la asignación de unidades o el redespacho de unidades ya sincronizadas, así como cortes de carga como última opción para mantener la seguridad del sistema (Rashidinejad *et al.*, 2000). Ello debido a la facilidad que tiene el operador para ejecutar las acciones necesarias, ya que mantiene un control sobre todas las variables del sistema (Hirst *et al.*, 1997). Sin embargo, en un modelo descentralizado o de mercado, estas acciones pueden estar restringidas, dependiendo del nivel de descentralización en equipos asociados a las variables de control del sistema. Es decir,

si las cantidades ofrecidas por parte de productores, una vez aceptadas, pueden o no ser modificadas de acuerdo a las necesidades del sistema con un pago adicional basado en costos de oportunidad, pero con el beneficio para el operador del sistema de realizar prácticamente las mismas acciones de control que en un modelo centralizado (Ott, 2003).

En términos generales, la tendencia hacia el exceso de capacidad parece resultar de una asimetría entre las penalizaciones sociales de una interrupción (muy severas) y las correspondientes a excesos de capacidad (moderadas). No es una coincidencia que las compañías –o los operadores del sistema en mercados de electricidad– seleccionen irse por el lado del exceso de capacidad. El marco de referencia de optimización económica, a partir del cual se debería estimar los niveles de reserva eficientes, todavía tiene muchos problemas.

Las investigaciones para estimar costos de interrupciones tienen resultados que pueden ser dudosos, en particular, debido a que fallan en los ajustes que los consumidores pueden hacer en anticipación a las interrupciones. Además, las dimensiones sociales de las interrupciones son muy difíciles de cuantificar, aun cuando sean importantes para la sociedad (Kirschen *et al.*, 2004).

Hablando específicamente de las reservas operativas de potencia activa, con el objeto de soportar contingencias, cuyas consecuencias resultan en el desbalance de potencia activa en el sistema, se ha propuesto la integración de un mercado de reservas, el cual normalmente ha operado en forma secuenciada con el de energía (Cramton *et al.*, 2005). Sin embargo, esto puede causar conflictos de intereses entre los agentes del mercado, motivación para el ejercicio de prácticas de poder de mercado y, como resultado final, un deterioro en la eficiencia económica del sector eléctrico, de manera que una opción para evitar tales problemas, es el planteamiento y solución unificados de los mercados de energía y reservas, a fin de obtener la eficiencia global para ambos (Kirschen *et al.*, 2004).

Sin embargo, un análisis de la formulación unificada no ha sido realizado con profundidad, considerando la

eficiencia global que puede ser lograda aplicando este modelo de mercados de energía y reservas simultáneos.

En este sentido, el objetivo de este trabajo es analizar el comportamiento de las reservas ofertadas por generadores y consumidores, bajo las consideraciones antes descritas. El modelo que se plantea en este trabajo es una formulación conjunta de los modelos, desarrollado en (Arroyo *et al.*, 2005), donde se plantea un mercado unificado de energía y reservas, así como del modelo propuesto por (Cramton *et al.*, 2005). El modelo considera ofertas de reservas por parte de generadores e introduce el manejo de la demanda, con el objeto de permitir a grandes consumidores contribuir a la satisfacción de reservas. Estos dos tipos de ofertas de reservas son introducidas en la función objetivo del modelo de optimización.

Para este propósito, el resto del documento está organizado como se describe a continuación. En la siguiente sección es presentada una descripción del mercado primario de energía y su relación con los servicios auxiliares. Después se realiza una descripción de precios en mercados de electricidad y se presenta la formulación matemática del problema. En la siguiente sección se realiza un análisis de la formulación de la sección anterior, mediante un ejemplo numérico analizado con detalle. Finalmente, se presentan las conclusiones asociadas a los resultados obtenidos.

## Energía y servicios auxiliares

La atención principal de un mercado radica en los mecanismos para la satisfacción del balance entre proveedores, consumidores y la definición del precio del mercado (Silberberg *et al.*, 2000). La coordinación de unidades de generación de electricidad en un modelo centralizado de asignación de generación es realizada en función de la potencia activa y la incorporación de reservas rodantes –generadores conectados al sistema con capacidad disponible.

Sin embargo, esto no es suficiente para que el sistema funcione adecuadamente. Reservas no rodantes, regulación o control de frecuencia, así como control de voltaje, entre otros servicios, denominados servicios auxiliares (SA), son requeridos (Kirschen *et al.*, 2004, Federal Energy Regulatory Commission, 2005). En los primeros modelos, costos asociados a SA eran ignorados o incluidos en el precio del mercado como se muestra en la figura 1, aunque pueden ser desagregados una vez que el precio de mercado es establecido (Song *et al.*, 2003).

En un modelo descentralizado basado en principios económicos, es posible que cada servicio sea tratado en un mercado independiente (Singh, 1999, Wilson 2001) como se muestra en la figura 2. Los servicios auxiliares, generalmente, son o pueden ser coordinados mediante contratos.

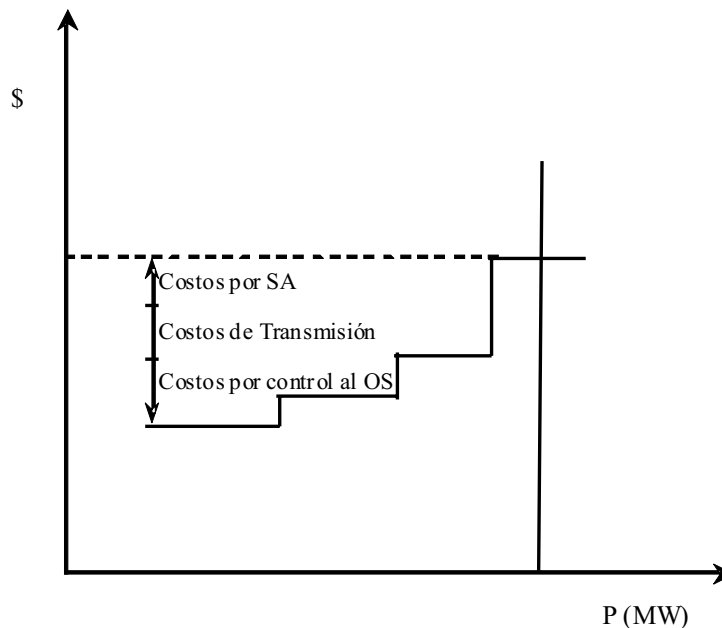


Figura 1. Precio del mercado



Cuando existen mercados separados para energía y reserva, ambos mercados están ligados, por lo cual, cualquier problema en uno de ellos puede causar problemas en el otro. Lo anterior, debido a que los servicios, reserva y energía, pueden ser provistos por las mismas unidades generadoras.

Los programas de control de demanda son una opción adicional no sólo para el OS, sino también para grandes consumidores, ya que ellos, de acuerdo a sus preferencias y necesidades, decidirán cuándo y cuánto consumir. La incorporación de programas de demanda tiene como objetivos relajar las restricciones operativas del sistema.

Para la aplicación de programas de la demanda, debe haber un acuerdo contractual con cada usuario dispuesto a formar parte de ellos y contarse con la información técnica requerida.

### Precio spot en el mercado de electricidad

El precio del mercado en un modelo centralizado puede obtenerse mediante un modelo matemático de asignación de unidades, cuya función objetivo es minimizar

costos de operación. Adicionalmente, en algunos mercados, las unidades suministran los SA sin que ello modifique el precio del mercado de energía, ya que el precio total de la energía es el precio agregado de los diferentes servicios requeridos para la entrega al consumidor. El precio del mercado es generalmente un precio uniforme (figura 1).

Bajo la consideración de que es necesario un redespacho de unidades, debido a requerimientos de regulación de frecuencia y de voltaje, esto implica que generadores en reserva aporten potencia activa al sistema, a fin mantener los límites de seguridad dentro de márgenes. Por consecuencia, el precio del mercado se verá afectado. Gráficamente se muestra en la figura 3.

A medida que se desee un nivel mayor de reserva se tendrá un precio mayor por dicho servicio. La asignación de reserva se realiza ya sea para el criterio de contingencia más severa o para un cierto porcentaje de demanda, lo cual implica un costo mayor, dado que las contingencias que pueden poner en peligro la integridad del sistema pueden tener una probabilidad de ocurrencia mínima. Sin embargo, este análisis de riesgo está fuera del objetivo del presente trabajo.

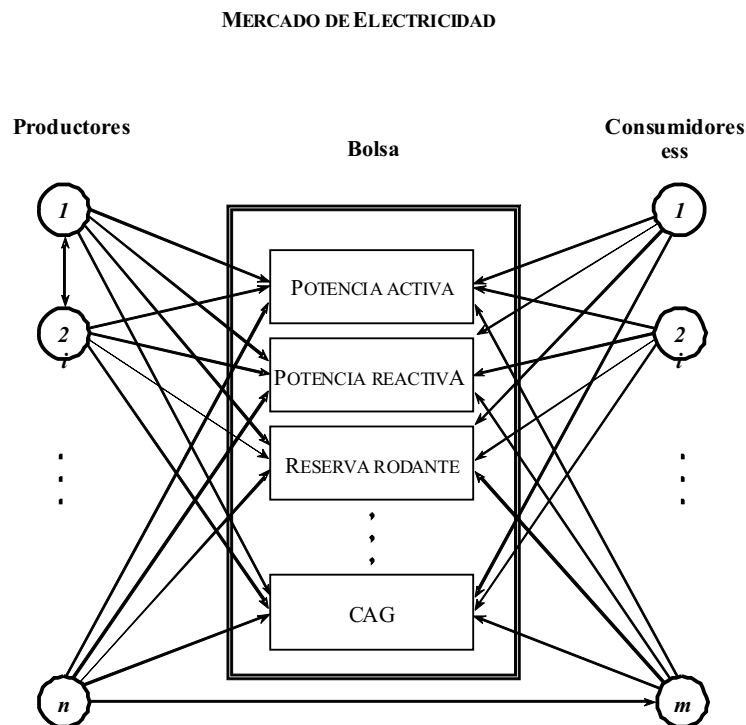


Figura 2. Mercado spot para energía y servicios auxiliares

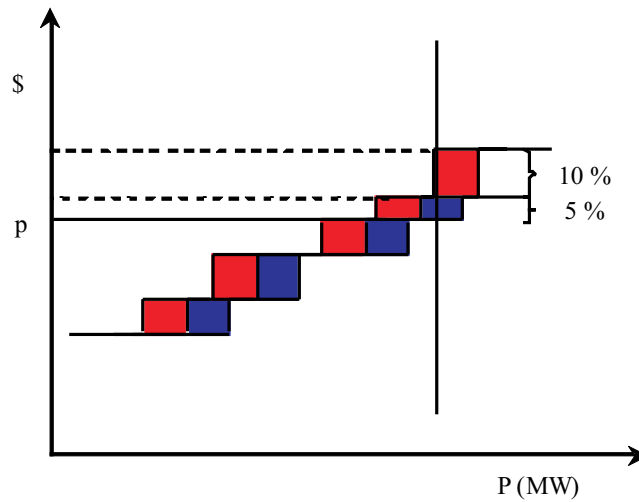


Figura 3. Precio del mercado para energía y reserva

La gráfica de la figura 3 muestra el incremento en el precio del mercado al incluir el servicio de reserva rodante bajo la consideración de que cada unidad participa en la producción del servicio de reserva rodante. En la práctica, no todas las unidades de generación participan en el suministro del servicio de reserva rodante.

Un generador, denominado *generador marginal*, determina el precio del mercado. En un mercado competitivo eficiente, los generadores no tienen ningún incentivo a ofertar a un precio mayor a su costo marginal de producción. Entonces, el *precio marginal* del mercado es igual al costo de producir el último MWh para suministrar la demanda. El generador marginal no pierde dinero en la producción que éste vende, pero tampoco gana. Por otro lado, los *generadores inframarginales* sí reciben un beneficio económico, puesto que sus ofertas quedaron por debajo del precio marginal y su generación es incluida para satisfacer la demanda. Sin embargo, este beneficio no pasa directamente a los inversionistas o dueños de las acciones de las compañías de generación, a fin de que éstos recuperen sus inversiones, sino que parte de los beneficios obtenidos son empleados para cubrir los costos fijos de las plantas, los cuales incluyen costos de mantenimiento, costos de personal, impuestos y costos de oportunidad sobre el valor de salvamento de la planta (Geoffrey *et al.*, 2003).

**Formulación del problema de mercados unificados de energía y reservas**

Desde un punto de vista de mercado, y considerando como base que las reservas deben ofrecerse simultáneamente a la

energía, entonces, es necesario que se tenga una subasta, tanto para energía como para reservas. El proceso de subastas se resuelve a través de un modelo matemático de optimización como el que es descrito a continuación:

Minimizar

$$\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n \{C_i P_{g_{i,t}} + D_i S_{i,t} + Cd_j R_{d_{j,t}}\} \tag{1}$$

Sujeto a

$$\sum_{i=1}^n (P_{g_{i,t}} - D_i) = \beta_t \delta_t \quad \forall t = 1, \dots, T \tag{2}$$

$$\sum_{i=1}^{ng} S_{i,t} \leq S_{R,t} \quad \forall t = 1, \dots, T \tag{3}$$

$$\sum_{j=1}^{nc} R_{d_{j,t}} \leq R_{d_{j,t}}^{\max} \quad \forall t = 1, \dots, T \tag{4}$$

$$P_{g_{i,t}}^{\min} \leq P_{g_{i,t}} \leq P_{g_{i,t}}^{\max} - R_{g_{i,t}} \quad \forall t = 1, \dots, T \tag{5}$$

$$-P_{f_{\max}} \leq P_f \leq P_{f_{\max}} \tag{6}$$

donde  $C_i$  son los precios de oferta para el servicio de energía por el generador  $i$  en el periodo  $t$ ;  $D_j$  son los precios de reserva ofertados por el generador  $i$  en el periodo  $t$ ;  $Cd_j$  es el precio de la reserva ofertada por la carga  $j$  en el periodo  $t$ ;  $P_{g_{i,t}}$  es la potencia de salida del generador  $i$  en el periodo  $t$ ;  $D_i$  es la demanda en el periodo  $t$ ;  $B$  es la matriz de susceptancias;  $\delta$  es el vector de ángulos nodales de fase;  $S_{i,t}$  es la reserva rodante del generador  $i$  en el periodo  $t$ ;  $P_{g_{i,t}}^{\max}$  y  $P_{g_{i,t}}^{\min}$  son las potencias máxima y mínima de salida del generador  $i$  en el periodo  $t$ ;  $R_{g_{i,t}}$  es el

porcentaje de reserva del generador  $i$  en el periodo  $t$ ;  $n$  es el número total de nodos del sistema;  $ng$  es el número de generadores;  $nc$  es el número de cargas del sistema;  $P_f$  es el flujo en la línea de transmisión,  $P_{f,max}$  es la capacidad máxima de la línea;  $Rd_{j,t}$  reserva de la carga  $j$  en el periodo  $t$  y  $S_{R,t}$  es la reserva total del sistema en el periodo  $t$ .

La función objetivo incluye al mercado de energía y al mercado de reservas, obteniéndose una solución simultánea, lo cual normalmente es más eficiente debido a la interacción entre ambos mercados. La restricción (2) representan las ecuaciones de balance de potencia nodal. La restricción (3) definen los requerimientos de reserva por parte de los generadores. La restricción (4) muestran los límites de reserva por parte de los consumidores. Las restricciones (5) indican los límites de potencia de los generadores. La restricción (6) muestran los límites de transmisión de potencia activa en líneas de transmisión (Conejo, 2005).

La aplicación de este modelo resultará en la definición de precios nodales de energía y reserva de potencia activa. De acuerdo a su solución, se determinará la cantidad a pagar por parte de los consumidores para cubrir los ingresos de los generadores.

A continuación, se presenta un ejemplo ilustrativo, con el objeto de comparar los resultados obtenidos con un modelo secuencial y un modelo unificado de despacho de energía y reservas. Las simulaciones de optimización fueron desarrolladas en el paquete computacional GAMS (GAMS, 2004).

### Caso de estudio

En esta sección se presenta un ejemplo de aplicación. El objetivo es analizar los resultados de un modelo de

mercados de energía y reservas separados y simultáneos, con el objeto de observar si hay una mejora en la eficiencia global.

El ejemplo utiliza el sistema de 4 nodos de la figura 4. La reactancia de todas las líneas es de 0.63 p.u., sobre una base de 100 MVA. Las líneas de transmisión NODO 1 – NODO 2, NODO 1 – NODO 3 y NODO 3 – NODO 4 tienen una capacidad de 100 MVA, mientras que la capacidad de transferencia de la línea NODO 2 – NODO 4 está limitada a 30 MVA. La asignación de unidades es ejecutada para seis periodos de oferta.

Para propósitos de discusión, y con relación a la figura 4, en el resto de esta sección se utilizará la abreviación G1 cuando se hace referencia al Generador 1, G2 al Generador 2, y así sucesivamente.

En las tablas 1 y 2 se muestra la cantidad y el precio de oferta de potencia y energía de cada uno de los generadores, para cada periodo.

En las tablas 3 y 4 se muestra la cantidad y el precio de oferta de reserva de cada uno de los generadores, para cada periodo.

De la tabla 3 se observa que, en este caso, solamente ofertan reserva las unidades G2, G3 y G4, mientras que la unidad G1 oferta sólo energía. Note además, que G2 oferta su capacidad de reserva en un precio de cero.

La tabla 5 presenta la carga que hay en cada uno de los nodos para cada uno de los periodos.

En la tabla 6 se muestra la reserva requerida en el sistema para cada uno de los periodos, la cual es indicada por el operador del sistema; sin embargo, esta cantidad puede tomarse en diferentes formas, tanto fija como en este caso o como un porcentaje de la carga del sistema, esto es a criterio del operador.

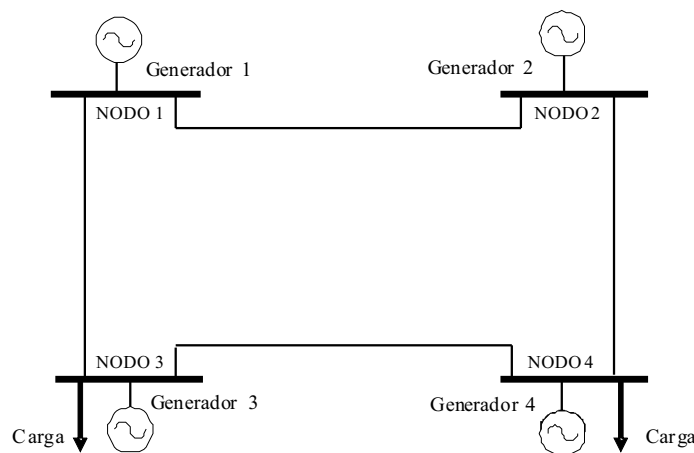


Figura 4. Sistema de prueba de cuatro nodos

Tabla 1. Potencia ofertada por los generadores (MW)

	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 4	Periodo 5	Periodo 6
G1	250	250	250	250	250	250
G2	230	230	230	230	230	230
G3	240	240	240	240	240	240
G4	250	250	250	250	250	250

Tabla 2. Precio de energía ofertado por los generadores (\$/MWH)

	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 4	Periodo 5	Periodo 6
G1	2	2	2	2	2	2
G2	17	17	17	17	17	17
G3	20	20	20	20	20	20
G4	28	28	28	28	28	28

Tabla 3. Reserva ofertada por los generadores (MW)

	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 4	Periodo 5	Periodo 6
G1	0	0	0	0	0	0
G2	160	160	160	160	160	160
G3	190	190	190	190	190	190
G4	150	150	150	150	150	150

Tabla 4. Precio de reserva ofertado por los generadores (\$/MW)

	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 4	Periodo 5	Periodo 6
G1	0	0	0	0	0	0
G2	0	0	0	0	0	0
G3	5	5	5	5	5	5
G4	7	7	7	7	7	7

Tabla 5. Carga en cada uno de los nodos (MW)

	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 4	Periodo 5	Periodo 6
Nodo1	75	80	117	140	155	180
Nodo 2	75	80	118	140	155	180
Nodo 3	75	80	118	140	155	180
Nodo 4	75	80	118	141	156	179

Tabla 6. Reserva requerida por el sistema

	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 4	Periodo 5	Periodo 6
Reserva	250	250	250	250	250	250

### Resultados con mercados unificados

La tabla 7 muestra la potencia de salida de cada una de las unidades por periodo; se observa que la unidad 1, por ser la más económica, siempre está en su límite máximo; las unidades 2 y 3 no llegan a tal límite debido a los requerimientos de reserva. Se debe señalar que la unidad 1, aun cuando ofertara reserva, siempre estará en el mercado de energía únicamente, debido a que su precio de oferta de energía es el más bajo.

La tabla 8 presenta los precios marginales nodales para cada periodo; se observa que son los mismos en todos los nodos para cada periodo, debido a que no se tiene congestión ni violación de límites de ningún

tipo y el precio lo establece la unidad marginal, además que no se consideran las pérdidas en los elementos de transmisión. Sin embargo, en algunos periodos el precio se establece no sólo por la unidad marginal, sino por los requerimientos de reserva que no permiten que las unidades estén generando a su límite máximo.

La tabla 9 muestra la distribución de reserva entre las unidades que ofertan este servicio. Aquí, se observa que no siempre son las mismas unidades las que satisfacen toda la reserva, y también que cada unidad puede variar su reserva, esto debido a que para cada periodo la unidad marginal puede ser diferente, y esto implica una redistribución de las reservas y, por lo tanto, la potencia de salida de cada una de las unidades despachadas.

Tabla 7. Potencia de salida de los generadores (MW)

	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 4	Periodo 5	Periodo 6
G1	250	250	250	250	250	250
G2	50	70	70	71	130	130
G3	10	1	151	240	240	240
G4	0	0	0	0	1	99

Tabla 8. Precio marginal nodal de la energía

	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 4	Periodo 5	Periodo 6
Nodo 1	17	20	22	24	28	28
Nodo 2	17	20	22	24	28	28
Nodo 3	17	20	22	24	28	28
Nodo 4	17	20	22	24	28	28

Tabla 9. Reserva de cada uno de los generadores

	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 4	Periodo 5	Periodo 6
G1	0	0	0	0	0	0
G2	160	160	160	159	100	100
G3	90	90	89	0	0	0
G4	0	0	1	91	150	150

La tabla 10 indica el precio marginal nodal de la reserva, donde se nota que, en los primeros dos periodos, el precio lo establece la unidad 3, debido a que es la unidad marginal; sin embargo, para los periodos 3 y 4, el precio se incrementa debido a que la unidad marginal en dichos periodos es G4; para los periodos 5 y 6, se observa que el precio se incrementa considerablemente, esto debido a que, por los requerimientos de reserva, es necesario generar con la unidad G4 que es más costosa.

Las tablas 11 y 12 indican las ganancias de los generadores por la venta de la energía y el cobro a las cargas por el consumo, respectivamente; se puede observar que hay un equilibrio entre lo que los generadores cobran y lo que las cargas pagan.

En la tabla 13 son presentadas las ganancias de los generadores por el servicio de reservas; sin embargo, debido a que este servicio no es por entrega sino por disponibilidad, se debe establecer un criterio para asignar estos cargos, es decir, se debe plantear claramente quién y cómo deberá pagar por el servicio.

En los primeros cuatro periodos, el precio se establece por la unidad marginal; sin embargo, en los últimos dos periodos el criterio es el siguiente: al tener que encender una unidad cuyo costo es de 28\$/MW y dejar de generar con una de costo 17\$/MW, debido a que aun cuando no se encuentra a su límite máximo, por las disposiciones de reserva, ya no puede incrementar su potencia de salida, de aquí que la diferencia de los precios da el costo de la reserva, el cual será de 11\$/MW.

Tabla 10. Precio marginal nodal de reserva

	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 4	Periodo 5	Periodo 6
Nodo 1	5	5	7	7	11	11
Nodo 2	5	5	7	7	11	11
Nodo 3	5	5	7	7	11	11
Nodo 4	5	5	7	7	11	11

Tabla 11. Ganancias de los generadores por venta de energía

	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 4	Periodo 5	Periodo 6
G1	4,250	5,000	5,500	6,000	7,000	7,000
G2	850	1,400	1,540	1,704	3,640	3,640
G3	0	20	3,322	5,760	6,720	6,720
G4	0	0	0	0	28	2,772
Total	5,100	6,420	10,362	13,464	17,388	20,132

Tabla 12. Pago de cargas por energía (\$)

	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 4	Periodo 5	Periodo 6
Nodo 1	1,275	1,600	2,574	3,360	4,340	5,040
Nodo 2	1,275	1,600	2,596	3,360	4,340	5,040
Nodo 3	1,275	1,600	2,596	3,360	4,340	5,040
Nodo 4	1,275	1,620	2,596	3,384	4,368	5,012
Total	5,100	6,420	10,362	13,464	17,388	20,132

La tabla 14 muestra los ingresos totales que obtiene cada unidad. Para el caso de la unidad 4, debido a que sólo entra en los últimos periodos y es la unidad marginal, no obtiene ingresos por la venta de energía; sin embargo, obtiene utilidades por la venta de reserva. En la tabla 15 son mostrados los costos totales, tanto por reserva como por energía para cada periodo.

Algunos autores mencionan que la forma más eficiente para resolver ambos mercados, tanto de energía como de reservas, es hacerlo de manera conjunta, pero no se encontró ningún documento donde se compruebe que realmente esto sea verdadero.

A continuación, se resolverán ambos mercados de manera separada para poder comparar los resultados con los obtenidos en el caso anterior, esto debido a que se deberá elegir desde un principio cómo se deberán manejar los mercados para poder obtener la mayor eficiencia.

### Mercados de reserva y energía separados

Para este caso se resolvieron por separado los mercados de energía y reservas, solucionándose primeramente el de reservas. La tabla 16 muestra la potencia de salida de cada una de las unidades en cada periodo; se observa que la unidad 1, por ser la más económica en el mercado de energía y por el hecho de que no oferta reserva, siempre está en su límite máximo, además, la potencia de salida de la unidad 2 está muy lejos de su límite máximo, debido a que está entregando el máximo de reserva ofertado. Esto también implica que las potencias de salida de las unidades 3 y 4 se incrementen con respecto al caso anterior.

La tabla 17 muestra los precios marginales nodales para cada periodo, se puede observar que, para los periodos 3 y 4, el precio es mayor que en el caso anterior, debido a las restricciones de reservas.

Tabla 13. Ganancias de generadores por concepto de reservas (\$)

	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 4	Periodo 5	Periodo 6
G 1	0	10	0	0	0	0
G 2	800	800	1,120	1,113	1,100	1,100
G 3	450	450	623	0	0	0
G 4	0	0	7	637	1,650	1,650
Total	1,250	1,250	1,750	1,750	2,750	2,750

Tabla 14. Ingresos totales de los generadores por venta de energía y reserva (\$)

	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 4	Periodo 5	Periodo 6	Total
G1	4,250	5,000	5,500	6,000	7,000	7,000	34,750
G2	1,650	2,200	2,660	2,817	4,740	4,740	18,807
G3	450	470	3,945	5,760	6,720	6,720	24,065
G4	0	0	7	637	1,678	4,422	6,744

Tabla 15. Valor de la función objetivo (\$)

Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 4	Periodo 5	Periodo 6	Total
6,350	7,670	12,112	15,214	20,138	22,882	84,366

La tabla 18 presenta la forma en que se distribuye la reserva entre las unidades que ofertan este servicio. La reserva de las unidades se seleccionó por orden de mérito, siendo la única consideración el precio ofertado, por lo que la unidad 2, por ser la que oferta de manera más económica, siempre está a su límite máximo de reserva, aunque, por esta razón, se ve afectado el mercado de energía.

La tabla 19 indica el precio marginal nodal de la reserva. Para este caso, la unidad marginal siempre es G3, por lo que el precio es el mismo en todos los periodos; se puede observar que los precios son menores que los obtenidos en el caso anterior, aunque, como ya se explicó anteriormente, esto implicó que los precios de energía se incrementaran.

Las tablas 20 y 21 indican las ganancias de los generadores por la venta de la energía, así como el pago de

los consumidores por la compra de la misma, respectivamente, notándose que hay un equilibrio entre pagos e ingresos.

La tabla 22 muestra las ganancias de generadores por el servicio de reservas, para este caso específico; los precios son menores cuando se manejan mercados separados, lo que implica que los cobros a las cargas por la venta de este servicio son menores (cuando se tiene las mismas condiciones que en el caso de mercados simultáneos).

Los ingresos totales que obtiene cada unidad son mostrados en la tabla 23. Aun cuando se tienen menores ganancias por la venta de reservas, se obtienen mayores ganancias por la venta de energía y los ingresos de cada unidad son mayores para este caso.

La tabla 24 presenta el valor de la función objetivo, tanto por reserva como por energía para cada periodo.

*Tabla 16. Potencias de salida (MW) de los generadores (mercados separados)*

	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 4	Periodo 5	Periodo 6
G1	250	250	250	250	250	250
G2	50	70	70	70	70	70
G3	0	1	150	150	150	150
G4	0	0	1	91	151	249

*Tabla 17. Precio marginal nodal de energía (\$) (mercados separados)*

	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 4	Periodo 5	Periodo 6
G1	17	20	28	28	28	28
G2	17	20	28	28	28	28
G3	17	20	28	28	28	28
G4	17	20	28	28	28	28

*Tabla 18. Reserva (MW) de cada uno de los generadores (mercados separados)*

	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 4	Periodo 5	Periodo 6
G1	0	0	0	0	0	0
G2	160	160	160	160	160	160
G3	90	90	90	90	90	90
G4	0	0	0	0	0	0



Tabla 19. Precio marginal nodal (\$/MWH) de reserva (mercados separados)

	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 4	Periodo 5	Periodo 6
G1	5	5	5	5	5	5
G2	5	5	5	5	5	5
G3	5	5	5	5	5	5
G4	5	5	5	5	5	5

Tabla 20. Ganancias de los generadores (\$) por venta de energía (mercados separados)

	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 4	Periodo 5	Periodo 6
G 1	4,250	5,000	7,000	7,000	7,000	7,000
G 2	850	1,400	1,960	1,960	1,960	1,960
G 3	0	20	4,200	4,200	4,200	4,200
G 4	0	0	28	2,548	4,228	6,972
Total	5,100	6,420	13,188	15,708	17,388	20,132

Tabla 21. Pago (\$) de los consumidores por energía (mercados separados)

	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 4	Periodo 5	Periodo 6
Nodo 1	1,275	1,600	3,276	3,920	4,340	5,040
Nodo 2	1,275	1,600	3,304	3,920	4,340	5,040
Nodo 3	1,275	1,600	3,304	3,920	4,340	5,040
Nodo 4	1,275	1,620	3,304	3,948	4,368	5,012
Total	5,100	6,420	13,188	15,708	17,388	20,132

Tabla 22. Ganancias (\$) por venta de reservas (mercados separados)

	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 4	Periodo 5	Periodo 6
G 1	0	0	0	0	0	0
G 2	800	800	800	800	800	800
G 3	450	450	450	450	450	450
G 4	0	0	0	0	0	0
Total	1,250	1,250	1,250	1,250	1,250	1,250

Tabla 23. Ingresos (\$) de los generadores por venta de energía y reserva (mercados separados)

	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 4	Periodo 5	Periodo 6	Total
G1	4,250	5,000	7,000	7,000	7,000	7,000	37,250
G2	1,650	2,200	2,760	2,760	2,760	2,760	14,890
G3	450	470	4,650	4,650	4,650	4,650	19,520
G4	0	0	28	2,548	4,228	6,972	13,776

Tabla 24. Valor de la función objetivo (\$) (mercados separados)

Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 4	Periodo 5	Periodo 6	Total
6,350	7,670	14,438	16,958	18,638	21,382	85,436

### Comparación entre ambos modelos

En la figura 5 se grafican las ganancias obtenidas por cada generador por la venta de energía en cada uno de los mercados. Se observa que G1 y G4 tienen mayores ganancias cuando se establece un mercado unificado, mientras que G2 y G3 tienen mayores ganancias por la venta de reservas cuando se tiene un mercado de servicios separados. Esto se debe a que G2 y G3 son las que

ofertan más barato el servicio de reserva y, debido a que este mercado es el que se resuelve primeramente, se satisface el total de la reserva con estas dos unidades aun cuando G4 también oferte.

Sin embargo, el mercado separado puede ocasionar que alguno de los generadores, al conocer los resultados del mercado de reservas, pueda tener poder de mercado en el de energía, lo cual implica, como se observa en este ejemplo, que los precios de energía se incrementen.

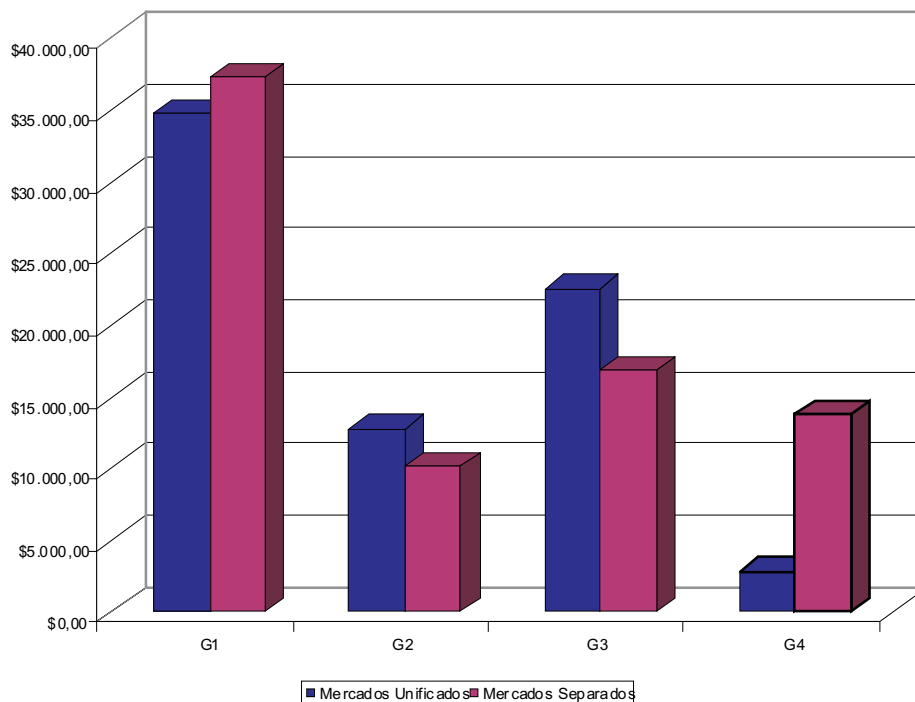


Figura 5. Ganancias de los generadores por venta de energía para cada mercado

La figura 6 muestra cómo son distribuidas las ganancias por venta del servicio de reservas de cada uno de los generadores; debido a que G1 no hace ofertas de reserva, este servicio es asignado a las demás unidades.

Para el caso de mercados unificados, se observa que G2, G3 y G4 obtienen ingresos por la venta de este servicio, mientras que en el mercado separado solamente G2 y G3 participan en el mismo, como ya se explicó anteriormente.

Para el caso de los generadores G1 y G4, se nota que los ingresos son mayores cuando se tiene un mercado separado. Sin embargo, para poder definir en qué mercado es donde se tienen menores costos, se debe considerar en conjunto, tanto las ganancias por venta de reserva como las correspondientes a la venta de energía.

La figura 7, muestra las ganancias de cada uno de los generadores por la venta de ambos servicios; puede observarse que G2 y G3 tienen mayores ingresos cuando se tiene un mercado unificado, mientras que G1 y G4, tienen mayores ingresos con un mercado separado.

La figura 8, muestra los costos totales por venta de energía y reserva en cada uno de los mercados, tanto por la venta de reserva como de energía. Aquí, se puede apreciar claramente que, aunque marginalmente para el mercado separado se tienen mayores costos, lo cual implica que se tendrán mayores cobros a los que paguen el servicio y, debido a que el modelo propuesto implica minimizar costos, desde este punto de vista es más eficiente tratar los mercados de manera unificada.

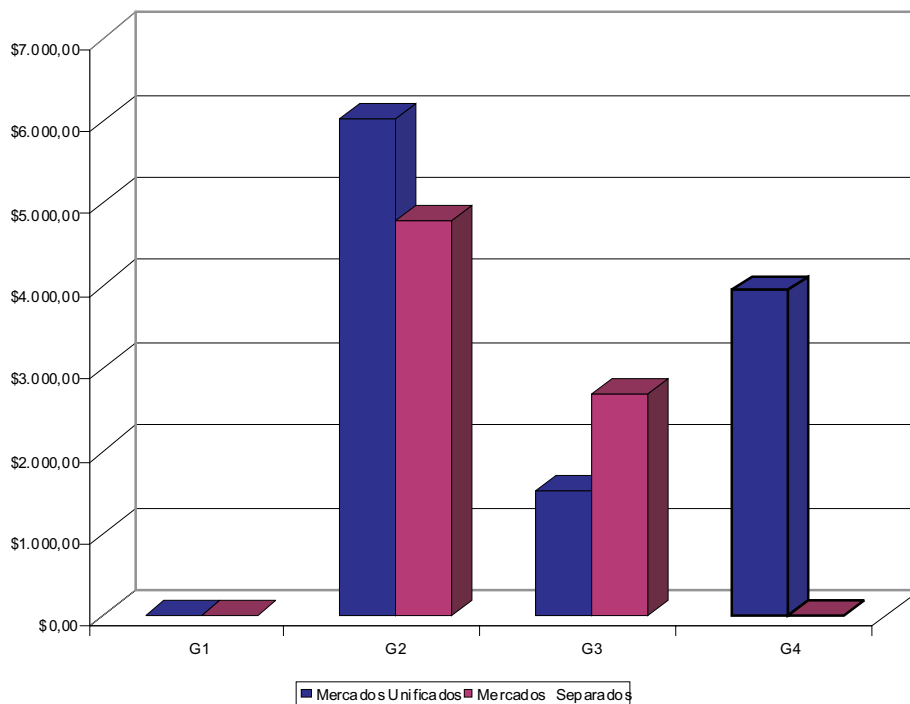


Figura 6. Ganancias de los generadores por venta de reserva para cada mercado

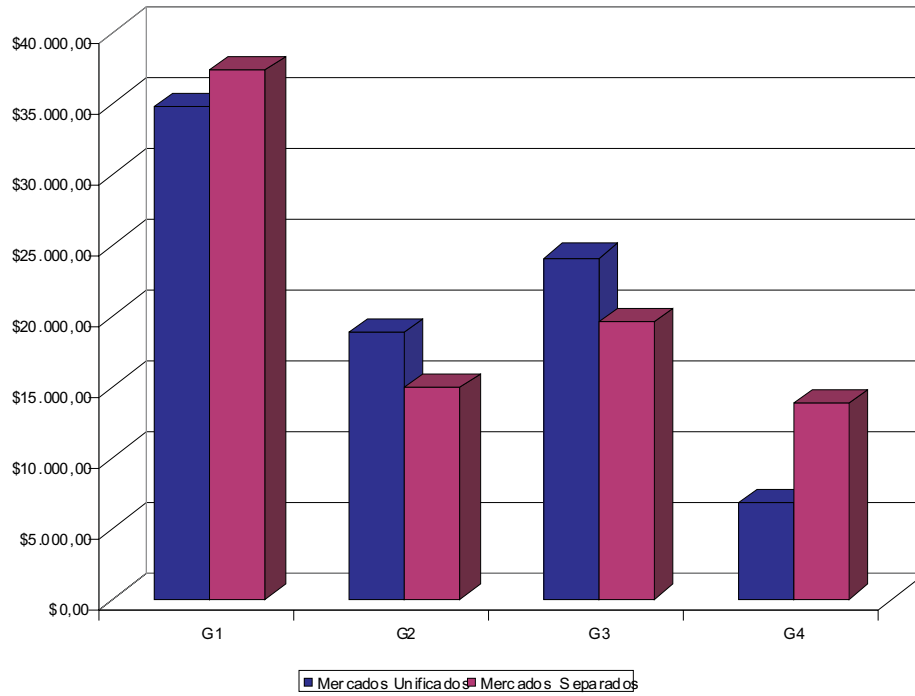


Figura 7. Ingresos totales de cada generador para cada mercado

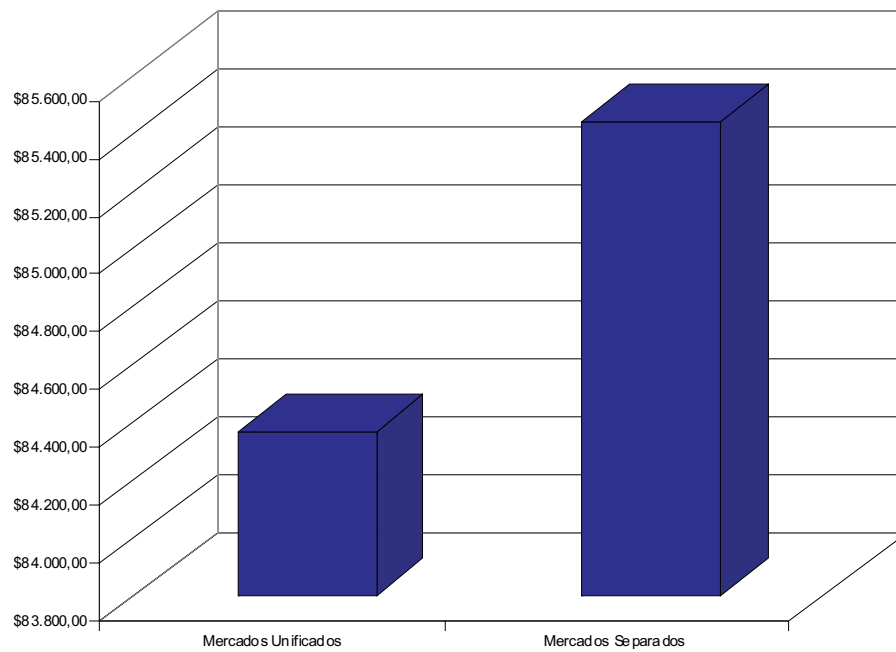


Figura 8. Costos totales por venta de reserva y energía para cada mercado

## Conclusiones

En este trabajo, se presentó y analizó la formulación unificada para resolver los mercados de energía activa y reservas de potencia activa. Especial énfasis se hace en la diferencia de precios que presenta esta formulación con respecto a plantear ambos mercados a través de formulaciones separadas. Se observó, mediante ejemplos ilustrativos, que la separación de ambos mercados conduce a precios mayores del suministro de energía y reservas, lo cual permite concluir que es más eficiente resolverlos de manera unificada, a través de una formulación de un problema de optimización incluyendo las funciones objetivo de minimizar costos de producción de energía y reservas e incluyendo las restricciones de reserva para el sistema eléctrico.

Por otra parte, se observa en los resultados que los costos asociados a la energía son pagados por los consumidores de manera directa. Sin embargo, el balance de pagos para el servicio de reserva de potencia activa no resulta así de claro, debido a que las reservas definidas por la solución del problema de optimización están relacionadas con capacidad disponible de generación para utilizarse en cualquier momento. Esto implica que debe diseñarse un esquema de pagos de reservas, el cual, de acuerdo a la literatura, puede estar sustentado en que ya sean los propios generadores o los consumidores los que paguen. Este aspecto puede ser desarrollado como un trabajo a futuro.

Adicionalmente, no se presenta un análisis del impacto de las contingencias sobre el despacho unificado de energía y reservas, el cual, dependiendo de la severidad de la contingencia, puede ser drástico, desde el punto de vista de los costos asociados en ambos mercados. También este tema es para el desarrollo de investigaciones posteriores.

## Agradecimientos

Jorge Alejandro Quiñónez Osobampo, agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, CONACyT, por

el apoyo económico recibido para la realización de estudios de maestría.

## Referencias

- Arroyo J.M., Galiana F.D. Energy and Reserve Pricing in Security and Network-Constrained Electricity Markets. *IEEE Trans. On Power Systems*, 20(2):634-643. 2005.
- Cramton P., Chao H., Wilson R. *Review of the Proposed Reserve Markets in New England*. 2005.
- Federal Energy Regulatory Commission-FERC [en línea]. 2005. Disponible en: <http://www.ferc.gov>
- GAMS. *The Solver Manuals*. 2004.
- Geoffrey R., Tomas G. *Electricity Economics: Regulation and Deregulation*. IEEE Press Series on Power Engineering. 2003.
- Hirst E., Kirby B. *Creating Competitive Markets for Ancillary Services, Office of Utility Technologies*. Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. US. Department of Energy. 1997.
- Kirschen D., Strbac G. *Fundamentals of Power System Economics*. John Wiley and Sons. Inc. 2004.
- Ott A.L. Experience with PJM Market Operation, System Design, and Implementation. *IEEE Trans. On Power Systems*, 18(2):528-534. 2003.
- Rashidinejad M., Song Y.H., Jadivi Dasht-Bayaz M.H. Contingency Reserve Pricing Via a Joint Energy and Reserve Dispatching Approach. *Energy Conversion and Management*, 43:537-548. 2000.
- Silberberg E., Suen W. *The Structure of Economics: A mathematical Analysis*. Irwin McGraw Hill. 2000.
- Singh H. Auction for Ancillary Services. *Decision Support Systems*, 24(3-4):183-191. 1999.
- Song Y, Wang X. *Operation of Market-oriented Power Systems*. Springer-Verlag. 2003.
- Wilson R. *Architecture of Power Markets, RESEARCH PAPER NO. 1708*. Graduate School of Business, Stanford University. 2001.
- Wood A., Wollenberg B. *Power Generation, Operation and Control*. John Wiley & Sons. Second Edition. 1996.

---

### **Semblanza de los autores**

*Jorge Alejandro Quiñónez-Osobampo.* Realizó sus estudios de licenciatura en el Instituto Tecnológico de Sonora y la maestría en el Instituto Tecnológico de Morelia (ITM), obteniendo los grados respectivos en 2003 y en 2006. Actualmente labora en el área de control Baja California de la Comisión Federal de Electricidad.

*José Horacio Tovar-Hernández.* Realizó sus estudios de licenciatura en el Instituto Tecnológico de Morelia (ITM), obteniendo el grado de ingeniero electricista en 1984. Realizó sus estudios de maestría y doctorado en ingeniería eléctrica en la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica del Instituto Politécnico Nacional, en 1989 y en 1995, respectivamente. Actualmente es profesor del programa de graduados e investigación en ingeniería eléctrica (PGIIE) del ITM.

*Guillermo Gutiérrez-Alcaraz.* Realizó los estudios de licenciatura y maestría en el Instituto Tecnológico de Morelia, obteniendo el grado de ingeniero y de maestro en ciencias, ambos en ingeniería eléctrica, en 1995 y 1996, respectivamente. Actualmente es profesor del PGIIE del ITM.

# Fluctuaciones de presión en la base del pozo de oscilación del P.H. Zimapán Hgo., con diferentes arreglos estudiados en modelo hidráulico ante las condiciones mínimas de operación

## *Pressure Fluctuations on the Bed of Surge Tank at the H.P. Zimapan, Hgo., with Different Arrangements Studied on Hydraulic Model, with the Lowest Operation Conditions*

H. Marengo-Mogollón  
Facultad de Ingeniería, UNAM  
E-mail: [humberto.marengo@cfe.gob.mx](mailto:humberto.marengo@cfe.gob.mx)

F.J. Ochoa-Álvarez  
Comisión Federal de Electricidad.  
E-mail: [federico.ochoa@cfe.gob.mx](mailto:federico.ochoa@cfe.gob.mx)

C. Cortés-Cortés  
Comisión Federal de Electricidad.  
E-mail: [carlos.cortes01@cfe.gob.mx](mailto:carlos.cortes01@cfe.gob.mx)

(Recibido: agosto de 2007; aceptado: septiembre de 2008)

### **Resumen**

En este artículo se comparan las fluctuaciones de presión en el pozo de oscilación del P.H. Zimapán Hgo., las cuales fueron estudiadas en modelo hidráulico al considerar dicho pozo ubicado en diferentes posiciones; lateralmente y sobre el eje de la conducción; pozo simple y con tubería de conexión; con y sin placa de orificio, para maniobras de rechazo y demanda de carga de las turbinas de generación con el nivel del agua correspondiente al NAMINO. Se determinó la eficiencia hidráulica comparándola con las otras opciones encontrándose que la mejor opción para el funcionamiento hidráulico es el pozo lateral, que además permite optimizar el procedimiento constructivo.

**Descriptores:** Pozos de oscilación, modelo hidráulico, fluctuaciones de presión, eficiencia hidráulica.

### **Abstract**

*In this paper, the pressure fluctuations of the surge tank in the Zimapan Hydroelectric Project are compared in a hydraulic model. The shaft is located lateral, over the conduction tunnel and in the simple form (permitting the tunnel entering the shaft), with and without orifice plates taking into account the demand and supply condition of energy with the minimum level of water of the conduction. It was determined the hydraulic efficiency and it was found that it was the best constructive option.*

**Keywords:** Pressure fluctuations, surge tank, orifice plates, the hydraulic efficiency.

### **Introducción**

El P.H. Zimapán se construyó entre 1989 y 1994 sobre el río Moctezuma en el centro de México por

parte de la Comisión Federal de Electricidad; durante el proceso de construcción se decidió colocar el pozo de oscilación de la conducción en forma lateral, con la premisa de que las presiones hidráulicas se transmiten de

forma semejante a un pozo convencional durante las maniobras de rechazo y arranque de las unidades.

Desde el punto de vista constructivo, se logró independizar los frentes de trabajo del túnel y del pozo de oscilación sin que se tuviera mayor interferencia entre ellos, lo cual representó una gran ventaja en el procedimiento de construcción de este frente. Sin embargo, la inquietud en cuanto a su eficiencia hidráulica, quedó como una tarea pendiente a demostrarse.

Con base en lo anterior, se juzgó conveniente estudiar en un modelo físico las fluctuaciones de presión en la base del pozo de oscilación ubicado en diferentes posiciones; lateralmente –como se construyó–, sobre el eje de la conducción; con pozo simple y con tubería de conexión; con y sin placa orificio para maniobras de rechazo y toma de carga de las turbinas de generación, al considerar el nivel del agua del embalse al NAMINO, ya que representar el nivel del agua al NAMO escapa de los límites físicos de espacio en el laboratorio.

### Descripción del proyecto

La obra de generación está integrada por una obra de toma tipo rampa con umbral de entrada a la elevación 1500 msnm, un túnel de conducción de sección tipo

herradura de 4,70 m de diámetro y 20964 m de longitud. Al término del túnel de conducción se ha dispuesto un pozo de oscilación de 12 m de diámetro y 132 m de altura.

La conducción se complementa con una tubería de acero de 3,50 m de diámetro y 1080 m de longitud que trabaja a presión. En su parte final, antes de llegar a la casa de máquinas, se bifurca en 2 ramales de 2,10 m de diámetro cada uno, los cuales alimentan dos turbinas tipo Pelton de 146 MW cada una.

El nivel mínimo de operación (NAMINO) corresponde a la elevación 1520 msnm en el embalse, se comunica con el pozo de oscilación a través del túnel de conducción, y el comportamiento conjunto para flujo permanente es como vasos comunicantes; ya que las pérdidas de carga en todo el túnel hasta el pozo son de 35,68 m que corresponden (figura 1) a un coeficiente de rugosidad de Manning en prototipo  $n_p = 0,0145$ ; además hay que sumar las pérdidas locales a las pérdidas por fricción.

Las pérdidas de carga calculadas en el proyecto se muestran en la tabla 1, que también señala el tramo de la conducción (hasta el cadenamamiento 20+964,00 es concreto) y el tramo de acero (hasta el cadenamamiento 21+971,00).

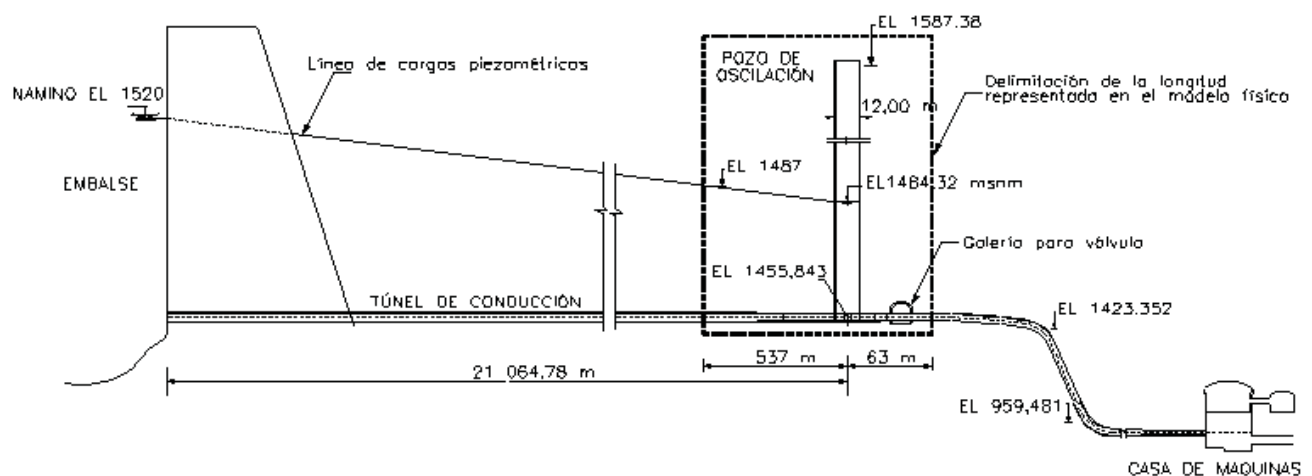


Figura 1. Esquema del túnel de conducción y longitud representada en el modelo físico



Tabla 1. Pérdidas de carga teóricas en el túnel de conducción

Conducción a presión				
Tramo en km	Longitud en m	Espesor en pulg.	Diámetro en m	Pérdidas en m
0+ 000 – 20 +964,00	20 964,00	tunel - concreto	4,70	34,168
20 + 964,00 – 21 + 064,00	100,00	7/8 " acero	4,00	0,466
21 + 064,00 – 21 + 400,00	336,00	3/4 " acero	3,50	2,250
21 + 400,00 – 21 + 447,00	47,00	7/8" acero	3,50	0,200
21 + 447,00 – 21 + 524,00	77,00	1" acero	3,50	0,380
21 + 524,00 – 21 + 571,00	47,00	1 1/8" acero	3,50	0,200
21 + 571,00 – 21 + 618,00	47,00	1 1/4" acero	3,50	0,200
21 + 618,00 – 21 + 665,00	47,00	1 3/8" acero	3,50	0,340
21+665,00 – 21 + 870,00	205,00	1 1/2" acero	3,50	0,990
21 + 870,00 – 21+ 917,00	47,00	1 5/8" acero	3,50	0,550
21 + 917,00 – 21 + 971 ,00	54,00	2 3/4" acero	3,50	0,270
Tramo de ajuste	43,40	1 3/4" acero	3,50	0,952

### Descripción del modelo

En la selección de la escala del modelo,  $L_e = 30$ , se tomó en cuenta el espacio disponible en el Laboratorio de Hidráulica de la CFE, así como el gasto de alimentación para los ensayos, el costo y tiempo de su construcción. De acuerdo con la similitud de Froude se obtuvieron los valores de las escalas siguientes:

Escala	Valor
Líneas	$L_e = 30$
Velocidades	$V_e = L_e^{0,5} = 5,48$
Gastos	$Q_e = L_e^{2,5} = 4929,50$
Rugosidades	$n_e = L_e^{0,16} = 1,72$
Tiempos	$T_e = L_e^{0,5} = 5,48$
Pesos	$W_e = L_e^3 = 27000$

Es importante mencionar que la mayor dificultad para el diseño del modelo de este tipo de estructuras, surge cuando el túnel es muy largo, ya que se requiere de una tubería de gran longitud para representarlo. En forma similar, se presentan problemas con pozos demasiado altos. En este caso, conviene distorsionar la longitud del túnel respecto a la dimensión del pozo, resultando que el diámetro del túnel en el modelo puede ser semejante al diámetro del pozo.

En el caso de diseñar un modelo distorsionado, se debe cumplir satisfactoriamente la ley de semejanza en la cantidad de movimiento, así como las pérdidas entre modelo y prototipo. Sin embargo, por otro lado se recomienda (Berezowsky *et al.*, 1988), que para simular con precisión las pérdidas locales y la unión del pozo con el túnel, el modelo debe construirse sin distorsión.

Considerando lo anterior y por limitaciones de espacio en el laboratorio, se decidió diseñar un modelo físico, construido a una escala  $L_e = 30$ , con el criterio de similitud de Froude, sin distorsión y representar solo 537 m de longitud de túnel de conducción aguas arriba del pozo y 63 m aguas abajo del mismo; así como el aceptar que los ensayos se realizarían únicamente para el nivel del agua al (NAMINO) "Nivel de Aguas Mínimas de Operación".

La disposición geométrica del pozo de oscilación en sus diferentes localizaciones se muestran en la figura 2.

Debe señalarse que no hay similitud entre las pérdidas de energía de un túnel revestido de concreto en prototipo que tiene rugosidad granular y uno de rugosidad ondular como es la lucita, cuyo factor de fricción depende del número de Reynolds; razón por la cual en el modelo se simulaban básicamente los fenómenos transitorios con sus pérdidas locales, tratando de no inferir los resultados a consideraciones de pérdidas por fricción.

### Instrumentación, puesta a punto para su operación

La instrumentación del modelo físico consistió en instalar:

1. Celdas de presión (figura 2), en diferentes secciones con el objeto de registrar las fluctuaciones de presión simultánea pozo-túnel de conducción.
2. Un generador de transitorios para simular la ley de rechazo y toma de carga de las turbinas, formado por:
  - Servo-motor y PLC con pantalla para modificar parámetros (electrónica del sistema), (figura 3).
  - Computadora personal para la captura y almacenamiento de registros.
3. Sistema de Adquisición de Datos (SAD).

4. Tubos piezométricos para registrar el perfil hidráulico en el túnel de conducción.

Para iniciar la operación del modelo se establece el flujo permanente en la conducción con el gasto de diseño de generación. Con los valores medidos con los tubos piezométricos del flujo permanente se ajustaron las celdas de presión y se iniciaron los ensayos.

### Registro de fluctuaciones de presión

Se realizaron varios ensayos para los siguientes arreglos de pozo de oscilación:

- Considerando el pozo de oscilación lateral con y sin placa de orificio (figura 4).
- Pozo de oscilación alineado con el túnel de conducción y diferentes placas de orificio (figura 5), y
- Con un pozo de oscilación simple (figura 6).

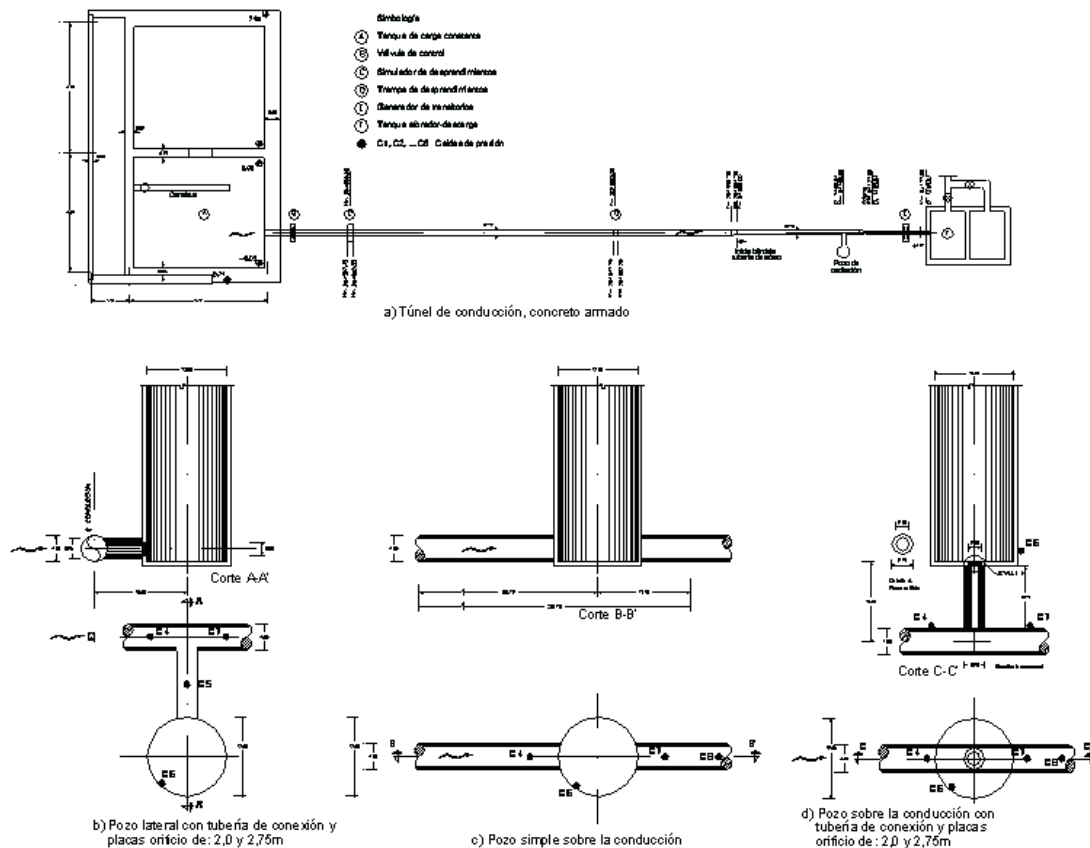


Figura 2. Esquema del modelo físico y ubicación de celdas de presión



Figura 3. Servomotor y PLC de la instalación

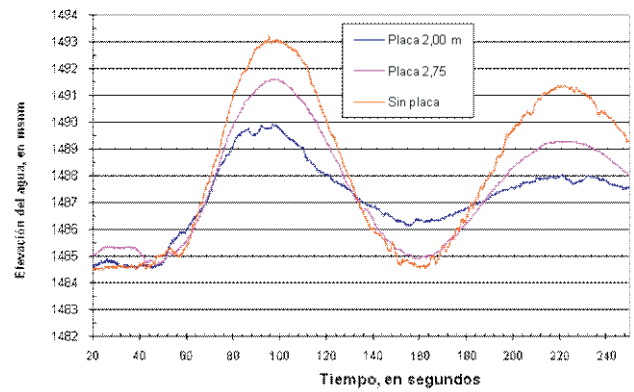


Figura 4. Fluctuaciones de presión con pozo de oscilación lateral y diferentes placas orificio

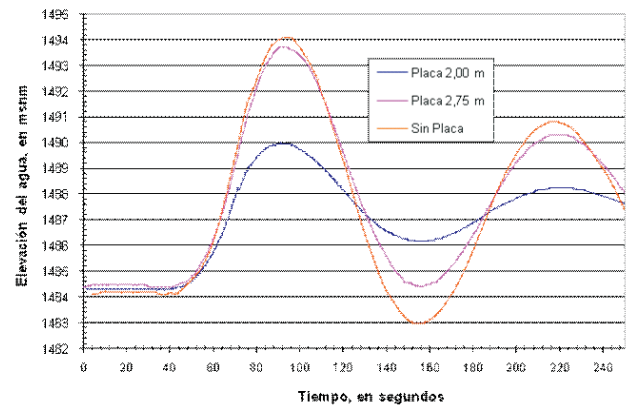
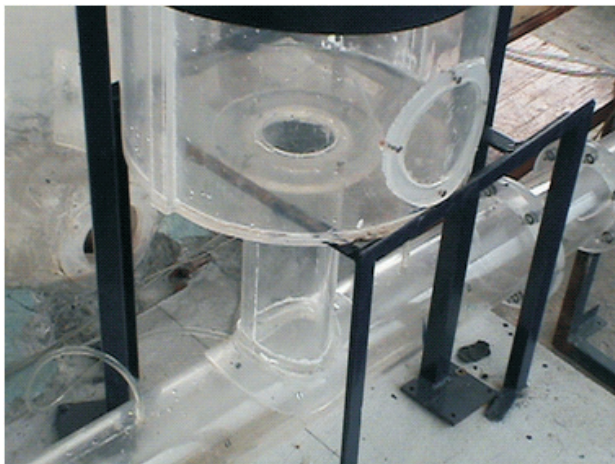


Figura 5. Fluctuaciones de presión con pozo de oscilación alineado con la conducción y diferentes placas de orificio

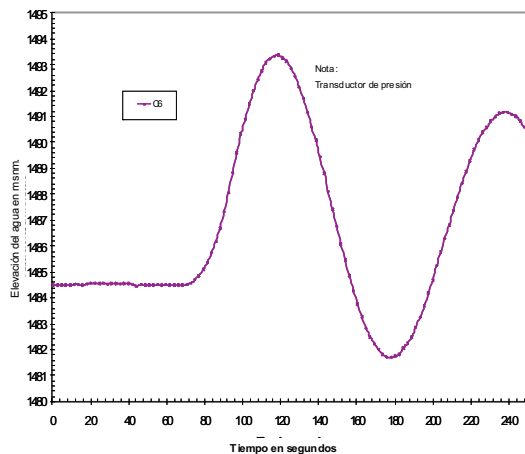


Figura 6. Fluctuaciones de presión con pozo de oscilación simple en la conducción

El nivel de agua en el embalse se reprodujo a la elevación 1520 msnm que corresponde al nivel de aguas mínimo ordinarias (NAMINO); al descontar las pérdidas de carga, se tiene al inicio del tramo modelado la elevación 1487 msnm y en el pozo de oscilación la elevación 1484,32 msnm.

### Análisis de resultados

#### Maniobra de rechazo de carga

En cuanto a las maniobras de rechazo total de carga de las turbinas, al analizar los registros de fluctuaciones de presión para las diferentes ubicaciones del pozo de oscilación, se encontró que la disipación de la energía debida

a la sobrepresión se traduce como una oscilación de masas en el pozo de oscilación y se transmite hacia el túnel de conducción en una cuantía que no pone en riesgo la estabilidad de la estructura.

Los niveles máximos y mínimos del agua registrados en el pozo de oscilación para el rechazo total de carga de las turbinas, ante condiciones extremas, fueron los señalados en la tabla 2.

Cabe aclarar que cuando se analizan los rechazos de carga, el diseño se hace considerando el embalse al NAMO (elevación 1560 msnm). Bajo esta condición, ante el accionamiento de los deflectores de las turbinas tipo pelton (y posteriormente el cierre de los inyectores de la rueda), el pozo no debe derramar y se buscó que la sobrepresión máxima no sobrepase un 15% de la carga

Tabla 2. Niveles máximos y mínimos del agua registrados en el pozo de oscilación para el rechazo total de carga de las turbinas

Localización del pozo	Placa orificio en m	Niveles de agua en msnm		
		Flujo permanente	Máximo	Mínimo
Lateral con tubería de conexión	2,00	1484,57	1489,88	1484,57
	2,75	1485,05	1491,59	1484,66
	3,20 (sin placa)	1484,48	1493,04	1484,48
Simple en la línea de conducción	Sin placa	1484,48	1493,36	1481,71
	Sin pozo	1484,64	1505,72	1483,59
Sobre la conducción con tubería de conexión	2,00	1484,30	1489,98	1484,28
	2,75	1484,39	1493,71	1484,39
	3,20 (sin placa)	1484,11	1494,10	1482,98

estática máxima para no tener un espesor de placa en la tubería a presión muy grande.

En el caso del P.H. Zimapán, se cumplió plenamente con esta condición, ya que el nivel del agua máximo en el pozo, correspondió a la elevación 1582,38 msnm, que resulta en un 9,28% de sobrecarga, con respecto a la carga estática máxima que es de 603m. En la tabla 3, se muestran los valores extremos registrados en cada celda de presión (figura 2) donde se aprecia la variación de la carga de presión que se traduce en una oscilación en masa para la conducción a presión. Las ondas de presión son reflejadas en el pozo hacia aguas abajo y una porción de estas ondas de presión se transmite hacia aguas arriba a lo largo del túnel de conducción.

La figura 7 muestra los valores máximo y mínimo de niveles de agua registrados en el pozo de oscilación considerando el rechazo de carga total de las turbinas.

### Maniobra de demanda de carga

La condición analizada de máxima demanda de carga de las turbinas se realizó considerando el NAMINO, por lo que la oscilación mínima que se produce en el pozo-túnel de conducción ocurre en un tiempo muy corto, restableciéndose rápidamente el nivel de operación del sistema para la condición de flujo permanente. Los niveles del agua mínimos y máximos registrados en el pozo de oscilación para las diferentes condiciones geométricas del pozo, se indican en la tabla 4, sin que se formen vórtices que produzcan inclusión de aire hacia la tubería a presión que modifiquen las condiciones normales de operación de las turbinas.

### Eficiencia del pozo para disipar energía

Del análisis de la tabla 2 y la figura 7, la energía que se presenta en forma de carga de presión en el pozo de oscilación, es igual a la diferencia de las elevaciones (1505,72-1484,64) = 21,08 m columna de agua, es decir, es la diferencia de nivel del agua para flujo transitorio, menos el nivel del agua para flujo permanente. A partir de esta carga de presión sin pozo de oscilación, se tomó como base para determinar la eficiencia del pozo con sus diferentes placas orificio y sus localizaciones respecto al eje de la conducción con la siguiente expresión.

$$\eta = \frac{E_G - E_D}{E_G} \cdot 100,$$

Donde:

- $E_G$ , oscilación máxima registrada sin pozo, en metros columna de agua; igual a  $(E_{ps} - E_{Ms})$ ,
- $E_{ps}$ , nivel máximo del agua registrado para flujo transitorio sin pozo;
- $E_{Ms}$ , nivel del agua registrado para flujo permanente sin pozo.
- $E_D$ , oscilación máxima registrada con pozo, en metros columna de agua; igual a  $(E_p - E_M)$ ,
- $E_p$ , nivel máximo del agua registrado para flujo transitorio con pozo;
- $E_M$ , nivel del agua registrado para flujo permanente con pozo.

Tabla 3. Valores extremos de presión registrados en el pozo de oscilación ante rechazo de carga en las turbinas

Ensaye	Celda								Localización
	1	2	3	4	5	6	7	8	
1	1488,282	1491,056	1491,758	1494,657	1494,294	1489,881	1494,952	1495,566	Pozo lateral
3	1487,529	1490,102	1490,032	1492,217	1492,244	1491,582	1492,500	1492,932	
5	1488,044	1490,399	1490,881	1493,152	1493,240	1493,043	1493,252	1493,120	
7	1490,011	1496,551	1497,594	1503,983	1504,347		1504,637	1506,515	Sin pozo
9	1488,042	1488,857	1490,911	1493,256		1493,359	1493,496	1493,512	Pozo simple
11	1488,119	1492,015	1492,344	1495,979		1489,9821	1496,602	1497,524	Pozo sobre la conducción
13	1488,097	1489,583	1490,685	1492,496		1493,706	1492,548	1493,094	
15	1487,897	1490,778	1491,132	1493,719		1494,099	1493,431	1493,828	
Flujo permanente	1486,15	1485,74	1485,65	1484,47	1484,65	1484,57	1484,42	1483,39	Pozo lateral

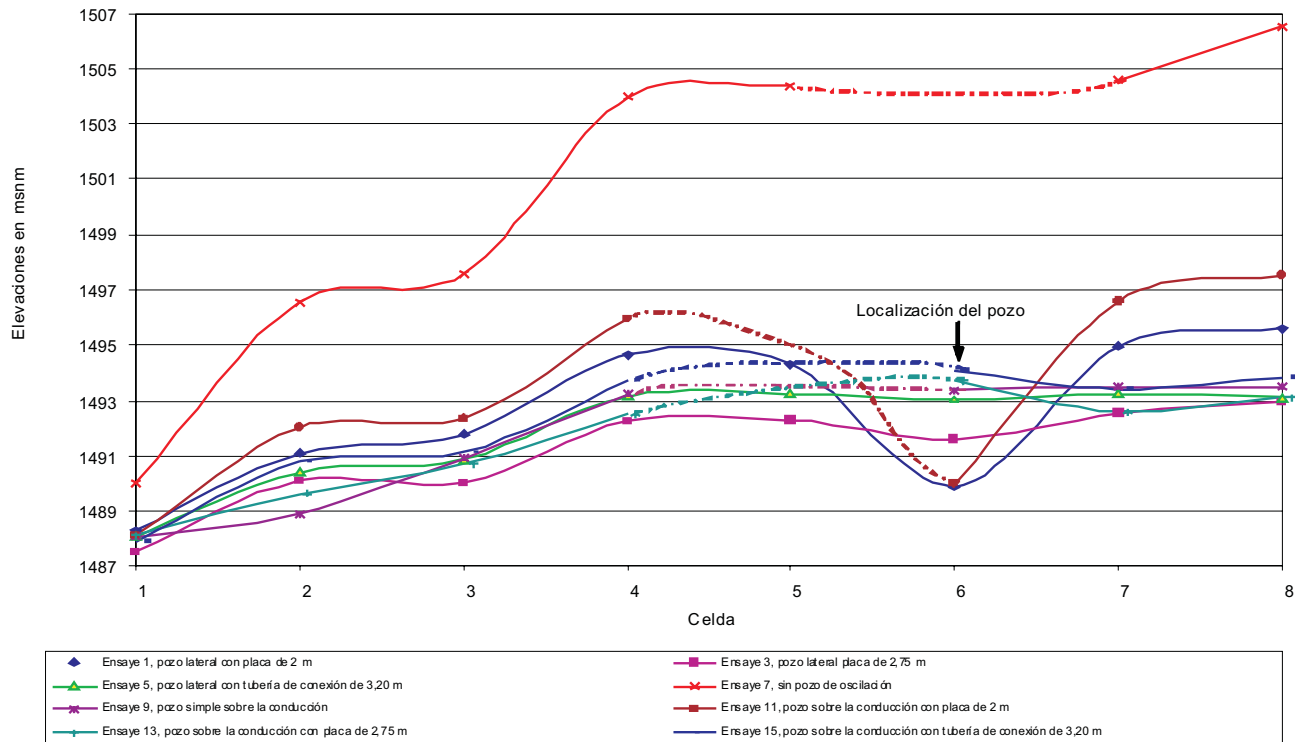


Figura 7. Valores máximo y mínimo de niveles de agua registrados en el pozo de oscilación considerando el rechazo de carga total de las turbinas

Tabla 4. Niveles del agua mínimos y máximos registrados en el pozo de oscilación para las diferentes condiciones geométricas del pozo

Localización del pozo	Placa orificio en m	Flujo permanente	Nivel del agua en m	
			Mínimo	Máximo
Lateral con tubería de conexión	2,00	1487,43	1483,88	1488,10
	2,75	1487,42	1483,87	1487,93
	3,20 (sin placa)	1487,53	1482,62	1487,97
Simple en la conducción	Sin placa	1487,14	1482,62	1487,19
Sin pozo	Sin placa	1487,64	1483,96	1487,82
Sobre la conducción con tubería de conexión	2,00	1487,40	1483,36	1487,57
	2,75	1487,52	1482,58	1487,67
	3,20 (sin placa)	1487,54	1482,72	1487,63

Tabla 5. Eficiencia de los pozos de oscilación probados con distintas placas de orificio

Localización del pozo	Placa orificio diámetro en m	Energía en m columna de agua	Eficiencia $\eta$ en %	
			% disipado en el pozo	% que pasa hacia el túnel
Lateral	2,00	5,31	74,81	25,19
	2,75	6,54	68,97	31,03
	3,20	8,56	59,39	40,61
Simple sobre la conducción	12,00	8,88	57,87	42,13
Sobre la conducción con batería de conexión	2,00	5,68	73,06	26,94
	2,75	9,32	55,79	44,21
	3,20	9,99	52,60	47,40
Sin pozo	4,00	21,08	0,00	100,00

Por ejemplo, en el caso de pozo lateral con placa orificio de 2 m de diámetro, la eficiencia se estimó como:

$$\eta = \frac{((1505,72-1484,64)-(1489,88-1484,57))}{(1505,72-1484,64)} * 100 = 74,81 \%$$

de energía de presión que se libera y deja pasar el 25,19 %. De manera análoga, se hizo para el resto de las placas orificio.

En la tabla 5 se presentan los valores comparativos.

De esta tabla 5, se infiere que el pozo localizado lateralmente al eje del túnel de conducción con placa orificio de 2,00 m de diámetro es el más eficiente, convirtiendo en oscilación de masa la mayor parte de la energía, que deja pasar la menor cantidad de la onda de presión hacia el túnel de conducción.

La disposición geométrica anterior adoptada en el P.H. Zimapán, fue la mejor decisión, ya que hidráulicamente permite tener un funcionamiento hidráulico más eficiente y constructivamente permite tener frentes independientes del túnel de conducción. El haber elegido esta opción fue la mejor decisión, ya que desde el punto de vista hidráulico es la más eficiente y del constructivo, permite dos frentes de excavación independientes en el túnel de conducción.

### Conclusiones

El pozo con arreglo lateral al eje del túnel de conducción con placa orificio de 2,00 m de diámetro es el más eficiente, haciendo oscilar la mayor parte de la columna de

agua y dejar pasar la menor cantidad de carga de presión hacia el túnel de conducción.

La disposición geométrica adoptada en el P.H. Zimapán, fue la mejor decisión, ya que desde el punto de vista hidráulico es la mejor; y del constructivo, permite dos frentes de excavación independientes del túnel de conducción.

La magnitud de la energía que se transmite hacia el túnel de conducción en forma de onda de presión, genera un esfuerzo tangencial, que es inferior a la resistencia del concreto sometido a esfuerzos de tensión.

Para las condiciones de toma de carga de las turbinas, en condiciones de operación extrema, la oscilación máxima que se produce en el pozo-túnel de conducción se realiza en un tiempo muy corto, sin formación de vórtices que produzcan inclusión de aire hacia la tubería a presión, que modifiquen las condiciones normales de operación de las turbinas. Restableciéndose rápidamente el nivel de operación del sistema para la condición de flujo permanente.

### Referencia

Berezowsky M. y Ramírez H. *Cámaras de oscilación, análisis y diseño hidráulico*. Series del Instituto de Ingeniería. Mayo, 1988.

### Bibliografía sugerida

Camacho C.J.C. y Cortés C. *Informe final del estudio del funcionamiento de la trampa de desprendimientos del túnel de*

- conducción de la C. H. Zimapán, en modelo físico.* Laboratorio de Hidráulica. CFE. Diciembre, 2004.
- CFE. *Informe interno del recorrido de inspección en el túnel de conducción.* CFE. Junio, 2002.
- CFE. Manual de Diseño de Obras Civiles. *Hidrotecnia. A 2.15. Técnicas Experimentales.* CFE. 1981.
- CFE. Manual de Diseño de Obras Civiles. *Hidrotecnia. A 2.5. Cámaras de Oscilación.* CFE. 1981.
- CFE. Manual de Diseño de Obras Civiles. *Hidrotecnia. A 2.6. Golpe de Ariete.* CFE. 1981.
- CFE. Manual de Diseño de Obras Civiles. *Hidrotecnia. A.2.11. Hidráulica Fluvial.* CFE. 1981.
- Novak P. y Cabelka J. *Models in Hydraulic Engineering, Physical Principles and Design Applications.* Londres. Ed. Pitman. 1981.
- Ochoa A.F.J. y Cortés C. *Informe final del estudio de fluctuaciones de presión en el pozo de oscilación del túnel de conducción, en modelo hidráulico.* Laboratorio de Hidráulica. CFE. Septiembre, 2006.
- Nota: El Manual de Diseño de Obras Civiles de CFE, ya no se publica, aunque hay existencia en bibliotecas.*

---

#### Semblanza de los autores

*Humberto Marengo-Mogollon.* Es ingeniero civil, maestro y doctor en ingeniería en hidráulica por la Facultad de Ingeniería de la UNAM. Desde 1980, ha participado en el diseño y construcción de proyectos hidroeléctricos. Actualmente funge como coordinador de proyectos hidroeléctricos. Ha recibido diversos reconocimientos como: la Medalla Gabino Barreda que otorga la UNAM a los mejores promedios en el doctorado, el Premio Nacional de Ingeniería Civil José A. Cuevas al mejor artículo técnico del periodo 1998-1999 y Miguel A. Urquijo al mejor artículo técnico del periodo 2000-2001 por parte del CICM, así como el Premio Nacional Ing. Francisco Torres H. a la práctica profesional de la hidráulica, en el año 2004, por la asociación mexicana de hidráulica y la Medalla Benito Juárez a la excelencia institucional en el año 2006 por la CFE. Asimismo, como académico titular en la academia de ingeniería, y como miembro regular de la academia mexicana de ciencias e investigador nacional (nivel I) del sistema nacional de investigadores. Desde 1985 es profesor de asignatura de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

*Federico Joaquín Ochoa-Álvarez.* Ingeniero civil por la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, cursó sus estudios de maestría en ingeniería hidráulica en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México. Desempeñó funciones como responsable de agua en el Sistema de Administración Ambiental de la Secretaría del Medio Ambiente en el Gobierno del Distrito Federal. Ha sido responsable de estudio y supervisor técnico en algunos proyectos realizados en el laboratorio de hidráulica de la Coordinación de Proyectos Hidroeléctricos de la Comisión Federal de Electricidad. Actualmente se desempeña como encargado de área de modelos hidráulicos en el mismo laboratorio.

*Carlos Cortés-Cortés.* Egresado como ingeniero civil de la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura del I.P.N. Obtuvo la maestría en ingeniería hidráulica en la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, UNAM. Tomó el diplomado en computación administrativa, así como cursos de informática y paquetería de PC's y electrónica, en el manejo de equipo de medición de alta precisión anemometría láser y cámara de alta velocidad. Inició sus actividades en el área de informática en la implantación del programa de información tecnológica de centrales generadoras en el Instituto de Investigaciones Eléctricas. A partir de 1989, en el Laboratorio de Hidráulica de la Comisión Federal de Electricidad ha participado en estudios experimentales de pozos de oscilación, vertedores escalonados, presas reguladoras, aireadores, desarrollo de proyectos de instrumentación de vertedores y obras de desvío en prototipo, cárcamos de bombeo, canales de llamada, desazolve de embalses y optimización de desarenadores, canales de descarga de plantas termoeléctricas y obras de toma de plantas hidroeléctricas. Asimismo, ha diseñado, construido y operado los modelos físicos de los proyectos antes mencionados. Actualmente es jefe del laboratorio de hidráulica de la Comisión Federal de Electricidad, CFE.



## Efecto del NaCl sobre una aleación de Al-Si hipoeutética vaciada

### *Effect of NaCl Upon an Al-Si Casting Alloy Hipoeutec*

E.J. Martínez-Delgado

*Instituto Tecnológico de Zacatecas.  
Departamento de Metal-Mecánica, Zacatecas, México.  
E-mail: enriquemartinez\_1999@yahoo.com*

R. Ortega de la Rosa

*Instituto Tecnológico de Zacatecas.  
Departamento de Metal-Mecánica, Zacatecas, México.  
E-mail: rubin\_ortega\_2002@yahoo.com.mx*

M.A. Cisneros-Guerrero

*Instituto Tecnológico de Saltillo.  
Departamento de Metal-Mecánica, Saltillo, Coahuila, México.  
E-mail: cisneros@its.mx*

S. Haro-Rodríguez

*Universidad Autónoma de Zacatecas.  
Maestría en procesos y materiales, Zacatecas Zac. México.  
E-mail: haros907@hotmail.com*

(Recibido: agosto de 2007; aceptado: marzo de 2008)

#### **Resumen**

Este trabajo comprende el estudio del efecto del NaCl tipo Halita sobre la morfología del Si eutético y la porosidad en una aleación fundida Al-Si hipoeutética. La fusión se llevó a cabo en dos hornos, el primero a combustión con gas LP en crisol de grafito con la finalidad de incrementar el contenido de Si en la aleación de 0.13 a 5% en peso, utilizando silicio metálico con una pureza de 99.35%, y el segundo de resistencias eléctricas en el mismo tipo de crisol para controlar la temperatura a 750°C. El material fundido fue vaciado en moldes de arena. La sal se añadió al baño metálico a 0.5, 1.5 y 2.5% en peso, respectivamente, pulverizada y precalentada a 150°C durante 60 min, mediante dos técnicas, 1) insuflación mediante gas argón y 2) por gravedad. Las muestras obtenidas fueron analizadas metalográficamente evidenciando un cambio morfológico del Si eutético, las muestras con 1.5 y 2.5% de sal agregada por gravedad presentaron más este efecto. También se encontró desgasificación del baño metálico al aplicar la sal común sobre las muestras, los mejores resultados se observaron en las muestras con 1.5% en peso de sal. Finalmente, mediante Microscopía Electrónica de Barrido, se caracterizaron los precipitados presentes en las muestras.

**Descriptores:** Aluminio, porosidad, modificación, sodio, solidificación, Al-Si hipoeutético.

#### **Abstract**

*This work, comprehends the study about the effect of NaCl kind Halite upon the morphology of eutectic Silicon and porosity in a cast hypoeutectic Al-Si alloy. The melting was*

carried out in two furnaces, the first to combustion of LP gas in graphite crucible to increase the content of Si in the alloy from 0.13 to 5% wt using metallic silicon with a purity of 99.35% wt, and the second of electric resistances in the same kind of crucible to control the temperature at 750° C. The melting material was casting into molds of sand shell. To add the salt into the metallic bath, two techniques were used; one with injection by means of Argon gas and the other one by gravity, in both cases three quantities of salt were used, 0.5, 1.5 and 2.5% wt respectively, powdered and preheated at 150° C during 60 min. The obtained samples were analyzed metallographily evidencing the modification of the eutectic Si, presenting the best results the samples with 1.5 & 2.5% wt of salt added by gravity. Too was obtained effect of Salt upon the degassing of bath metallic, where the samples with 1.5% wt presented the best results. Finally, by means of Scanning Electron Microscopy, the precipitates present were characterized in the samples.

**Keywords:** Aluminium, porosity, modification, sodium, solidification, Al-Si alloy.

## Introducción

Las aleaciones de Aluminio vaciado, constituyen en términos de tonelaje, el segundo grupo más grande de consumo de metales después de las aleaciones de fierro vaciado (Modern Casting, 2003) y en particular, las tipo Al-Si son ampliamente utilizadas en la industria automotriz, estructuras aeroespaciales y aplicaciones militares, debido a sus buenas propiedades mecánicas, bajo peso, buena soldabilidad, buena conductibilidad térmica, relativamente alta resistencia a alta temperatura, excelente resistencia a la corrosión, así como excelente fluidez al vaciado (Haque *et al.*, 1998). El hidrógeno es el único gas que tiene una solubilidad apreciable en el aluminio y sus aleaciones, su solubilidad varía directamente con la temperatura y la raíz cuadrada de la presión. En el punto de fusión del aluminio puro, hay un incremento de solubilidad de hidrógeno de 0.68 ml/100 g de aluminio, al transformar del estado sólido (0.02 ml/100 g de Al) al estado líquido (0.7 ml/100 g de Al).

En el estado líquido, también se observa una fuerte dependencia con la temperatura. En la solidificación, casi todo el hidrógeno disuelto en el líquido es rechazado por el enfriamiento del sólido; también se ha reportado (Gruzleski *et al.*, 1990) que la porosidad se debe a dos factores, por el efecto de burbujas de hidrógeno y por contracción (rechupes). Debido a la evolución de las microestructuras durante el proceso de solidificación, la microestructura no solamente determina las propiedades mecánicas, sino que también define los límites del diseño de vaciado, la colabilidad de la aleación y la susceptibilidad a la formación de defectos (Zindel *et al.*, 2001). La forma del Si eutéctico juega un papel muy importante en las propiedades mecánicas de las

aleaciones Al-Si, particularmente en su resistencia a la elongación, incrementando su ductilidad mediante el refinamiento estructural del silicio eutéctico, cuya fase es inherentemente frágil; sin embargo, su morfología se modifica de placas aciculares gruesas a una estructura fibrosa (similar a una alga marina) o laminar fina, mediante la adición de pequeñas cantidades de los elementos de la familia IA, IIA y tierras raras de la tabla periódica, o bien, con velocidades de enfriamiento altas (Gruzleski *et al.*, 1990), (Backerud *et al.*, 1990). El estroncio, sodio y antimonio son los tres elementos modificadores más utilizados comercialmente para tratar las aleaciones fundidas de Al-Si (Gruzleski *et al.*, 1990), K. Nogita y colaboradores (2001) han reportado la modificación del eutéctico Al-Si con Ba, Ca, Y y Yd, proponiendo sus mecanismos de solidificación.

Desafortunadamente, estudios recientes han demostrado que la modificación está asociada con efectos negativos tales como porosidad, agrietamiento y pobre acabado superficial (Gruzleski *et al.*, 1990), (Knuutinen *et al.*, 2001). A.K. Dahle y colaboradores (2005), reportaron que el Sr es más potente su efecto modificador en el cambio morfológico del Si eutéctico que el Sb. También se ha reportado el uso de la combinación de elementos modificantes; sin embargo, se encontró que el Na y el Sr reaccionan con el Sb, formando una serie de precipitados en el material fundido (Gruzleski *et al.*, 1990). L. Lu y colaboradores (2005), reportan en su trabajo que el efecto de la adición combinada del Na y Sr, es prácticamente el mismo que el del Na al inicio, es decir, el cambio morfológico obtenido en ambos casos (Sr-Na y Na) fue el mismo; no obstante, ellos encontraron que después de un tiempo de mantenimiento a 730 °C hay una interacción negativa entre estos dos

modificadores, lo cual, según ellos se debe a una pérdida por evaporación de estos elementos; así tenemos que, de todos los elementos modificadores, el sodio es el más poderoso, produciendo estructuras modificadas más uniformes a más bajas concentraciones que las que se producen con los demás; sin embargo, debido a que es un elemento muy reactivo, se ha limitado su uso en la industria debido a que se ha reportado que esta fuerte reacción origina absorción de hidrógeno de atmósfera. L. Bäckerud y colaboradores (1990), reportan que después de dos fundiciones, la acción modificadora del sodio prácticamente desaparece, lo cual no ha sido observado respecto al estroncio.

El propósito de este trabajo es estudiar el efecto del NaCl (sal común), sobre la morfología del silicio eutéctico y porosidad en una aleación Al-Si hipoeutéctica, normalmente este material se usa en la industria de la fundición de aleaciones de aluminio como fundente, sin conocer si existe alguna interacción de este material con la aleación de aluminio. También este estudio puede servir como una propuesta de una diferente fuente de elemento modificador, ya que en la actualidad sólo se ha reportado la modificación del Si eutéctico usando elementos puros o aleaciones maestras entre estos elementos y el aluminio y muy pocas ocasiones fundentes como fluoruro de Na (Lu *et al.*, 2005).

## Desarrollo experimental

### a) Estudio del NaCl utilizado

La sal utilizada en este trabajo fue obtenida de yacimientos minerales de la región de Villa de Cos Zacatecas México, cuyo diámetro promedio de partícula ( $d_{80}$ ) fue de 2.8 mm, este material se pulverizó manualmente en un mortero de laboratorio, obteniéndose mediante análisis granulométrico un  $d_{80}$  de 0.5 mm, posteriormente se realizó un análisis de determinación de humedad, tomando una muestra representativa de 20 g. mediante el método de cuarteos tanto pulverizada como en grano, ambas muestras fueron calentadas en una mufla (horno de resistencias eléctricas) a 150 °C durante 60 minutos y por diferencia de pesos se determinó la cantidad de humedad desprendida, 24.1 y 3.25 % respectivamente, lo que implica que la sal pulverizada tuvo una mayor área superficial, facilitando el desprendimiento de humedad.

Finalmente, para calcular la cantidad de sal necesaria se determinó su composición mediante análisis químico por vía húmeda (volumetría) y difracción de rayos x, obteniéndose una pureza de NaCl de 99.547.

### b) Obtención de muestras para estudio

La aleación base para el presente estudio fue obtenida a partir de chatarra de aluminio de cancelería. La fundición se llevó a cabo en dos etapas, en la primera etapa se utilizó un horno con combustión de gas LP y aire insuflado con crisol de grafito de 30 Kg, en donde se incrementó el contenido de Si de 0.134 a 5% en peso (considerando otros trabajos reportados en la literatura, (Gruzleski *et al.*, 1990), (Backerud *et al.*, 1990), (Nogita *et al.*, 2001), añadiendo al baño fundido Si metálico con una pureza de 99.35 % en peso, para asegurar la disolución del Si, se mantuvo la aleación líquida a 750 °C durante 30 minutos; en la segunda etapa se utilizó un horno eléctrico marca Carbolite modelo GPC 12/200 con pequeños crisoles de grafito de 3 Kg únicamente para mantener la temperatura a 750 °C. Tanto la aleación de chatarra fundida como la aleación base Al-Si, fueron analizadas mediante espectrometría de emisión por chispa. Considerando previos estudios (Martínez *et al.*, 2004) y sistemas de desgasificación reportados en la literatura (Zalensas, 1993), la sal fue añadida al baño metálico mediante dos técnicas:

- 1) insuflada con gas inerte (argón) y
- 2) por gravedad.

Con la finalidad de asegurar la mejor interacción entre los granos sólidos de NaCl y el baño metálico; en ambos casos se manejaron tres cantidades de sal, 0.5, 1.5 y 2.5% en peso, respectivamente, pulverizada y precalentada a 150° C durante 60 min.

La aleación fundida y tratada con NaCl, fue vaciada en moldes de arena obtenidos mediante el proceso shell (figura 1a), cuyo diseño fue de tal manera para evitar impurezas e interacciones en las zonas de estudio de donde se obtuvieron las muestras para su análisis. La tabla 1 muestra la nomenclatura utilizada.

### c) Análisis microestructural

Una vez cortadas las muestras (figura 1b), éstas fueron preparadas metalográficamente mediante desbaste en lijas de SiC marca Buehler y pulidas en discos de paño de poliéster con pelo y pasta de alúmina de 5 y 1  $\mu\text{m}$  sin ataque químico, las cuales fueron observadas en un microscopio óptico metalográfico de platina invertida marca Iroscope, así mismo se hicieron mediciones de espaciamiento dendrítico secundario promedio (DAS) a cada muestra y su respectivo análisis cuantitativo de porosidad (área ocupada por los poros entre el área total

de la fotomicrografía), mediante un analizador de imágenes (Sigma Scan Pro 5). Para analizar químicamente los precipitados presentes, se utilizó un microscopio electrónico de barrido (MEB) marca FEI modelo QUANTA 200 con EDX Oxford Instruments. La tabla 1 muestra la nomenclatura utilizada en las muestras.

Tabla 1. Nomenclatura utilizada en las muestras

Modo de aplicación	% en peso de Sal		
	0.5	1.5	2.5
Inyección con argón	A5	A15	A25
Por gravedad	G5	G15	G25

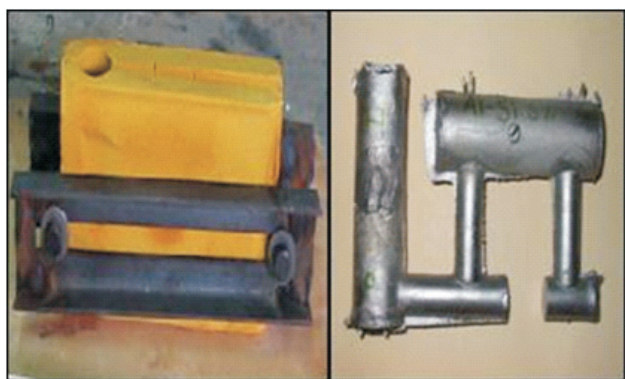


Figura 1. Fotografías mostrando, a) Molde de arena shell y b) Sección de donde se cortaron las muestras

#### d) Medición del ángulo de contacto entre el NaCl y la aleación de aluminio líquido

Con la finalidad de estimar cualitativamente la interacción del NaCl sólido en la aleación de aluminio líquida, se colocó dentro del horno eléctrico (marca Carbolite modelo GPC 12/200) a 750 °C durante 60 minutos, una briqueta sólida de NaCl de 5 cm de diámetro y 0.5 mm de espesor (la cual se preparó con sal pulverizada y seca) y un cubo de 1 cm<sup>3</sup> de aleación de Al-Si (colocado arriba de la briqueta), una vez fundida la aleación Al-Si, se obtuvo una gota líquida sobre el NaCl sólido, tomándose fotografías con una cámara digital marca Sony tipo cyber shot P32, las cuales se analizaron con un software de imágenes Sigma Scan Pro 5, obteniéndose un ángulo de contacto de 75°, que de acuerdo a la teoría de nucleación (Kurtz, 1986) implica que hay mojabilidad limitada de la sal en la aleación Al-Si.

## Resultados y discusión

### 1) Estudio del NaCl utilizado

La tabla 2 muestra los resultados obtenidos del análisis químico de la sal utilizada.

Tabla 2. Reporte del análisis químico de la sal en porcentaje en peso

NaCl	Ion Sulfato	Ion Mg	Ion Ca	Ion Cl	Insolubles
99.547	0.035	0.218	0.067	60.39	0.073

La figura 2 muestra los resultados obtenidos en el análisis de difracción de rayos x, que de acuerdo a un análisis matemático mediante la ecuación (1) deducida de la ley de Bragg y la distancia interplanar, se obtiene que el primer pico (31.5°) corresponde al plano (100), el segundo pico (45.3°) al plano (110) y finalmente el pico más pequeño (66.1°) al plano (200), entonces, de acuerdo a la literatura (Cullity, 1978) se trata de una muestra de NaCl, el cual forma una red cúbica simple que también puede ser considerada como cúbica de caras centradas, lo cual nuevamente confirma la pureza de la sal utilizada respecto al NaCl.

$$d_{hkl} = \frac{a_0}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \quad (1)$$

Tomando en cuenta la pureza del NaCl obtenida de la tabla 2, se calculó la cantidad teórica necesaria de sal para desgasificar la aleación, considerando la ecuación (2) propuesta por John E. Gruzleski y colaboradores (1990); y suponiendo que todo el cloro del NaCl reacciona con el hidrógeno del baño metálico, lo cual dio como resultado 0.33 % en peso de sal para eliminar la totalidad del hidrógeno en la aleación líquida. En base a este cálculo se establecieron los parámetros experimentales de la adición de sal.

$$\log_{10} S = \frac{-2550}{T} + 2.62, \quad (2)$$

donde S es la solubilidad en mm de hidrógeno a temperatura estándar y presión de 100 g. de aluminio; T es la temperatura expresada en grados Kelvin.

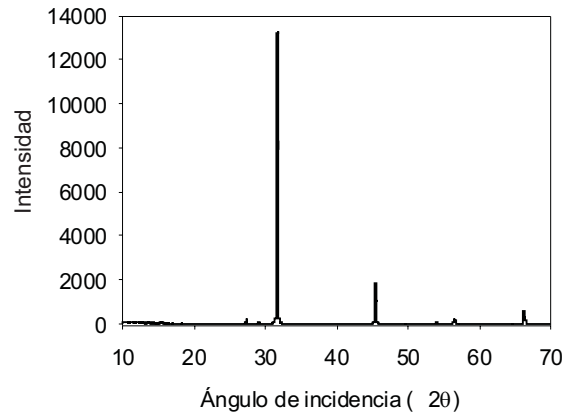


Figura 2. Diffractograma correspondiente a la sal utilizada en este trabajo.

Tabla 3. Composición química (% en peso) de la chatarra fundida y aleación Al-Si

Aleación	Si	Fe	Cu	Mg	Zn	Mn	Sr	Ti
Chatarra fundida	0.134	0.416	0.013	0.005	0.006	0.015	0.0006	0.005
Aleación Al-Si	5.12	0.519	0.044	0.243	0.014	0.010	0.0009	0.012

## 2) Muestras para estudio

La tabla 3, muestra la composición química de la chatarra de aluminio y de la aleación base Al-Si respectivamente, obtenidas mediante espectrometría de emisión por chispa, también se puede observar que el aumento de silicio fue de acuerdo a lo esperado (5% en peso), así mismo se puede apreciar que también hubo un incremento considerable de Mg en la aleación, esto se debió sin duda alguna a la interacción de la sal con el baño metálico, ya que no hay otra fuente posible de Mg detectada en estos experimentos, este metal contribuye al incremento en dureza y resistencia en las aleaciones Al-Si, debido a que la solubilidad del  $Mg_2Si$  es dependiente de la temperatura (Totten *et al.*, 2003); otro aspecto interesante es que el estroncio permaneció prácticamente constante, ya que se incrementó tan solo 3 ppm, lo cual, de acuerdo a la literatura (Gruzleski, 1990), (Zalensas, 1993), no tiene efecto sobre la modificación del silicio eutéctico.

## 3) Análisis microestructural

### 3.1 Modificación del Si eutéctico y fases presentes

La figura 3 presenta las fotomicrografías de las muestras correspondientes a la chatarra fundida y

aleación base Al-Si. En la figura 3b se puede apreciar que tiene mayor cantidad de silicio eutéctico con morfología acicular en la escala #1 según lo reportado en la literatura respecto al rango total de microestructuras observadas en una aleación de aluminio hipoeutéctica modificada (Gruzleski, 1990), (Zalensas, 1993), debido al incremento de su contenido en la aleación Al-Si. Otra diferencia interesante que se puede apreciar en esta figura es en el tamaño de grano, siendo más grande en la muestra de chatarra fundida, cuyo espaciado dendrítico secundario promedio (DAS) fue de  $129.49 \mu m$ , debido a que contiene muy poco silicio y como no se utilizó refinador de grano, no presentó muchos sitios favorables para la nucleación (Kurtz, 1986); en contraste, en la muestra de la aleación base Al-Si se observó un grano un poco más fino con un DAS de 127.7 micras, fenómeno que se debió al efecto del silicio en la aleación, el cual incrementó la fase eutéctica de este elemento, ocasionando una disminución en el tamaño de grano dendrítico de la fase primaria  $\alpha-Al$  a diferencia de la muestra de chatarra fundida, cuyas dendritas crecieron libremente, esto significa que la nucleación y crecimiento del eutéctico de silicio, en este caso, se dan en las puntas de las dendritas de  $\alpha-Al$ , lo que está en acuerdo a lo reportado por A.K. Dahle y colaboradores (2001).



Figura 3. Fotomicrografía de la chatarra fundida (a) y de la aleación Al-Si (b)

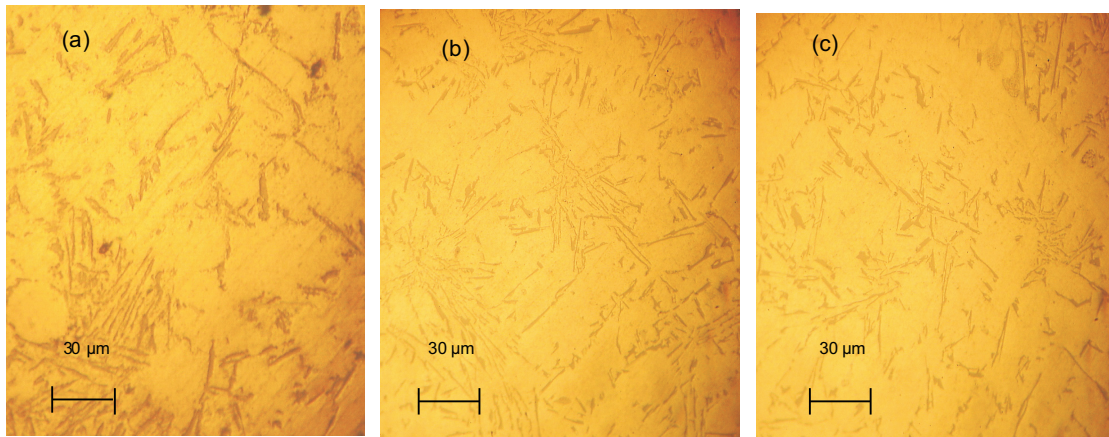


Figura 4. Fotomicrografías de las muestras A5 (a), A15 (b) y A25 (c)

En la figura 4 se presentan las correspondientes fotomicrografías de las muestras A5, A15 y A25, las cuales no exhibieron ninguna modificación en la morfología del silicio eutéctico, debido a que el argón presentó un efecto desfavorable a la modificación del silicio eutéctico, porque el Na es muy volátil (Backerud *et al.*, 1990) y fue arrastrado por el gas inerte, lo cual de alguna manera está en acuerdo con la teoría propuesta por L. Lu y colaboradores (2005), ya que ellos proponen que el desvanecimiento de los elementos modificadores se debe a su evaporación; sin embargo, este efecto aún no es claro.

La figura 5 muestra las fotomicrografías de las muestras G5, G15 y G25. Comparando estas fotomicrografías con las de la figura 3, se observa un tamaño de grano más fino, debido al efecto refinador de los granos sólidos del NaCl, los cuales actúan como sitios de nucleación (Kurtz, 1986). La muestra G5 presentó una leve modificación de la morfología del silicio eutéctico, que

de acuerdo al rango total de microestructuras reportadas en la literatura (Gruzleski *et al.*, 1990), (Zalensas, 1993) corresponde a una estructura de laminar a submodificada (#2 a #3), con un tamaño de grano pequeño (DAS de 76.74 µm), mientras que la muestra G15 presentó una estructura submodificada (#3 a #4) de acuerdo a la escala de modificación (Gruzleski *et al.*, 1990), (Zalensas, 1993), con un DAS promedio de 84.0 µm, debido a la mayor cantidad de sal utilizada. En la muestra G25 se observó una morfología del Si eutéctico de submodificada a bien modificada de acuerdo a la literatura (Gruzleski *et al.*, 1990), (Zalensas, 1993), con un espaciado dendrítico secundario de 64.6 µm.

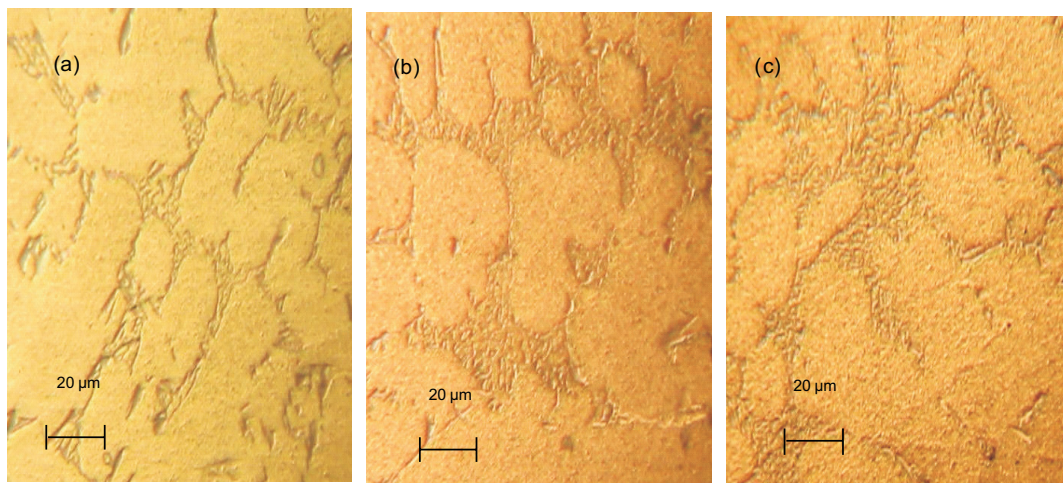


Figura 5. Fotomicrografías de las muestras G5 (a), G15 (b) y G25 (c)

Considerando la cantidad estequiométrica de Na contenida en la sal utilizada y agregada al baño metálico, esto es: 1956, 5868 y 9780 ppm de sodio al agregar 0.5, 1.5 y 2.5% en peso de NaCl, respectivamente, estas cantidades están muy por arriba de lo reportado en la literatura (de 100 a 200 ppm) para tener una buena modificación de la morfología del Si eutéctico (Zindel *et al.*, 2001), (Zalensas, 1993). No se obtuvieron buenos resultados de la modificación morfológica del Si eutéctico a pesar de tener teóricamente un exceso de Na en el sistema, debido a la limitada disolución del NaCl en la aleación líquida, lo cual se comprobó en forma cualitativa mediante los experimentos de la interacción entre la briqueta de NaCl sólido y la gota líquida de aleación de Al-Si, obteniéndose un ángulo de contacto grande ( $75^\circ$ ), el cual fue determinado bajo las mismas condiciones experimentales de las aleaciones fundidas tratadas con NaCl, y de acuerdo a la teoría de nucleación heterogénea y la ecuación (3) (Kurtz, 1986) implica que hay movilidad limitada de la sal en la aleación Al-Si, debido a una elevada tensión superficial entre ambos, lo que debería de ser estudiado con más profundidad, ya que de lograr la total disociación del NaCl en el aluminio líquido, se contaría con un material muy económico y eficaz en el tratamiento del aluminio líquido para el mejoramiento de sus propiedades mecánicas.

$$\Delta F_{Tot} = \frac{4\pi r^3}{3} = \Delta F_V + 4\pi r^2 \gamma, \quad (3)$$

donde  $\Delta F_{Tot}$  es el cambio de energía libre de Gibbs relacionada a la formación de una nueva fase,  $r$  es el radio de la nueva partícula,  $\Delta F_V$  es el cambio de energía libre

debida a la formación del núcleo de unidad de volumen y  $\gamma$  es la energía de superficie por unidad de área.

Los resultados obtenidos del análisis de microscopía electrónica de barrido indicaron la presencia de cinco fases muy parecidas a las reportadas por F.H. Samuel *et al.* (1996), así como por E.J. Martínez D. *et al.* (2005), cuya discrepancia fue en su relación atómica, debido a la diferencia en composición química; sin embargo, en cuanto a morfología y distribución fue prácticamente la misma. La tabla 4, reporta el análisis de los espectros señalados en la figura 6, obtenida del análisis químico puntual mediante EDX con microscopía electrónica de barrido (MEB) de la muestra G15 y mapeo químico de la muestra G5.

La figura 7 muestra las fotomicrografías obtenidas del mapeo químico de la muestra G5, usando EDX en el MEB, en la cual se puede apreciar la distribución de los elementos en las fases estudiadas, donde las zonas brillantes indican la riqueza del elemento en cuestión.

Durante el análisis por microscopía óptica y electrónica se observaron cinco fases en todas las muestras. Las fases ricas en Cu se presentaron con morfología tipo "Blocky" o masiva enriquecidas con Mg, debido al bajo contenido de Cu y alto contenido de Mg (tabla 3), favoreciendo su formación hacia las zonas interdendríticas; se pudo apreciar que esta fase se presentó en más abundancia en las muestras G15 y G25, debido a que se favorece en presencia de elementos modificantes, lo cual está de acuerdo con lo reportado por Samuel (1996) y Martínez (2005) la fase rica en cobre con morfología de eutéctico fino no se observó en estas muestras debido a su bajo contenido de este elemento en la aleación.

Tabla 4. Análisis químico de los espectros señalados en la figura 6, obtenidos del MEB mediante EDX

Espectro	Elemento (% at)					Tipo de fase
	Mg	Al	Si	Fe	Cu	
1		97.96	1.11		0.93	$\alpha$ Al
2	36.59	29.34	25.56		8.51	$Al_5Mg_8Cu_2Si_6$
3	7.74	80.28	3.75		8.23	$Al_2Cu$ (rica en Mg)

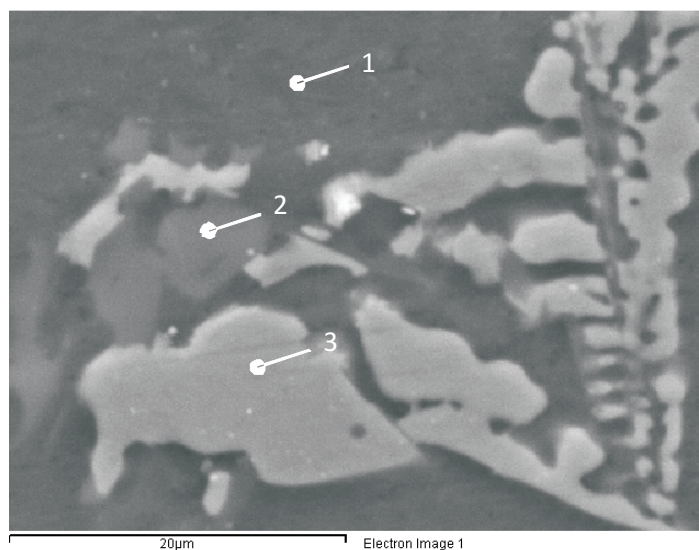


Figura 6. Fotomicrografía de la muestra G15, mediante EDX, mostrando fases ricas en Fe, Cu y Mg

También se observaron fases en forma de agujas, las cuales corresponden a la fase rica en hierro  $\beta$ - $Al_5FeSi$  (Dahle *et al.*, 2001), (Samuel *et al.*, 1996), de acuerdo a la literatura existe otra fase rica en Fe en forma de escritura china,  $\alpha$ - $Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2$ ; sin embargo, en este estudio no se observaron, esto se debe al bajo contenido de Mn, ya que éste favorece la formación de este tipo de fase (Samuel *et al.*, 1996). Las fases ricas en silicio, corresponden al eutéctico principal, el cual se obtuvo con morfología acicular en ausencia de modificación y en forma de alga marina (Backerud *et al.*, 1990) o estructura fibrosa cuando sufrió modificación con el Na proveniente del NaCl. Finalmente, se pudo observar la presencia de la fase rica en Magnesio  $Al_5Mg_8Cu_2Si_6$ , la cual está asociada a las fases ricas en Cu con morfología masiva y las agujas de fases ricas Fe, lo cual corresponde a la reacción de precipitación multifásica ( $l \rightarrow \alpha Al +$

$Al_2Cu + Si + Al_5Mg_8Cu_2Si_6$ ) que tiene lugar al final de la solidificación, reportado por E.J. Martínez *et al.* (2005).

### 3.2 Porosidad

La figura 8 muestra los resultados obtenidos del análisis de porosidad (% en peso), para cada muestra en ambos métodos de aplicación de la sal al baño metálico (con Ar y por gravedad). La muestra con menor porcentaje de porosidad fue la A25, debido por un lado al efecto del NaCl y por el otro, considerando la ley de Sievert (ecuación (4)), el gas argón favorece la desgasificación disminuyendo la presión metalostática del baño metálico y con ello, disminuye la presión interna del sistema favoreciendo la salida del cualquier material gaseoso y por esta razón, la porosidad disminuye con el aumento en el



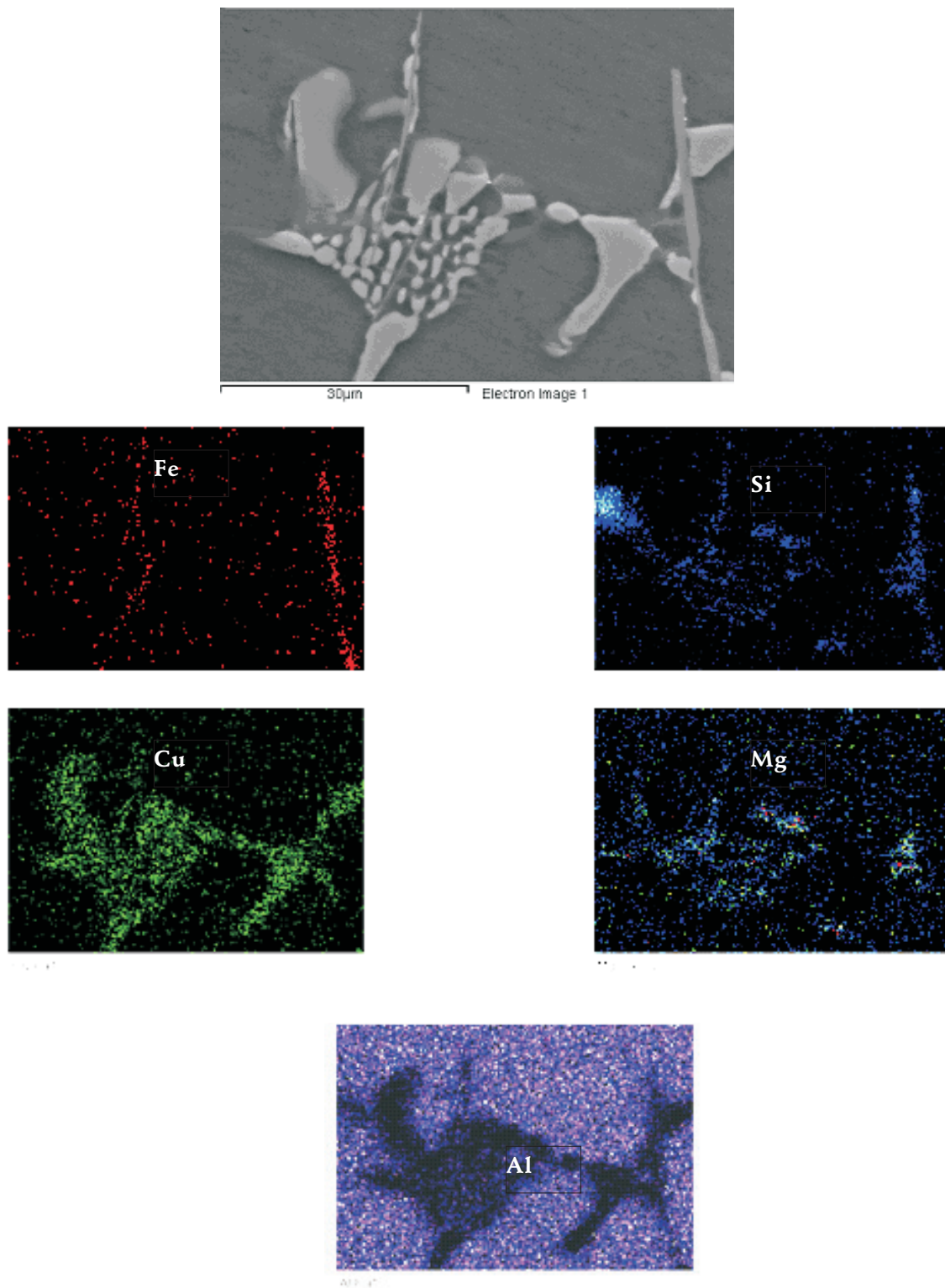


Figura 7. Resultado del mapeo químico obtenido de la muestra G5, mediante EDX en MEB

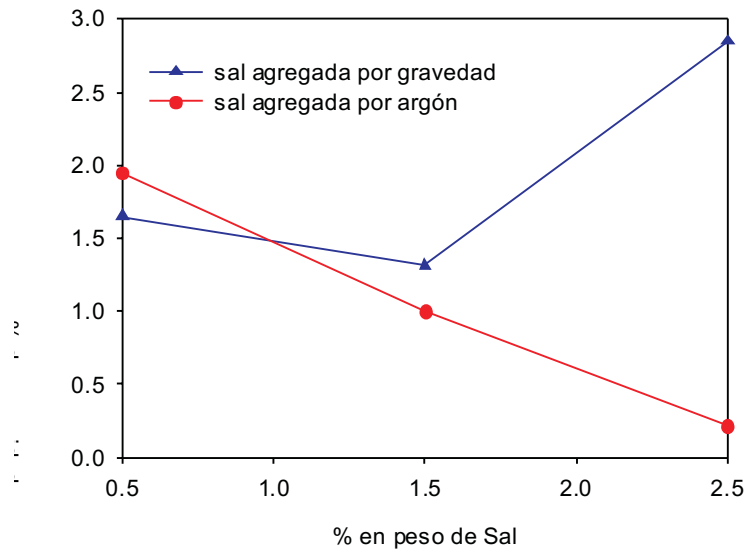


Figura 8. Gráfica de la distribución de porosidad estimada en las muestras estudiadas

porcentaje de sal en el caso de insuflación con Ar en todos los casos. Por otro lado, para la aplicación del NaCl por gravedad, la muestra G15 fue en la que se obtuvo mayor solidez; sin embargo, con adiciones mayores al 1.5% en peso de sal (a diferencia del agregado de la sal por argón), la porosidad se incrementa, este fenómeno también debería de estudiarse con más profundidad.

$$c = SP^{\frac{1}{2}}, \quad (4)$$

donde  $c$  es la concentración de Hidrógeno disuelto en equilibrio con el hidrógeno gaseoso a una presión  $P$ , y  $S$  es el parámetro de Sievert.

### Conclusiones

- Mediante la técnica por gravedad, el NaCl presentó un efecto modificador del Si eutéctico en ausencia de cualquier modificador, el grado de modificación permanece constante más allá del 1.5 % en peso de sal agregada.
- La técnica de insuflación del NaCl mediante gas argón desfavoreció el efecto modificador del Na sobre el Si eutéctico, debido a la disminución de la presión metalostática de la aleación líquida por la presión del mismo argón.
- El NaCl presentó un efecto desgasificante en la aleación de aluminio estudiada en ambas técnicas de aplicación, por gravedad y por insuflación con argón.

- No se presentó sobre modificación del Si eutéctico si consideramos el exceso de Na en el baño metálico, debido a la limitada mojabilidad del NaCl sólido en el aluminio líquido.

### Agradecimientos

Agradecemos, al COSNET su apoyo para el financiamiento de este trabajo. Al CINVESTAV unidad Saltillo por facilitar sus laboratorios. Al Instituto Tecnológico de Saltillo por facilitar su microscopio electrónico de barrido. Al Instituto Tecnológico de Zacatecas donde se desarrolló el proyecto.

### Referencias

- Backerud L., Chai G., Tamminen J. Solidification Characteristics of Aluminum Alloys. *AFS/SKANALUMINIUM*. 2:71-229. 1990.
- Dahle A.K., Nogita K., Zinder J.W., McDonald S.D., Hogan L.M. Eutectic Nucleation and Growth in Hypereutectic Al-Si Alloys at Different Strontium Levels. *Metallurgical and Materials Transaction, A* 32:949-960. 2001.
- Dahle A.K., Nogita K., McDonald S.D., Dinnis C., Lu L. Eutectic Modification and Microstructure Development in Al-Si Alloys. *Materials Science and Engineering, A* 413-414:243-248. 2005.
- Gruzleski J.E., Closset B. *The Treatment of Liquid Aluminum-Silicon Alloys*. American Foundrymen's Society. Inc. Des Plaines, Illinois, USA. 1990.

- Haque M.M., Maleque M.A. Effect of Process Variables on Structure and Properties of Aluminum-Silicon Piston Alloy. *Journal of Materials Processing Technology*. 77:122-128. 1998.
- Knuutinen A., Nogita K., McDonald S.D., Dahle A.K. Porosity Formation in Aluminum Alloy A356 Modified with Ba, Ca, Y and Yb. *Journal of Light Metals*. Elsevier Science. 1(4):241-249. Noviembre 2001.
- Kurtz W. *Fundamentals of Solidification*. Second Edition. Netherlands. Trans Tech Publications. 1986.
- Lu L., Nogita K., Dahle A.K. Combining Sr and Na Additions in Hypoeutectic Al-Si Foundry Alloys. *Materials Science and Engineering*. A 399:244-253. 2005.
- Martínez D.E.J. y Ramos C.R.A. Estudio del efecto de la sal común en la porosidad de una aleación de aluminio hipoeutéctica de bajo silicio. Memorias del 26 Congreso Internacional de Metalurgia y Materiales. Instituto Tecnológico de Saltillo, pp. 448-449, 2004.
- Martínez D.E.J. Cisneros G.M.A., Valtierra S., Lacaze J. Effect of Strontium and Cooling Rate Upon Eutectic Temperatures of A319 Aluminum Alloy. *Scripta Materialia*, 52:439-443. 2005.
- Modern Casting. *Know your Competition... 37th Census of World Casting Production - 2002*. Modern Casting Staff Report. Modern Casting. Diciembre 2003. Pp. 23-25.
- Nogita K., Knuutinen A., McDonald S.D., Dahle A.K. Mechanism of Eutectic Solidification in Al-Si Alloys modified with Ba, Ca, Y and Yd. *Journal of Light Metals*. 1:219-228. 2001.
- Samuel F.H., Doty H.W. Factors Controlling the Type and Morphology of Cu-Containing Phases in 319 Al Alloy. *AFS Transactions*, 104:893-901. 1996.
- Totten G.E., Mackenzie D.S. *Handbook of Aluminium Physical Metallurgy and Process*. Vol 1. Merce Kerker Inc. 2003. Pp 591-642.
- Zalensas D.L. *Aluminum Casting Technology*. USA. 2nd edition. AFS. 1993.
- Cullity B.D. *Elements of X-RAY DIFFRACTION*. USA. Second edition. Addison-Wesley Publishing Company, INC. 1978. Pp. 86-87.
- Zindel J.W., Dahle A.K. Eutectic Nucleation and Growth in Hypoeutectic Al-Si Alloys at Different Strontium Levels. *Metallurgical and Materials Transactions*. 32A:949-960. 2001.

---

### Semblanza de los autores

*Enrique Javier Martínez-Delgado.* Realizó los estudios de licenciatura en la carrera de ingeniería metalúrgica en el Instituto Tecnológico de Zacatecas, en el año de 1996. Obtuvo el grado de maestro en ciencias en materiales en el Instituto Tecnológico de Saltillo, donde le otorgaron mención honorífica por ser el mejor promedio. El 18 de Noviembre del 2005, obtuvo el grado académico de doctor en ingeniería, cuyo proyecto de investigación fue la solución de un problema industrial de la empresa Nemark S.A. de C.V. del grupo alfa de Monterrey N.L. y un convenio internacional (Ecos-Nord) entre México y Francia, los resultados de su proyecto de investigación fueron publicados en la revista de Scripta Materialia del Sevier y en la revista "Facultad de Ingeniería" de la Universidad de Tarapacá Arica Chile. Fue director del proyecto de investigación financiado por el Cosnet "Análisis del Efecto del NaCl como desgasificante en aleaciones de Al-Si vaciadas", el cual se desarrolló de Septiembre 2004 a Marzo 2006; con ese trabajo dirigió y asesoró a 5 estudiantes de licenciatura. Actualmente es profesor-investigador de tiempo completo del Instituto Tecnológico de Zacatecas y director del proyecto de investigación: "Estudio de las propiedades mecánicas de una aleación de Aluminio desgasificada con NaCl". Candidato a Investigador Nacional en el SNI del CONACYT.

*Rubín Ortega de la Rosa.* Egresado del Instituto Tecnológico de Puebla en el periodo 1981-1985, realizó estudios de doctorado en el Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (2001-2006) desarrollando la tesis sobre "Vida útil de herramientas de corte recubiertas con Multicapas de TiN-TiAlN mediante el proceso de Deposición Física fase Vapor (PVD)", actualmente labora en el Instituto Tecnológico de Zacatecas como profesor-investigador. Su experiencia profesional abarca empresas como: Volkswagen de México, Comisión Federal de Electricidad, Instituto de Investigaciones Eléctricas y otras, ocupando puestos de jefe de conservación, ingeniero de pruebas, becario-investigador y otras, cuenta con un total de 13 publicaciones en revistas nacionales e internacionales.

*Miguel Ángel Cisneros-Guerrero.* Doctor ingeniero en ciencias de los materiales, graduado en el Instituto Nacional Politécnico de Lorena Francia en 1984. Realizó su maestría en ciencias de los materiales en el Instituto Nacional Politécnico de Lorena, Francia en 1981 y obtuvo en 1978 el título como ingeniero metalúrgico en procesos por el Instituto Tecnológico de Saltillo. Ha participado como director en 8 proyectos de investigación financiados por el CONACYT, de igual manera en 2 proyectos de investigación financiados por el Cosnet y 4 más de investigación financiados por el sector productivo. Ha participado como director y asesor de tesis de licenciatura, maestría y doctorado. Tiene más de 32 publicaciones en revistas arbitradas e internacionales. También ha participado en múltiples ocasiones como evaluador de proyectos de investigación en el CONACYT, Cosnet y fondos mixtos. Actualmente tiene la distinción por parte del SNI del CONACYT como Investigador Nivel I (2006-2009). Es profesor investigador de tiempo completo del Instituto Tecnológico de Saltillo.

*Sergio Haro-Rodríguez.* Es ingeniero mecánico por la Universidad Autónoma de Zacatecas (UAZ), graduado en 1983, maestro en metalurgia y ciencias de los materiales con especialidad en soldadura por la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y doctor en ciencia e ingeniería de los materiales por la Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Cuernavaca, Morelos, México. Es profesor investigador titular C en la Universidad Autónoma de Zacatecas, con 22 años de antigüedad. Imparte clases en ingeniería mecánica, programa acreditado por el CACEI, y en la maestría en procesos y materiales. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores desde el año 2001. Fue cofundador y responsable de los programas de especialidad en procesos metalúrgicos de manufactura y de la maestría en procesos y materiales. Es líder del cuerpo académico en procesos y materiales, CA UAZ-66 en vías de consolidación. Autor de diversos trabajos científicos en el campo de la metalurgia física, publicados en revistas como International Journal of Cast Metals, Materials and Engineering A, Materials Research, Materials Chemistry and Physics, entre otras. Sus líneas de investigación son la caracterización, soldadura y tratamientos térmicos de aceros resistentes al calor y de aleaciones de aluminio, propiedades mecánicas de metales y sus aleaciones. Ha dirigido tesis de licenciatura, de especialidad, de maestría y doctorado en diversas instituciones como la UAZ, la Universidad Tecnológica del Estado de Zacatecas, el Instituto Tecnológico de Zacatecas y la Universidad Autónoma de Nuevo León.

# La energía del viento en México: Simulación de un parque eólico y aplicación de análisis probabilístico de seguridad

## *Wind Power in Mexico: Simulation of a Wind Farm and Application of Probabilistic Safety Analysis*

C. Martín del Campo-Márquez  
*Departamento de Sistemas Energéticos,  
Facultad de Ingeniería, UNAM.*  
E-mail: *cecilia.martin.del.campo@gmail.com*

P.F. Nelson-Edelstein  
*Departamento de Sistemas Energéticos,  
Facultad de Ingeniería, UNAM.*  
E-mail: *pnelson\_007@yahoo.com*

M.Á. García-Vázquez  
*Departamento de Sistemas Energéticos,  
Facultad de Ingeniería, UNAM.*  
E-mail: *maiki27@yahoo.com*

(Recibido: agosto de 2007; aceptado: marzo de 2008)

### **Resumen**

Se presentan los aspectos más importantes referentes a la energía eólica en México, su potencial de aprovechamiento y los proyectos planeados. Se comparan sus costos de generación eléctrica con los de otras fuentes de energía. Se presentan los resultados de la simulación con el programa WindPro, de un parque eólico de 100 MW localizado en el Istmo de Tehuantepec. Asimismo, se analizan algunos de los impactos ambientales relacionados con la instalación de parques eólicos en la zona mencionada. Finalmente, se discuten las ventajas que pueden aportar los análisis probabilísticos de seguridad para evaluar los riesgos asociados a eventos que pudieran ocurrir en los parques eólicos, siendo los resultados de este análisis de utilidad para el diseño y mantenimiento de los parques y de los propios aerogeneradores. Específicamente se desarrolló un árbol de eventos con el fin de analizar los posibles escenarios que podrían producirse cuando la velocidad del viento es demasiado alta. También, se desarrollaron árboles de fallas para cada uno de los sistemas de mitigación para determinar la importancia relativa en las secuencias de falla de cada uno de los componentes del aerogenerador, con el objetivo de comprobar la rentabilidad de las mejoras y la optimización del mantenimiento.

**Descriptor:** Energía del viento, simulación de un parque eólico, análisis probabilístico de seguridad.

### **Abstract**

*The most important aspects of wind energy in Mexico, including the potential for generating electricity and the major projects planned are presented here. In particular, the generation costs are compared to those of other energy sources. The results from the simulation of a 100 MW wind farm in the Tehuantepec Isthmus are also presented. In addition, the*

*environmental impacts related to the wind farm in the mentioned zone are analyzed. Finally, some benefits of using Probabilistic Safety Analysis are discussed with respect to evaluating the risks associated with events that can occur in wind parks, being especially useful for design and maintenance of the parks and the wind turbines themselves. In particular, an event tree was developed to analyze possible accident sequences that could occur when the wind speed is too great. Also, fault trees were developed for each mitigating system considered, in order to determine the relative importance of the wind generator components to the failure sequences, in order to evaluate the yield of suggested improvements and the optimization of maintenance programs.*

**Keywords:** *Wind power, wind farm simulation, probabilistic safety analysis.*

### Introducción

Los costos de generación eléctrica han sido el dato principal para la selección de plantas de generación eléctrica. Recientemente, en los países más desarrollados ya se consideran también los recursos disponibles y los impactos a la salud y al medio ambiente en la toma de decisiones. Ahora es recomendable realizar análisis de sustentabilidad de las diferentes opciones de generación eléctrica para definir las políticas de planeación de la expansión eléctrica.

Los procesos convencionales para generar electricidad que se basan en la quema de combustibles fósiles (principalmente carbón y combustóleo), emiten cantidades importantes de gases de efecto invernadero (GEI) y otros contaminantes atmosféricos. El tema del calentamiento global y sus consecuentes cambios climáticos,

ha motivado a buscar tecnologías energéticas no convencionales que emitan cantidades reducidas de GEI. La energía eólica, por tratarse de una energía prácticamente libre de emisiones de GEI, puede contribuir a mitigar el cambio climático, además de diversificar las fuentes de generación de energía eléctrica.

Dentro de las energías renovables, en los últimos años, la energía eólica ha tenido un crecimiento sumamente dinámico a nivel mundial (figura 1), con un crecimiento del 32% en el año 2006, (Global Wind Energy Council, 2007).

Aunque la participación de la eolelectricidad es todavía inferior al 1% de la producción eléctrica mundial, más de 70 países tienen ya instalaciones eólicas y planes de crecimiento. La tabla 1 lista los cinco países en el mundo con la mayor capacidad eólica instalada, (Global Wind Energy Council, 2007).

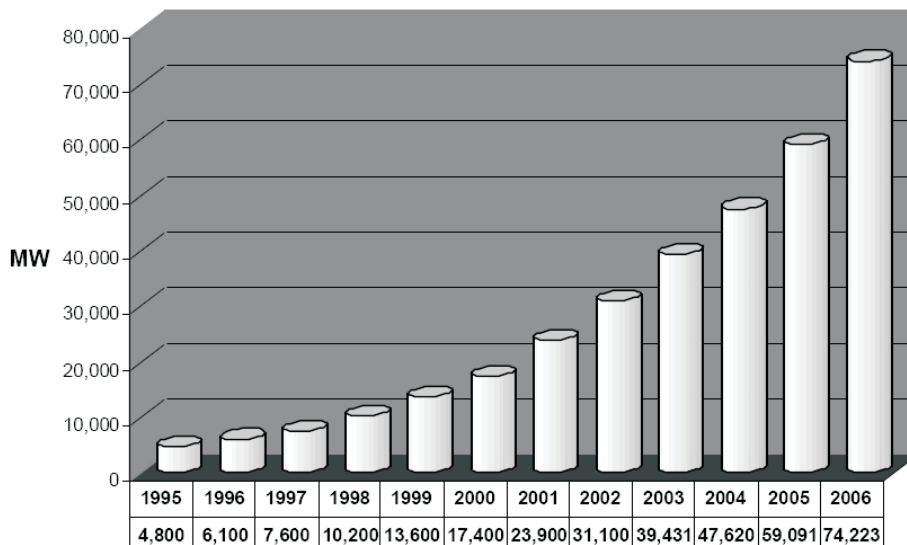


Figura 1. Capacidad Instalada Mundial – Energía Eólica en MW

## La energía eólica en México

La Comisión Federal de Electricidad (CFE) ha dado a conocer información sobre el potencial eólico estimado en la República Mexicana<sup>1</sup>, el cual se muestra en la tabla 2. Los sitios más estudiados y con el mayor potencial son el Istmo de Tehuantepec y la Península de Baja California.

En 1994, México puso en marcha su primer parque eólico localizado en el ejido de La Venta, en el Istmo de Tehuantepec, Oaxaca. El parque eólico La Venta, construido como proyecto prototipo, fue el primero en su tipo en nuestro país y en América Latina y cuenta con siete aerogeneradores de 225 kW, que han operado con un factor de planta de alrededor de 40%.

En enero de 2007, entró en operación comercial el segundo parque eólico, La Venta II, localizado también en el Istmo de Tehuantepec. Se trata de un proyecto de obra pública financiada, adjudicado en el año 2005 a un consorcio español. Este nuevo parque eólico, cuenta con 98 aerogeneradores de 850 kW y una capacidad total instalada de 83.3 MW, (Portal CFE). Con esta adición, la capacidad eólica actual es de 85.48 MW de los 48,259.59 MW de la capacidad total instalada por CFE (Portal CFE). Actualmente la CFE contempla en el escenario de planeación (CFE, 2006), cinco proyectos denominados La Venta III, Oaxaca I, II, III y IV con una

capacidad de 101.4 MW cada uno, sus características se muestran en la tabla 3.

## Simulación de un parque eólico

En esta sección se presenta la simulación de un parque eólico de 100 MW, constituido por 100 aerogeneradores de 1000 kW cada uno; situado en el ejido Santo Domingo en el Istmo de Tehuantepec. La simulación fue desarrollada con la ayuda de los módulos BASIS, PARK, DECIBEL y METEO del software WindPRO (EMD International). Las características del sitio, tales como la rugosidad del terreno y los posibles obstáculos para el viento, fueron detallados en la base de datos del simulador. La figura 2 señala la ubicación aproximada de este parque en la República Mexicana.

1 Fuente:

<http://www.conae.gob.mx/work/sites/CONAE/resources/LocalContent/4289/2/aracelyacosta.pdf>

Tabla 1. Principales países por capacidad eólica instalada

Lugar	País	Capacidad instalada MW
1	Alemania	20,621
2	España	11,615
3	Estados Unidos	11,603
4	India	6,270
5	Dinamarca	3,136

Tabla 2. Potencial eólico en México

Potencial eólico en México (MW)	
Sur del Istmo de Tehuantepec	2,000-3,000
Península de Baja California	1,500-2,500
Península de Yucatán	1,000-2,000
Zacatecas	800-1,500
Costa del Pacífico	1,000-1,500
Golfo de México	1,000-1,500

Tabla 3. Proyectos eoloelectricos: Escenario de planeación de CFE

Año	Proyecto	Capacidad Bruta MW	Capacidad Neta MW	Generación Media Anual (GWh)	Número de unidades
2008	La Venta III	101.4	99	361	78
2009	Oaxaca I	101.4	99	373	78
2011	Oaxaca II,III y IV	304.2	297	1119	234



Figura 2. Localización del parque eólico simulado

El arreglo físico de un proyecto eólico, consiste en la distribución de los aerogeneradores en el área destinada para la central. Generalmente, se distribuyen a lo largo de líneas paralelas que forman un ángulo recto con la dirección de los vientos dominantes. La separación entre las líneas de aerogeneradores y la separación entre cada aerogenerador dependen del diámetro del rotor de cada unidad. La separación debe ser calculada para que se minimice la interferencia entre turbinas y las pérdidas por arreglo cuando existen cambios en la dirección del viento.

Una amplia separación de los aerogeneradores producirá más energía, pero a expensas de más superficie terrestre, de más caminos, así como también de más cableado eléctrico. Consecuentemente determinar la distribución de aerogeneradores es un problema de optimización con restricciones, en el que el costo de generación es la variable a minimizar.

En este trabajo, se simuló un parque constituido por 4 filas de 25 aerogeneradores cada una, con un

espaciamento de 3 diámetros de rotor entre aerogeneradores y 6 diámetros de rotor entre las filas de aerogeneradores. Cabe mencionar que el arreglo de aerogeneradores empleado en esta simulación (distancia entre las turbinas) es teóricamente el mínimo recomendado para que el parque tenga un buen desempeño. Conforme a lo anterior, el parque eólico simulado en este trabajo, ocupará aproximadamente un área de 700 hectáreas. Los resultados más importantes de la simulación son los siguientes:

*Análisis Energía vs Sector*, incluido en el análisis de producción del parque del módulo METEO: calcula la cantidad de energía anual que puede ser obtenida por sector (N, NNE, ENE, E, ESE, SSE, S, SSW, WSW, W, WNW y NNW). El resultado fue que el viento proveniente del sector norte (N); es decir, de Norte a Sur, es ampliamente dominante con una generación anual de 4000 MWh y despreciable para los otros sectores.

Generalmente, los aerogeneradores aprovechan vientos con velocidad de 5 a 25 m/s. Con menos de 5



m/s los aerogeneradores son muy ineficientes y arriba de 25 m/s están diseñados para detener el giro de las aspas, con el objeto de evitar daños en los equipos del aerogenerador. La figura 3 muestra el reporte del análisis de *Energía vs Velocidad del Viento*, realizado con WinPro, indica la distribución de la energía en MWh al año, para un rango de velocidades de viento promedio de 0 a 25 m/s. Se observa que el parque eólico, en el mejor de los casos, podría generar del orden de 475 MWh al año, si la velocidad promedio anual del viento en el sitio fuera de 15 m/s.

El módulo DECIBEL calcula el nivel de ruido producido por el parque eólico, al que estaría sometido el asentamiento urbano más cercano, Santo Domingo, el cual es de 40.7 dB(A). La figura 4 muestra el esquema de la propagación del ruido producido por el parque eólico; se tiene 55 dB(A) dentro del parque y valores de 50, 45, 40 y 35 dB(A) desde la zona más cercana a la más alejada mostrada en el esquema.

### Evaluación económica

En esta sección se presentan los resultados de cálculos para obtener el costo del kWh generado por una planta eolieléctrica. Los costos unitarios de inversión se expresan en dólares por kW a precios medios del 2005. El cálculo se hizo a moneda constante, considerando una tasa de descuento del 12%. El análisis se inicia tomando como base el costo instantáneo (overnight), 1,110 Dls/kW y un programa de inversión a 12 meses, similar al empleado en el COPAR-Generación (COPAR, 2005). En la tabla 4 se hace un condensado de los datos necesarios para calcular el costo nivelado del MWh por concepto de inversión, operación y mantenimiento. Con estos datos y mediante el empleo de las ecuaciones para

la obtención del costo nivelado del MWh, se hizo la tabla 5.

Este costo de 44.54 dólares/MWh eólico es competitivo con los de la tecnología nuclear y del ciclo combinado, 43.17 dólares/MWh y 49.57 dólares/MWh, respectivamente (COPAR, 2005).

Ahora bien, se debe tener presente que el viento es intermitente y que en más de la mitad del tiempo durante el año, no se está generando energía y es necesario contar, en algún sitio relativamente cercano al parque eólico, con una potencia de respaldo igual a la capacidad instalada del parque, de alguna fuente energética no intermitente. Esto representa un fuerte inconveniente, debido a la inversión de capital que debe hacerse para contar con este respaldo. Sin embargo, se han planteado algunas soluciones a esta situación mediante la utilización de energía hidroeléctrica que actualmente ya está instalada en la región sur del país, mediante una planeación del despacho de carga de estas hidroeléctricas. También sería factible que parte de los aerogeneradores, bombearan agua en alguna presa cercana, de manera que la hidroeléctrica generará, cuando la eólica no se encuentre disponible por falta de viento; sin embargo, este aspecto queda para estudiarse con más detalle.

### Consideraciones ambientales

Si bien, la migración de las aves es un fenómeno que sucede a nivel mundial, este estudio únicamente se ha basado en lo concerniente a la posible alteración que provocaría un parque eólico en el medio ambiente y en el hábitat de ciertas especies de aves en México.

La figura 5 muestra algunas de las rutas (USGS, 2005) que siguen ciertas especies durante su vuelo al Sur; se puede observar que éstas pasan a través del

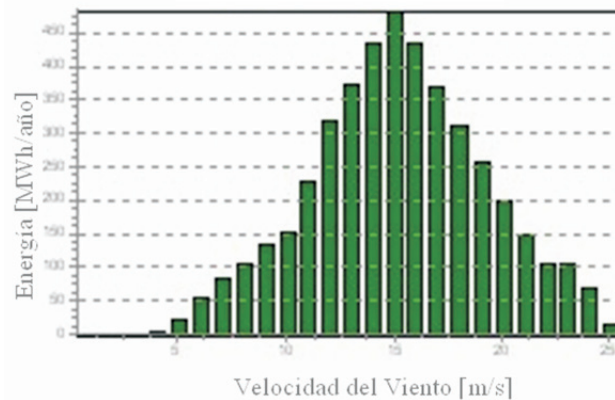


Figura 3. Análisis energía vs velocidad del viento

territorio nacional, por toda la costa del Golfo de México y prácticamente todo el Istmo de Tehuantepec; que es justamente la zona en la cual se planean instalar los principales proyectos eólicos en México, y donde se encuentra el parque eólico simulado en esta investigación.

Como ya se mencionó, La Venta I cuenta solamente con 7 aerogeneradores, situados relativamente cerca

unos de otros; sin embargo, desde 1994, año en que inició su operación, no ha sido documentada la muerte de ave alguna. Ahora, con la puesta en marcha de La Venta II (98 aerogeneradores), tendrá que tomarse en cuenta, el cómo este proyecto y los que están por venir, afecten lo menos posible la vida que llevan las aves del lugar.

Tabla 4. Datos para el cálculo del costo nivelado del MWh

Potencia efectiva (C)	1000 kW
Usos propios ( <i>up</i> )	0.001 fracción
Factor de planta ( <i>fp</i> )	0.439 fracción
Costo instantáneo (CU)	1110 Dol/kW
Tasa de descuento ( <i>i</i> )	0.12 fracción
Vida de la planta ( <i>n</i> )	20 años
Tiempo Construcción (N)	1 año

Tabla 5. Costo del MWh eólico

Costo inversión actualizado	1,182.64 Dol/kW
Costo anual de inversión	158.33 Dol/kW-año
Costo anual de O&M	30.0 Dol/kW-año
Generación neta anual	3841.79 horas/año
Costo de inversión (nivelado)	36.73 Dol/MWh
Costo O&M (nivelado)	7.81 Dol/MWh
<b>Costo nivelado del MWh</b>	<b>44.54 Dol/MWh</b>

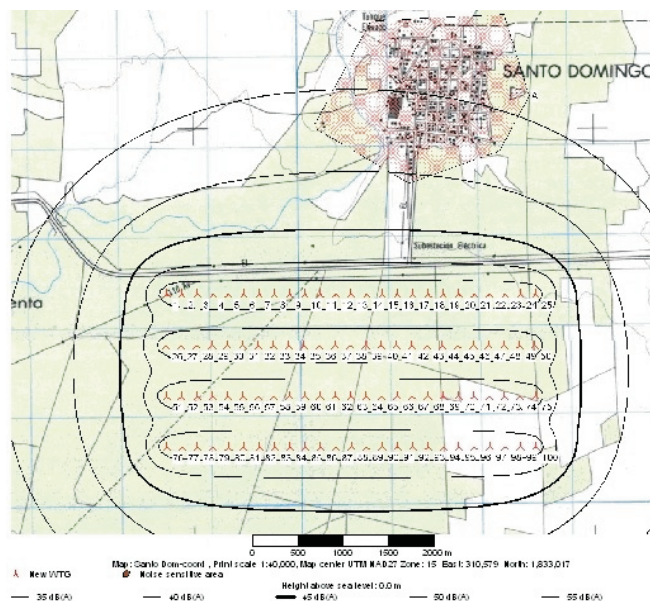


Figura 4. Esquema de la propagación del ruido producido por el parque eólico

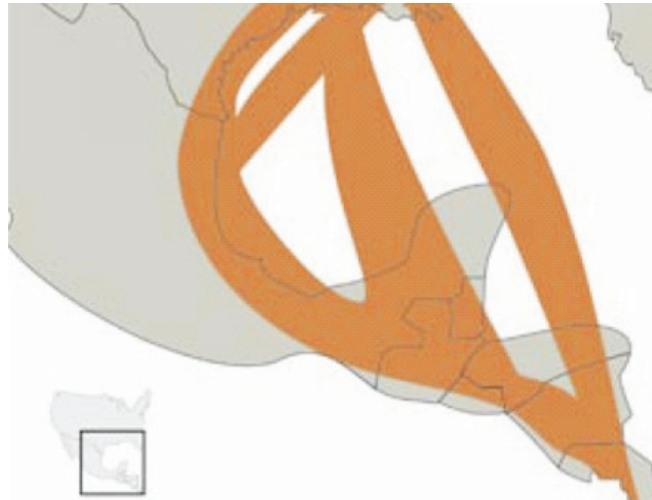


Figura 5. Rutas migratorias a través del istmo de Tehuantepec y el Golfo de México

Por otro lado, cabe mencionar que el ruido producido por los aerogeneradores es otro impacto sobresaliente relacionado con los parques eólicos. En lo referente a este problema, en México será prohibida la construcción de un parque eólico, si el nivel de ruido producido excede el límite máximo establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-081-SEMARNAT (1994), creada para tal propósito por la Secretaría de Salud, tomando en cuenta el ruido máximo permitido para humanos, 65 dB(A). De acuerdo a los resultados de la simulación, el parque propuesto cumple con la norma.

#### **Análisis probabilístico de seguridad (APS) de parques eólicos**

Si bien, las centrales eoloeléctricas no causan muertes o enfermedad durante el transcurso de su vida útil, se presentan otros riesgos, tales como la ruptura de alguna pala o la expulsión del hielo que se ha formado en las palas del aerogenerador, si es que éste se encuentra situado en una zona de bajas temperaturas, así como riesgos económicos y la posible colisión de embarcaciones contra aerogeneradores, en el caso de ser un parque localizado mar adentro.

Es por esto que organizaciones internacionales han considerado el uso del Análisis Probabilístico de Seguridad (APS) para el estudio de los riesgos pertenecientes a la energía del viento, con el objetivo de comprobar la rentabilidad de las mejoras en los diseños y la optimización del mantenimiento.

En esta sección se muestra un ejemplo de la aplicación de APS, en el cual se desarrolló un árbol de eventos

con el fin de analizar los posibles escenarios que podrían producirse cuando la velocidad del viento sobrepasa el límite operacional; así también, se desarrollaron los árboles de fallas para cada uno de los sistemas de mitigación, para determinar la importancia relativa en las secuencias de falla de cada uno de los componentes del aerogenerador.

#### **Descripción del sistema “Aerogenerador”**

Los aerogeneradores de La Venta II están diseñados para mantenerse en pie aún con velocidades de viento de 130 km/h; sin embargo, cuando la velocidad del viento excede 25 m/s, el sistema de control debe detener el giro del rotor para evitar daños en los equipos.

A continuación, se describe el comportamiento que podría tener un sistema llamado “Aerogenerador”, al presentarse un evento iniciador denominado Velocidad de Viento Excedida (OVERSPEED) que se define como una velocidad superior a 25 m/s pero inferior a 36 m/s (equivalente a los 130 km/h). Para esto, se empleó el programa SAPHIRE, que es una herramienta desarrollada para el Análisis de Confiabilidad y Riesgo. En dicho programa se modeló el sistema “Aerogenerador”; para el cual se dibujaron y cuantificaron el árbol de eventos y los árboles de fallas para cada uno de los subsistemas que conforman este sistema. En total, son cinco los subsistemas básicos en los que se dividió al sistema “Aerogenerador”: Sistema de Orientación y Medición (SOYM), Sistema de Control (SC), Operador (OP), Operador Remoto (OPR) y Frenos de Pala (SF).

### Árbol de eventos

El trabajo con APS se inició con el desarrollo de un árbol de eventos que considera la posibilidad de velocidades de viento que no superan los 36 m/s, pero que exceden los 25 m/s. Esto implicaría que el aerogenerador debe detenerse; si esto no sucede, se tiene el riesgo de que se dañe. Para lo anterior, se cuenta con los denominados “sistemas de mitigación”, mismos que aparecen en el encabezado del árbol de eventos.

La figura 6 muestra el árbol de eventos desarrollado en SAPHIRE. Se pueden observar las 12 secuencias que se generaron en correspondencia al comportamiento de los subsistemas y a la relación entre ellos, al presentarse el evento iniciador “Overspeed”. De estas 12 secuencias, sólo siete tienen como estado final “falla” y es en ellas en las que se enfoca este análisis.

A continuación, a modo de ejemplo, se detalla la secuencia número 7; es decir, se indica el orden en el que deben presentarse las fallas para que el sistema pueda llegar al estado final “falla”. Ésta se señala en color azul en la figura 6.

**Secuencia 7:** Se presenta viento entre 25 y 36 m/s. El anemómetro lo detecta. El sistema de control falla. El operador en el parque no se percata de lo ocurrido y el operador remoto tampoco se da cuenta del problema. El aerogenerador se daña.

### Reporte de medidas de importancia

En esta sección se presenta el reporte de medidas de importancia (tabla 6); el cual enlista los eventos representativos del modelo construido. En este caso, se

destaca la columna de la reducción de riesgo, la cual clasifica a los componentes de acuerdo a su posibilidad de reducir el riesgo; entre más grande sea el valor de un componente, mayor será la importancia del mismo en la reducción de riesgo del sistema. Esta medida de importancia, indica qué tanto puede reducirse la frecuencia de las secuencias, si la probabilidad de falla del componente fuera reducida a cero. Por ejemplo, si el valor que se muestra en dicha tabla para el sistema FRENOS (cuya probabilidad de falla es de  $4.0 \times 10^{-2}$ ) fuera reducido a 0.0 resultaría en una reducción del riesgo de  $2.885 \times 10^{-2}$ .

También se puede observar que el sistema FRENOS (SF) es el más importante, después del evento iniciador (OVERSPEED), cuando se toma como punto de partida la reducción de riesgo, ya que éste presenta el valor más alto entre el conjunto de eventos que aparecen en la tabla. Esto indica que si fuera posible tener unos frenos perfectos que no fallaran, es decir, si se reduce la probabilidad de falla de  $4.0 \times 10^{-2}$  a 0.0, la frecuencia de falla del turbogenerador se reduce de  $2.888 \times 10^{-2}$  a  $3.0 \times 10^{-5}$  (que se calcula como:  $2.888 \times 10^{-2} - 2.885 \times 10^{-2}$ ). Con esta información se podría calcular el costo de la reducción de frecuencia de falla del turbogenerador, a través de la reducción de la probabilidad de falla de cada uno de los subsistemas, y así calcular el costo/beneficio para cada inversión. Sea al mejorar el subsistema, optimizar su mantenimiento o implantar programas para reducir los errores humanos.

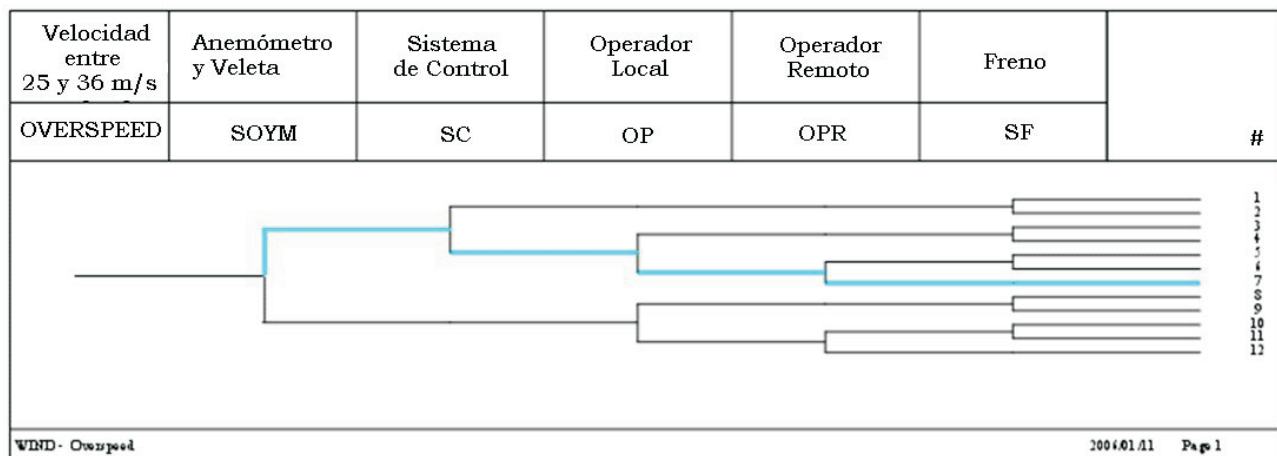


Figura 6. Árbol de eventos para el evento iniciador OVERSPEED

Tabla 6. Reporte de medidas de importancia

Ordenado por Intervalo de Reducción de Riesgo

Nombre del evento	Número de Ocurrencias	Probabilidad de falla	Reducción de Riesgo
OVERSPEED (Velocidad excedida)	17	7.000E-001	2.888E-002*
FRENOS	9	4.000E-002	2.885E-002
CONTROLADOR	4	2.900E-002	8.365E-004
CONEXIÓN	4	1.000E-003	2.881E-005
SOFTWARE	4	1.000E-003	2.124E-005
SUMINISTRO ELÉCTRICO	4	3.000E-004	8.644E-006
OPERADOR	8	3.000E-003	4.461E-006
OPERADOR REMOTO	4	3.000E-002	1.912E-006
ANEMÓMETRO	4	5.000E-005	1.442E-006

\* Este es el valor de reducción de riesgo total que se puede tener

Asociado a lo anterior y debido a la falta de datos reales; se debe tener presente que para este estudio, los ejercicios realizados han sido desarrollados empleando valores supuestos de las probabilidades, por lo que éstos solamente pueden ser tomados como ensayos.

### Trabajo a futuro con APS en parques eólicos

Si bien, lo que se ha realizado en este estudio es solamente una introducción de lo útil que puede ser la utilización del Análisis Probabilístico de Seguridad en el estudio de parques eólicos; se debe seguir trabajando en la identificación de posibles modos de falla, así como en el desarrollo de los respectivos árboles de eventos para nuevos eventos iniciadores. Además, se debe recopilar información suficiente con el fin de poder desarrollar un análisis cuantitativo que represente la realidad en eventos iniciadores en los que se presente viento con una velocidad superior a la considerada en esta aplicación del APS. Por ejemplo, se podrían analizar eventos, como el del 2 de diciembre del 2006, en el que un aerogenerador de la Venta II, diseñado para soportar velocidades de viento de hasta 130 km/h, fue derribado<sup>2</sup> cuando se registraron ráfagas de viento arriba de 190 km/h. Para este análisis sería necesario disponer de escenarios de vientos, incluyendo las velocidades de viento y sus frecuencias para el sitio del parque eólico, así como la

2 [http://www.eluniversal.com.mx/estados/vi\\_63207.html](http://www.eluniversal.com.mx/estados/vi_63207.html)

información sobre la fragilidad estructural de los aerogeneradores para poder calcular la probabilidad de su derrumbamiento, cuando se presenta viento con velocidad superior a la de diseño.

### Conclusiones

La aportación a la planeación de proyectos eólicos por parte del software WindPRO es muy importante, ya que permite predecir el comportamiento que tendrán, tanto el parque, como los aerogeneradores que lo conforman. Esto ayudará a mejorar el desempeño del mismo, reduciendo así, los costos de generación para ese parque en específico.

El costo nivelado del kWh para los parques eólicos es actualmente competitivo con las fuentes convencionales a pesar de que se trata de unidades generadoras de bajo factor de planta. Sin embargo, dada la intermitencia del viento, es necesario contar con una capacidad de respaldo igual a la potencia del parque de alguna fuente energética no intermitente en algún sitio relativamente cercano al parque.

Los resultados obtenidos mediante el Análisis Probabilístico de Seguridad (APS) en aerogeneradores son de carácter ilustrativo, pues ha sido desarrollado con datos no reales, debido a la carencia de los mismos. Aun así, resulta claro lo importante que puede ser la información obtenida mediante el APS; por lo que es necesaria la obtención de los datos reales de la probabilidad de falla de

cada uno de los componentes que conforman al aerogenerador; para de esta forma, conocer a detalle cuál o cuáles son los elementos del sistema que con mayor frecuencia sufren descomposturas, perjudicando el desempeño del aerogenerador y del parque en general.

### Referencias

- CFE. *Programa de obras e inversiones del sector eléctrico (POISE) 2007-2016*. México. 2006.
- COPAR. *Costos y parámetros de referencia para la formulación de proyectos de inversión. Generación 2005*. CFE, Subdirección de Programación. Gerencia de Evaluación y Programación de Inversiones. México. 2005.
- EMD International A/S (EMD). WindPro [en línea]. Disponible en:  
<http://www.emd.dk/WindPRO/Frontpage>  
Global Wind Energy Council-Press Release. Global Wind Energy Markets Continue to Boom– 2006 Another Record Year Industry Delivered 32% of annual. Bruselas, 2007. Portal Comisión Federal de Electricidad [en línea]. Disponible en: [www.cfe.gob.mx](http://www.cfe.gob.mx)
- Secretaría del Medio Ambiente. Norma Oficial Mexicana NOM-081-SEMARNAT-1994, Contaminación por Ruido [en línea]. Disponible en:  
[http://www.genomaf.com/normatividad\\_semarnat.html](http://www.genomaf.com/normatividad_semarnat.html)
- SAPHIRE (Systems Analysis Programs for Hands-on Integrated Reliability Evaluations) Version 6.77. Idaho National Engineering and Environmental Laboratory. Division of System Technology Office, Nuclear Regulatory Research, U.S Nuclear Regulatory Commission, Washington D.C.
- USGS. Science for a Changing World. Migratory Bird Pathways and the Gulf of Mexico. National Wetlands Research Center, Mayo 2005 [en línea]. Disponible en: <http://www.nwrc.usgs.gov/factshts/2005-3069.pdf>

---

### Semblanza de los autores

- Cecilia Martín del Campo-Márquez*. Es ingeniera en energía por la Universidad Autónoma Metropolitana, ingeniera nuclear por el Instituto Nacional de Ciencias y Técnicas Nucleares de Francia y doctora con mención honorífica en ingeniería nuclear por la Universidad de París XI. Trabajó en el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares y en el Instituto de Investigaciones Eléctricas. Actualmente es profesora de la Facultad de Ingeniería, UNAM. Es líder de la línea de desarrollo "*Estudios de expansión del sector eléctrico*" y ha sido responsable de varios proyectos de investigación y de vinculación. Es miembro del subcomité académico del campo de conocimiento de energía del Programa de Posgrado en Ingeniería de la UNAM. Tiene nivel 1 del Sistema Nacional de Investigadores. Destaca su colaboración con la Academia de Ingeniería de México en la comisión de especialidad de ingeniería nuclear, como secretaria en su consejo directivo (2006-2008) y en su comité editorial (2008-2010). Su actividad en la Sociedad Nuclear Mexicana ha sido muy intensa, siendo actualmente vicepresidenta/presidenta electa. También es miembro del Consejo Consultivo del Instituto de Ciencia y Tecnología del Distrito Federal y es miembro fundador de la Red Nacional del Hidrógeno. A nivel internacional, es miembro de Women in Nuclear Global, de la American Nuclear Society (ANS) y de la Sección Latinoamericana de la ANS y actualmente, es miembro del Comité Ejecutivo de la División de Ciencias Ambientales de la ANS.
- Pamela Fran Nelson-Edelstein*. Realizó sus estudios de licenciatura en la Universidad de California, Los Angeles, donde se tituló como ingeniera nuclear en 1982. Posteriormente, realizó una maestría en ingeniería nuclear en 1985 en la misma universidad. Desde 2001, trabaja en la Universidad Nacional Autónoma de México y actualmente es técnico académico de tiempo completo en la Facultad de Ingeniería. Es líder del grupo de trabajo de la línea de desarrollo: "*Análisis de Riesgo*" y ha sido responsable de varios proyectos de investigación y vinculación. Es tutora de maestría del Programa de Posgrado en Ingeniería de la UNAM. Es miembro fundadora de la Red Nacional del Hidrógeno y de la Sociedad Nuclear Mexicana y actualmente, funge como vice-presidente del comité de gestión de riesgo nuclear en el ASME.
- Miguel Ángel García-Vázquez*. Es ingeniero eléctrico-electrónico de la Universidad Nacional Autónoma de México. Obtuvo el grado de maestro en ingeniería en energía con mención honorífica por parte la misma institución. Ha participado en dos congresos internacionales con proyectos de investigación referentes al desarrollo y explotación del potencial eólico con el que cuenta México. Actualmente labora para ABB México en la división de robótica, en el área de Vision & Sensing, participando activamente en proyectos de automatización de procesos.

# Cálculo de registros sintéticos de ingresos por cuenca propia de un sistema de presas de la región Noroeste de México, caracterizada por eventos invernales

## *Synthetic Generation of Inflows in a Dam System of a Region Characterized by Extraordinary Winter Events*

R. Domínguez-Mora  
*Instituto de Ingeniería, UNAM.*  
*Facultad de Ingeniería, UNAM.*  
*E-mail: rdm@pumas.iingen.unam.mx*

M.L. Arganis-Juárez  
*Instituto de Ingeniería, UNAM.*  
*Facultad de Ingeniería, UNAM.*  
*E-mail: MarganisJ@iingen.unam.mx*

(Recibido: septiembre de 2007; aceptado: junio de 2008)

### **Resumen**

En este estudio se generaron muestras sintéticas de series mensuales de volúmenes de ingreso por cuenca propia de cuatro presas en las que se preserva la autocorrelación y la correlación cruzada de las series históricas. Se utilizó el método de Svanidze modificado con una variante en la selección aleatoria de años, considerando que los ingresos anuales por cuenca propia a cada una de las presas tuvieron una distribución afectada por los eventos de invierno. Los estadísticos media, desviación estándar, coeficiente de asimetría y coeficiente de autocorrelación, así como la correlación cruzada, fueron reproducidos satisfactoriamente.

**Descriptores:** Muestras sintéticas, eventos de invierno, método de Svanidze modificado, escurrimientos, autocorrelación, correlación cruzada.

### **Abstract**

*In this paper synthetic monthly series of net basin inflows in four dams were generated; there are correlations and crossed correlations in historic series; Svanidze's modified method was applied, adding a different way in the random selection of years including the fact that the net basin inflows distribution was influenced by winter events. Statistics media, standard deviation, skew, autocorrelation and crossed correlation were successfully reproduced.*

**Keywords:** *Sinthetic series, winter events, Svanidze's modified method, inflows, autocorrelation, crossed correlation.*

### **Introducción**

En el Noroeste de la República Mexicana el régimen normal de escurrimientos tiene su máximo en los meses de verano, de julio a octubre, y valores mínimos en invierno (diciembre, enero y febrero). Sin

embargo, ocasionalmente se presentan tormentas de invierno, conocidas en la región como equipatas, de tal magnitud que los escurrimientos mensuales que provocan son mucho mayores que la media en esos meses, e incluso, sensiblemente mayores que los de los meses de verano; es por eso que en el análisis y la generación de

series sintéticas de escurrimientos se debe tomar muy en cuenta esta característica.

En este estudio se generaron muestras sintéticas de volúmenes mensuales de ingreso por cuenca propia a cuatro presas situadas en la cuenca del río Yaqui, en el estado de Sonora. La región en estudio se muestra en la figura 1 y en la figura 2 con la configuración del sistema formado por las presas Lázaro Cárdenas (Angostura), Son., Abraham González, Chih., Plutarco Elías Calles (El Novillo), Son., y Álvaro Obregón (Oviachic), Son.

Se utilizó el método de Svanidze modificado (Domínguez *et al.*, 2001,2002), (Svanidze, 1980), con una variante en la selección aleatoria de los años, debido a que en un ensayo preliminar se observó que el método en su forma original reportaba valores sintéticos de las asimetrías considerablemente mayores que los históricos (hasta más del doble), en prácticamente todos los meses. Lo anterior se atribuyó a la existencia de eventos extraordinarios de invierno en años con valores grandes del ingreso por cuenca propia. Las muestras generadas preservan satisfactoriamente las características estadísticas (media, desviación estándar y coeficiente de asimetría de cada mes) de los escurrimientos de cada una de las presas, la función de distribución de los escurrimientos anuales totales, los coeficientes de autocorrelación entre meses sucesivos y los coeficientes de

correlación cruzada, para cada mes del año, entre cada pareja de presas.

## Desarrollo

### Método de Svanidze modificado en la selección aleatoria de años

En el análisis de series de tiempo, existen numerosas metodologías para obtener registros sintéticos a partir del registro histórico, tanto de series anuales como de series periódicas (semestrales, mensuales, diarias); entre esos métodos cabe destacar los modelos autorregresivos de promedios móviles ARMA (p,q) (Salas *et al.*, 1988), modelos ARIMA y de Thomas Fiering (Yurekly *et al.*, 2004), el método de Fragmentos de Svanidze (Svanidze,1980).

Los modelos ARMA tienen el inconveniente de que su aplicación se limita a series de datos cuya distribución debe ser normal y aunque existen técnicas para efectuar una transformación normalizante a la serie original, tales como el cálculo del logaritmo natural o el método de Box y Cox (Escalante, 2002), por tratarse de transformaciones no lineales, al aplicar la transformación inversa se incurre en una deformación de los resultados finales.

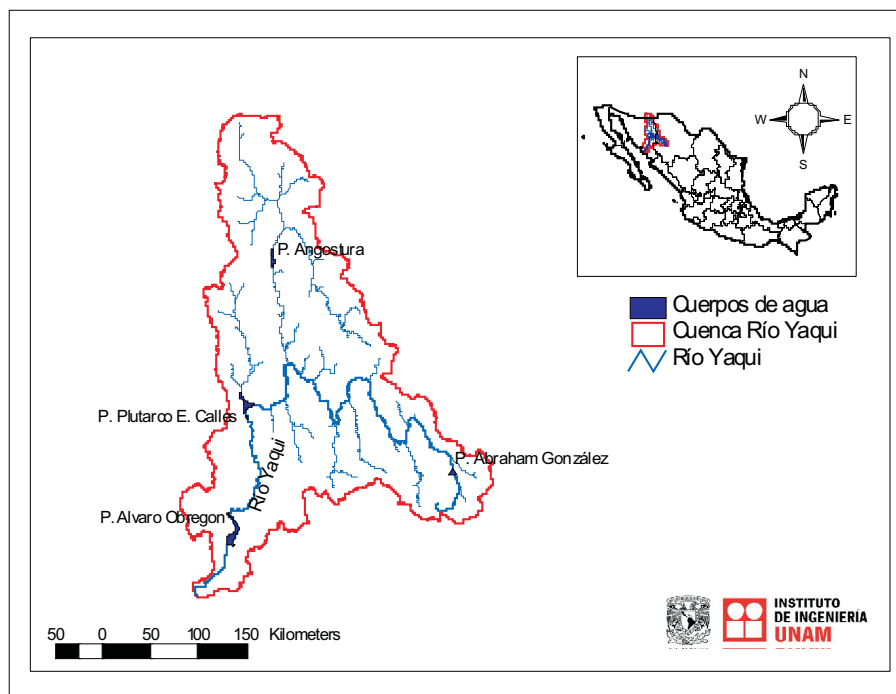


Figura 1. Localización del sitio, río Yaqui, Sonora, México



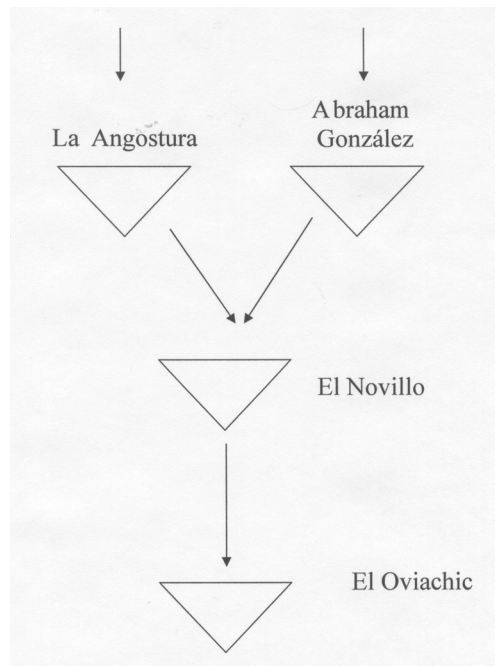


Figura 2. Configuración del sistema de presas

El método de Svanidze modificado, ha sido utilizado con éxito en la generación sintética de los volúmenes de escurrimiento de sistemas de presas que operan en cascada (Domínguez *et al.*, 2001, 2002); tiene la ventaja de que no se requiere que los datos sean normales y que logra reproducir las correlaciones y correlaciones cruzadas. El problema que tiene es la preservación de la correlación entre el último periodo del año  $i$  y el primer periodo del año  $i+1$ , pero lo anterior se resuelve identificando los periodos de más baja correlación y redefiniendo los años (en lugar de usar años cronológicos, se utilizan años hidrológicos).

Los datos de entrada al proceso son las  $n$  series periódicas históricas analizadas. Para cada año del registro histórico se calculan los totales de cada serie y la suma de los  $n$  totales; adicionalmente, para cada una de las series se obtiene la fracción del ingreso mensual con respecto al total anual y se determina, para cada total anual de cada serie, el porcentaje con respecto al total suma. A la serie anual formada por la suma de los  $n$  totales se le hace un análisis estadístico para determinar la función de distribución de probabilidades de mejor ajuste.

La generación sintética se realiza mediante un doble procedimiento aleatorio; el primero consiste en utilizar la función de distribución de mejor ajuste, con la que se obtienen  $m$  valores aleatorios con la función de distribución de la suma de los  $n$  totales. El segundo

procedimiento es la selección aleatoria de entre  $m$  años históricos para obtener el porcentaje sintético tanto de los totales anuales de cada serie, como las fracciones mensuales correspondientes. Se obtienen los totales anuales sintéticos para cada serie multiplicando el total suma aleatorio por el porcentaje correspondiente al año seleccionado aleatoriamente. Se multiplica el total anual sintético de cada serie por las fracciones mensuales correspondientes al año seleccionado, con lo que se determinan las  $m$  series periódicas sintéticas.

#### Modificación al algoritmo en la selección de los años aleatorios

En el estudio de las presas del río Yaqui, al hacer la aplicación del método de Svanidze modificado con el procedimiento descrito anteriormente, no se lograron reproducir los coeficientes de asimetría (figura 3); la causa atribuida a este problema fue la existencia ocasional de valores registrados en los meses de invierno de magnitud considerablemente mayor a la media anual.

Considerando que los volúmenes totales anuales se ajustan a una función de distribución doble Gumbel (González, 1970) en la que la población mayor corresponde a años con eventos extraordinarios de invierno, se modificó el procedimiento de selección de los años, de forma que, si el valor total anual sintético generado es mayor que un umbral que separa las dos poblaciones,

la selección se hace sólo entre los años que pertenecen a la segunda población y en caso contrario entre los de la primera.

### Aplicación

Se aplicó el método de Svanidze modificado a los datos históricos de los volúmenes de ingreso mensuales por cuenca propia de las presas Lázaro Cárdenas (Angostura), Son., Abraham González, Chih., Plutarco Elías

Calles (El Novillo), Son., y Álvaro Obregón (Oviachic), Son., utilizando los datos del funcionamiento mensual de las presas obtenidos del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) de la Comisión Nacional del Agua. Se formó un archivo de 26 años no continuos (1964-1966, 1968-1985 y 1995-1999) de escurrimientos simultáneos mensuales por cuenca propia (es decir, restando a las entradas totales las descargas de las presas situadas aguas arriba) para cada una de las presas. Para preparar los archivos de entrada al algoritmo se

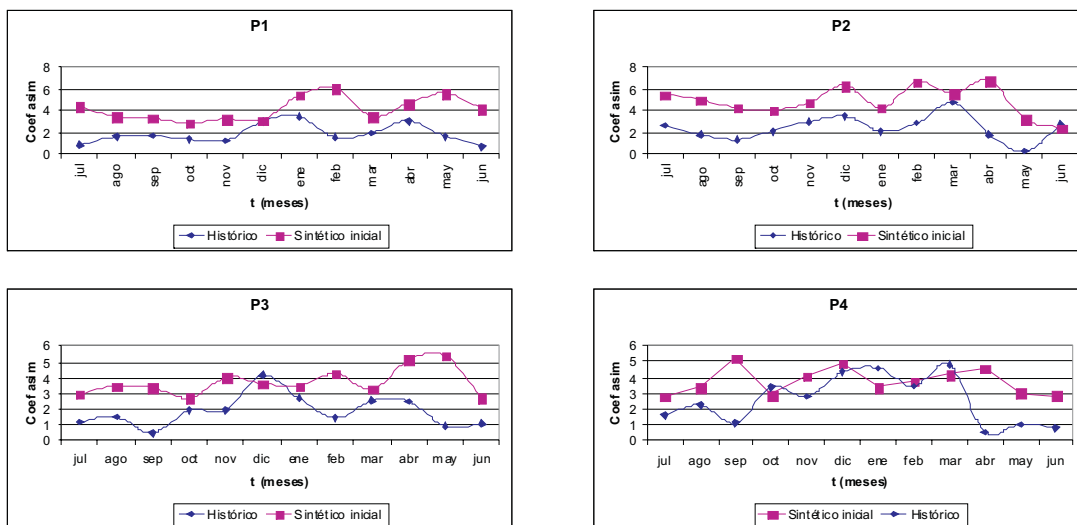


Figura 3. Coeficientes de asimetría obtenidos con el método de Svanidze en su forma original

Tabla 1. Serie mensual de la suma de las 4 presas analizadas (Ingresos en hm<sup>3</sup>). Estadísticos básicos

Año	jul	ago	sep	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may	jun	total
1964	497.4696	1288.6312	970.3002	746.8146	57.5832	40.4642	55.7816	166.8092	101.9120	62.2910	9.1470	19.0804	4016.2842
1965	208.0154	403.1058	652.6616	54.1544	30.3662	704.8609	162.9960	287.6730	103.7640	46.7180	36.9100	56.4260	2747.6513
1966	657.3450	2163.9878	509.8542	131.5572	57.7688	80.9908	501.2690	1254.1120	1810.7160	179.7150	95.8400	75.4680	7518.6236
1968	1126.8264	1314.5250	778.7398	88.8518	81.3170	113.7550	90.5570	137.4810	57.9360	42.5994	100.6580	55.6540	3988.9004
1969	525.7990	428.8336	355.3582	194.8360	241.5010	353.4000	80.6260	103.7628	123.0934	57.6802	50.9704	55.2192	2571.0798
1970	392.2288	980.1680	415.0852	79.5656	46.1592	70.8820	53.9580	65.6716	55.8644	34.7510	33.5924	45.5266	2273.4528
1971	458.9000	976.6812	227.2906	551.8460	184.8970	173.5800	97.9070	58.1660	62.1970	49.6032	40.6158	121.6950	3003.3788
1972	335.5958	782.0620	649.4230	351.3840	258.0740	115.5070	648.1260	942.6900	459.4160	124.1098	81.2390	63.4692	4811.0958
1973	336.0856	800.9430	147.4534	53.2276	34.4200	70.2334	60.5960	46.7830	36.5894	40.7904	36.8910	49.1554	1713.1682
1974	584.8742	725.0140	774.2610	163.4300	273.6210	76.9540	97.1800	205.2828	61.2514	37.9342	55.3578	30.6106	3085.7710
1975	697.9882	689.4842	760.9390	67.1292	68.7260	119.2690	92.6660	208.1270	53.6550	62.6012	35.0842	60.6234	2916.2924
1976	931.2506	287.3772	396.6144	184.2630	72.7856	90.2940	160.8860	91.8664	73.9842	38.9928	47.1116	63.1900	2438.4158
1977	540.6922	897.5622	482.3906	211.4592	53.8906	66.4000	112.2806	165.1524	769.3410	69.2330	49.6062	75.3646	3493.3526
1978	218.0706	550.5732	672.1960	471.5230	154.7970	439.8060	1412.8340	413.3180	160.4258	73.9272	90.2960	71.8820	4729.6488
1979	358.5792	580.6228	202.7826	63.5564	70.3222	88.2170	69.4446	117.7752	66.7476	89.7762	28.8246	57.3328	1793.9812
1980	334.7024	888.4154	718.4110	179.4560	61.5456	81.7140	392.9170	126.2520	546.1174	99.4078	70.4258	94.0692	3593.4336
1981	784.5284	1003.7180	607.4386	212.0260	89.8940	54.6060	95.5672	102.6160	100.4530	67.6918	39.2620	38.6952	3196.4962
1982	221.9640	347.0014	295.0814	81.5476	89.0684	632.7460	365.0440	764.0952	1313.6622	460.5976	148.7738	101.1160	4820.6936
1983	275.2280	826.7210	591.1568	673.6192	347.9014	388.2190	167.4450	84.4080	87.6376	93.0976	94.0012	151.3138	3780.7486
1984	526.2368	1723.9440	506.4812	341.0494	140.2500	3150.5560	1893.2590	1084.0128	322.3672	200.6552	131.3468	142.2932	10162.4516
1985	433.7082	759.5270	333.6312	257.5366	133.7908	133.1310	182.1800	918.5370	204.0960	264.5698	120.0220	32.7224	3773.4520
1995	248.7620	278.3658	373.9000	58.2980	202.0220	52.8640	41.4700	64.6700	88.9990	29.6952	20.4440	26.3450	1485.8350
1996	545.1190	745.3890	884.2940	57.7190	47.7430	69.8780	42.3250	29.8220	47.2966	38.3110	31.5468	39.9744	2579.4178
1997	180.2262	819.5120	365.2840	109.5510	62.7264	489.3680	209.3440	249.7440	206.1648	110.8620	41.2000	37.0044	2880.9868
1998	330.8804	611.4168	152.1474	71.9290	37.0230	43.1352	28.6920	42.4448	29.2480	25.2040	16.1180	8.6950	1396.9336
media	470.0430	834.9433	512.9270	218.2532	115.9277	308.0332	284.6051	309.2509	277.7174	96.0326	60.2114	62.9170	3550.8618
desvest	234.4393	433.7232	230.8967	199.0089	87.5928	622.8825	445.1053	366.9720	432.2697	95.6760	37.5963	35.9478	1902.2040
coefasim	1.1594	1.4479	0.1498	1.5096	1.2590	4.2845	2.8317	1.5715	2.6411	2.7314	0.8794	1.0509	2.1072
rj+1j	0.3462	0.2426	0.2777	0.4826	0.0908	0.7821	0.6180	0.6704	0.6485	0.7833	0.5800	0.1160	

identificaron los meses de más baja correlación, a partir del registro construido con la suma de las 4 presas (tabla 1). De acuerdo con la tabla 1, la menor correlación se tiene entre el mes de junio y el de julio, por lo que se decidió trabajar con un año hidrológico, cuyo mes inicial es julio y el mes final es junio (tabla 2).

### Resultados

Al realizar el análisis estadístico del total suma, con ayuda del software AX (Jiménez, 1996), se obtuvo que la función a la que mejor se ajustaban los datos fue una función de distribución Doble Gumbel (González, 1970), (Aparicio, 1989) con parámetros  $\alpha_1=0.001269$   $\beta_1=255.0534$   $\alpha_2=0.000309$   $\beta_2=6111.5934$   $p=0.85$ ; el valor de  $p$  indica que el 85% de los datos corresponden a una primera población y el 15% restante a una segunda población. Al ordenar los eventos de mayor a menor se identificaron cinco años con ingresos extraordinarios en invierno (figura 4).

Se generaron 1000 datos sintéticos del total suma; la figura 5, muestra tanto los datos sintéticos como los datos históricos y calculados, dibujados en escala Gumbel.

Por otro lado, se obtuvieron 1000 años seleccionados aleatoriamente (con reemplazo) de entre los datos de la muestra histórica para considerar los porcentajes con respecto al valor total suma, correspondientes a cada presa, así como sus respectivas fracciones mensuales. Para ello, se comparó el ingreso total suma sintético con

respecto a 4729 (quinto valor de la figura 4), de tal forma que si el valor sintético era superior a dicho valor, la selección aleatoria se hacía entre los años de mayor valor (en este caso los años 1966, 1972, 1982, 1984), en caso contrario la selección aleatoria se hacía entre los años restantes.

En la figura 5 se presenta la comparación de los ingresos por cuenca propia total anual (suma de las cuatro presas) histórico y sintético; se calcularon los estadísticos media, desviación estándar, coeficiente de asimetría, coeficiente de autocorrelación y de correlación cruzada; la comparación entre los estadísticos históricos y calculados se muestra en las Figuras 6 a 10; en las que se denota como P1 a Lázaro Cárdenas (Angostura), P2 a Abraham González, P3 a Plutarco E Calles (El Novillo) y P4 a Álvaro Obregón (Oviachic).

*Tabla 2. Año hidrológico, suma de las 4 presas analizadas. Estadísticos básicos*

Año	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	Total
1964	68.9898	57.7900	78.8598	38.7372	43.5102	16.5046	497.4696	1288.6312	970.3002	746.8146	57.5832	40.4642	3905.6546
1965	55.7816	166.8092	101.9120	62.2910	9.1470	19.0804	208.0154	403.1058	652.6616	54.1544	30.3662	704.8609	2468.1855
1966	162.9960	287.6730	103.7640	46.7180	36.9100	56.4260	657.3450	2163.9878	509.8542	131.5572	57.7688	80.9906	4295.9906
1968	501.2690	1254.1120	1810.7160	179.7150	95.8400	75.4680	1126.8264	1314.5250	778.7398	88.8518	81.3170	113.7550	7421.1350
1969	90.5570	137.4810	57.9360	42.5994	100.6580	55.6540	525.7990	428.8336	355.3582	194.8360	241.5010	353.4000	2584.6132
1970	80.6260	103.7628	123.0934	57.6802	50.9704	55.2192	392.2288	980.1680	415.0852	79.5656	46.1592	70.8820	2455.4408
1971	53.9580	65.6716	55.8644	34.7510	33.5924	45.5266	458.9000	976.6812	227.2906	551.8460	184.8970	173.5800	2862.5588
1972	97.9070	58.1660	62.1970	49.6032	40.6158	121.6950	335.5958	782.0620	649.4230	351.3840	258.0740	115.5070	2922.2298
1973	648.1260	942.6900	459.4160	124.1098	81.2390	63.4692	336.0856	800.9430	147.4534	53.2276	34.4200	70.2334	3761.4130
1974	60.5960	46.7830	36.5894	40.7904	36.8910	49.1554	584.8742	725.0140	774.2610	163.4300	273.6210	76.9540	2868.9594
1975	97.1800	205.2828	61.2514	37.9342	55.3578	30.6106	697.9882	689.4842	760.9390	67.1292	68.7260	119.2690	2891.1524
1976	92.6660	208.1270	53.6550	62.6012	35.0842	60.6234	931.2506	287.3772	396.6144	184.2630	72.7856	90.2940	2475.3416
1977	160.6860	91.8664	73.9842	38.9928	47.1116	63.1900	540.6922	897.5622	482.3906	211.4592	53.8906	66.4000	2728.2258
1978	112.2606	165.1524	769.3410	69.2330	49.6062	75.3646	218.0706	550.5732	672.1960	471.5230	154.7970	439.8060	3747.9236
1979	1412.8340	413.3180	160.4258	73.9272	90.2960	71.8820	358.5792	580.6228	202.7826	63.5564	70.3222	88.2170	3586.7632
1980	69.4446	117.7752	66.7476	89.7762	28.8246	57.3328	334.7024	888.4154	718.4110	179.4560	61.5456	81.7140	2694.1454
1981	392.9170	126.2520	546.1174	99.4078	70.4258	94.0692	784.5284	1003.7180	607.4386	212.0260	89.8940	54.6060	4081.4002
1982	95.5672	102.6160	100.4530	67.6918	39.2620	38.6952	221.9640	347.0014	295.0814	81.5476	89.0684	632.7460	2111.6940
1983	365.0400	764.0952	1313.6622	460.5976	148.7738	101.1160	275.2280	826.7210	591.1568	673.6192	347.9014	388.2190	6256.1302
1984	167.4450	84.4080	87.6376	93.0976	94.0012	151.3138	526.2368	1723.9440	506.4812	341.0494	140.2500	3150.5560	7066.4206
1985	1893.2590	1084.0128	322.3672	200.6552	131.3468	142.2932	433.7082	759.5270	333.6312	257.5366	133.7908	133.1310	5825.2590
1995	182.1800	918.5370	204.0960	264.5698	120.0220	32.7224	248.7620	278.3658	373.9000	58.2980	202.0220	52.8640	2936.3390
1996	41.4700	64.6700	88.9990	29.6952	20.4440	26.3450	545.1190	745.3890	884.2940	57.7190	47.7430	69.8780	2621.7652
1997	42.3250	29.8220	47.2966	38.3110	31.5468	39.9744	180.2262	819.5120	365.2840	109.5510	62.7264	489.3680	2255.9434
1998	209.3440	249.7440	206.1648	110.8620	41.2000	37.0044	330.8804	611.4168	152.1474	71.9290	37.0230	43.1352	2100.8510
1999	28.6920	42.4448	29.2480	25.2040	16.1180	8.6950	940.0030	924.4140	359.8080	52.1526	20.8250	36.8768	2484.4812
media	276.3122	299.5793	270.0690	93.8289	59.5690	61.1319	488.1184	838.3844	507.0378	211.8647	112.2699	297.6041	3515.7699
desvest	438.1576	362.9238	425.3278	94.4140	36.9821	36.3786	247.5036	425.3223	228.2160	197.6904	87.8263	612.6102	1506.1934
coefasim	2.8966	1.6267	2.7068	2.7858	0.9365	1.0398	1.0016	1.4431	0.2192	1.5528	1.2754	4.3607	1.5477
rs+1,j	0.6225	0.6739	0.6521	0.7852	0.5815	-0.0165	0.3364	0.2348	0.2932	0.5001	0.1068	0.4282	

Errores cuadráticos Archivo: SU4P.AJU				
i	Tr	Dato	Calculado	Error <sup>2</sup>
1	26	10162.45	10059.91	10514.78
2	13	7518.62	7306.38	45044.65
3	8.67	4820.69	5754.64	872262.58
4	6.5	4811.1	4949.38	19121.05
5	5.2	4729.65	4476.57	64051.26
6	4.33	4016.28	4151.82	18371.54
7	3.71	3988.9	3905.	7039.75
8	3.25	3780.75	3704.94	5747.6
9	2.89	3773.45	3535.49	56625.51
10	2.6	3593.43	3387.3	42488.64
11	2.36	3493.35	3254.51	57046.46
12	2.17	3196.5	3133.16	4012.55
13	2.	3085.77	3020.41	4272.25
14	1.86	3003.38	2914.13	7964.95
15	1.73	2916.29	2812.64	10742.45
16	1.63	2880.99	2714.5	27719.6
17	1.53	2747.65	2618.4	16704.28
18	1.44	2579.42	2523.1	3171.84
19	1.37	2571.08	2427.23	20693.33
20	1.3	2438.42	2329.18	11934.39
21	1.24	2273.45	2226.83	2173.08
22	1.18	1793.98	2117.05	104372.23
23	1.13	1713.17	1994.45	79120.2
24	1.08	1485.84	1847.9	131087.27
25	1.04	1396.93	1644.54	61308.47

**Parámetros estadísticos de la muestra:**

$\mu = 3550.862$     $\sigma = 1902.203$     $\gamma = 2.107$     $\kappa = 8.779$

Figura 4. Datos históricos y calculados

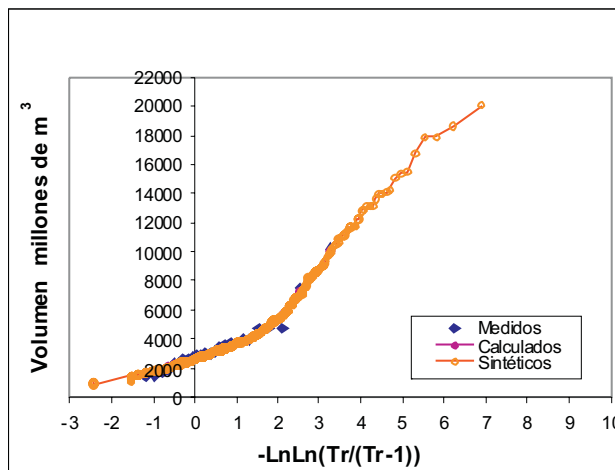


Figura 5. Función Doble Gumbel, datos históricos y calculados. 1000 datos sintéticos generados

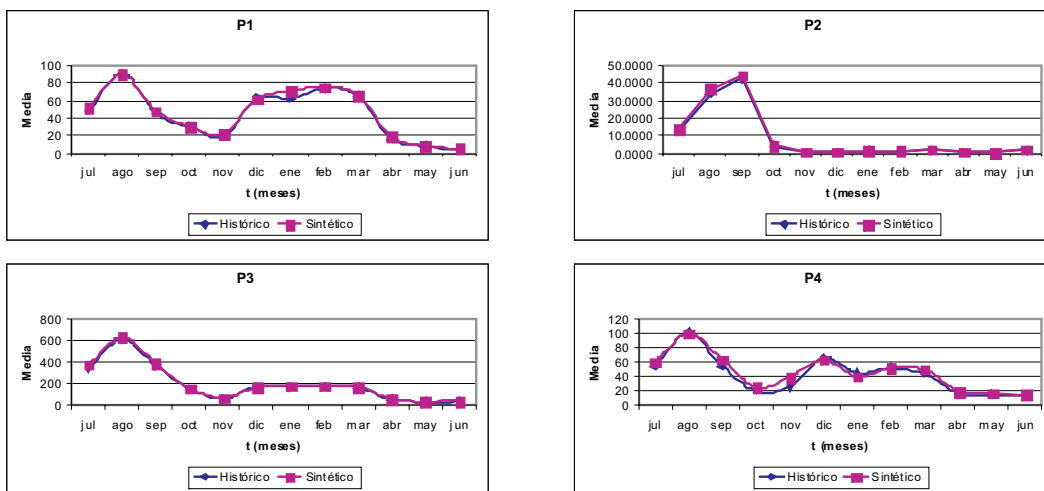


Figura 6. Comparación de las medias (hm³)

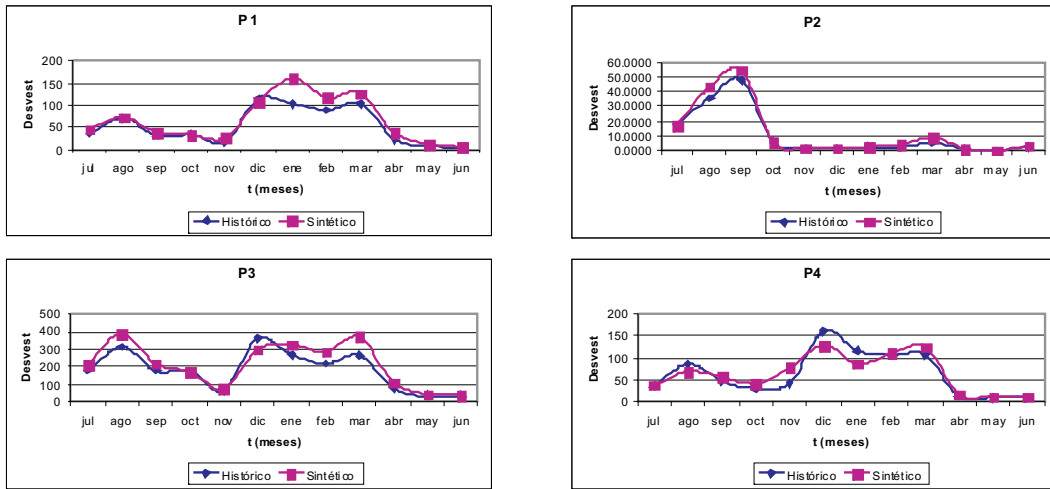


Figura 7. Comparación de las desviaciones estándar ( $hm^3$ )

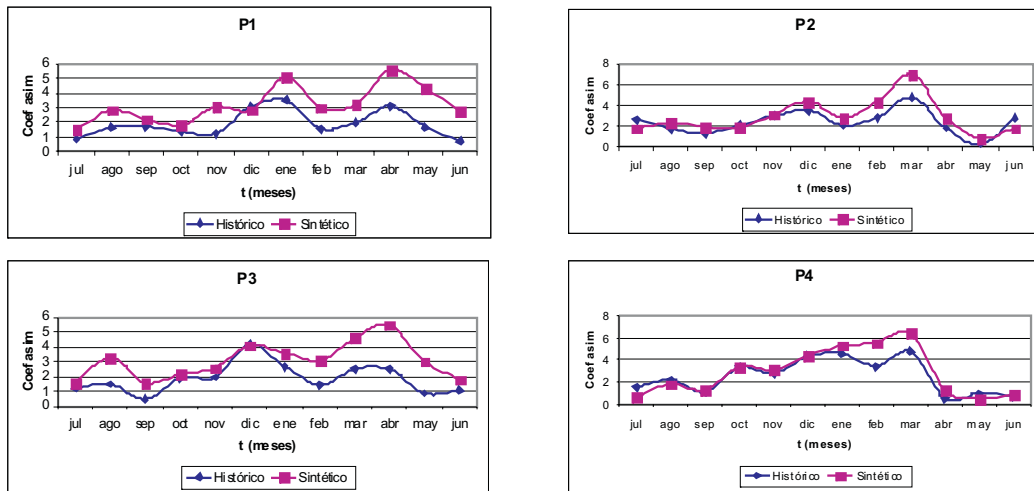


Figura 8. Comparación de los coeficientes de asimetría

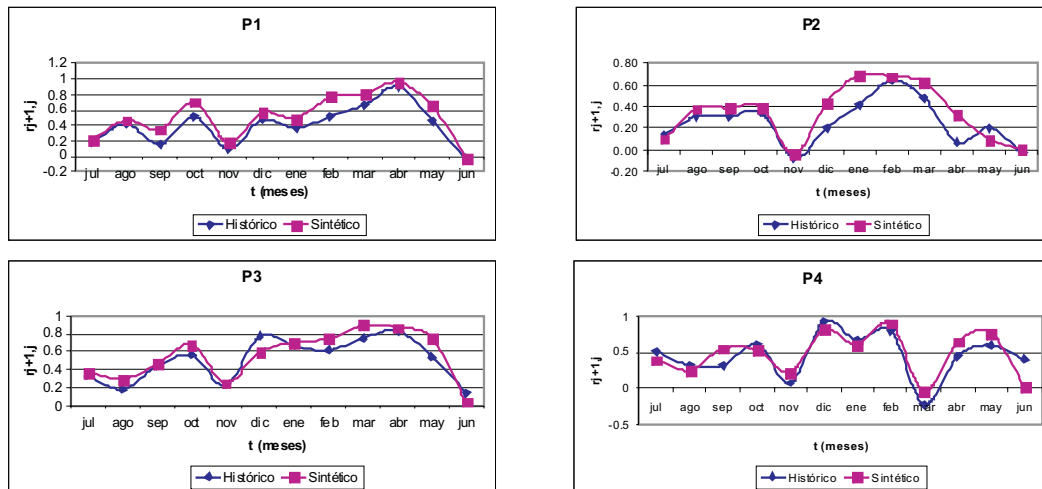


Figura 9. Comparación de los coeficientes de autocorrelación

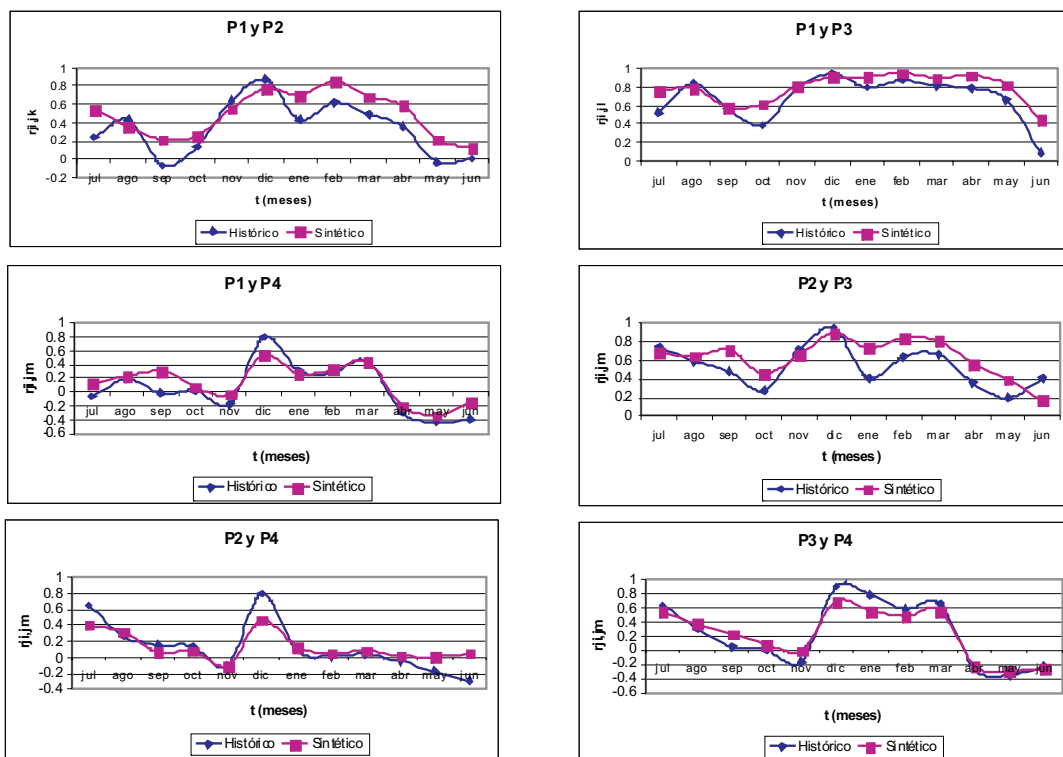


Figura 10. de los coeficientes de correlación cruzada

## Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos se puede concluir que el método de Svanidze modificado en la selección de años aleatorios es una herramienta útil y práctica en la determinación de muestras sintéticas de los ingresos por cuenca propia de un sistema de presas conectadas. Los estadísticos obtenidos preservan adecuadamente los de las series históricas; en particular, cabe destacar una muy buena concordancia entre los coeficientes de asimetría obtenidos al modificar la selección de los años aleatorios; se preservaron las autocorrelaciones y las correlaciones cruzadas, lo que no sucedía al aplicar al método en su forma tradicional a series de tiempo caracterizadas por estar sujetas a eventos extraordinarios de tipo invernal.

## Agradecimientos

Se agradece a la M. I. Gabriela Esquivel Garduño su colaboración en el diseño de imágenes en ambiente Arc View.

## Referencias

Aparicio M.F.J. *Fundamentos de hidrología de superficie*. México. Limusa. 1989.

Domínguez M.R., Fuentes M.G. y Arganis J.M.L. *Procedimiento para generar muestras sintéticas de series periódicas mensuales a través del Método de Svanidze modificado aplicado a los datos de las presas La Angostura y Malpaso*. Series Instituto de Ingeniería. C1-19. 2001.

Domínguez M.R., Fuentes M.G.E. y Arganis J.M.L. Generación de muestras sintéticas de volúmenes de escurrimiento mensual de las presas La Angostura y Malpaso, Chiapas, utilizando el Método de Svanidze Modificado. XX Congreso Latinoamericano de Hidráulica., Ciudad de La Habana. 2002.

Escalante S.C.A y Reyes C.L. *Técnicas estadísticas en hidrología*. México. Facultad de Ingeniería, UNAM. 2002.

González V.F.J. *Contribución al análisis de frecuencias de valores extremos de los gastos máximos en un río*. México. Instituto de Ingeniería. Serie Azul. No. 277. 1970.

Jiménez E.M. Programa AX. Área de riesgos hidrometeorológicos. Centro Nacional de Prevención de Desastres. México. 1996,

Salas J.D., Delleur J.W., Yevjevich y Lane W.L. *Applied Modeling of Hydrological Time Series*. USA. Water Resources Publications. 1988.

Svanidze G.G. *Mathematical Modeling of Hydrologic Series*. USA. Water Resources Publications. 1980.

Yurekly K., Kurunk A. y Simsek H. Prediction of Daily Maximum Streamflow Based on Stochastic Approaches. *Journal of Spatial Hydrology*, 4(2), 2004

---

## Semblanza de los autores

*Ramón Domínguez-Mora*. Egresado de la Facultad de Ingeniería, UNAM con maestría y doctorado. Se desempeña como investigador titular en la Coordinación de Hidráulica del Instituto de Ingeniería de la UNAM, así como profesor del Posgrado de Ingeniería de la misma institución. Ha realizado amplios trabajos en material de hidrología superficial, hidrología urbana y aprovechamientos hidráulicos.

*Maritza L. Arganis-Juárez*. Es egresada de la Facultad de Ingeniería, UNAM con maestría y doctorado. Actualmente es investigador asociado de la Coordinación de Hidráulica del Instituto de Ingeniería de la UNAM y profesora de asignatura definitiva de la Facultad de Ingeniería, UNAM. En 1993, inició su colaboración con esta institución como profesora de física en la Escuela Nacional Preparatoria; actualmente realiza investigaciones en el área de aprovechamientos hidráulicos e hidrología.

## Efecto de la imidazolina [IM-NH17] en el proceso de corrosión del acero api5l-x52 en salmueras acidificadas

### *Effect of an Imidazoline [IM-NH17] on the Corrosion Process of API5L-X52 Steel Exposed in Acidified Brines*

A.G. Reynaud- Morales

*Centro de Investigación en Materiales Avanzados,  
Chihuahua, Chihuahua, México.  
E-mail: adriana.reynaud@gmail.com*

M. Casales-Díaz

*Centro de Ciencias Físicas, UNAM.  
Cuernavaca, Morelos, México.  
E-mail: Casales-Díaz..mcasales@fis.unam.mx*

J.G. Chacón-Nava

*Centro de Investigación en Materiales Avanzados,  
Chihuahua, Chihuahua, México.  
E-mail (autor para correspondencia): jose.chacon@cimav.edu.mx*

L. Martínez-Gómez

*Centro de Ciencias Físicas, UNAM.  
Cuernavaca, Morelos, México.  
E-mail: lmg@corrosionyproteccion.com*

A. Martínez-Villafañe

*Centro de Investigación en Materiales Avanzados,  
Chihuahua, Chihuahua, México.  
E-mail: martinez.villafane@cimav.edu.mx*

J.G. González-Rodríguez

*Universidad Autónoma del Estado de Morelos,  
FCQI-CIICAP, Cuernavaca, Morelos, México.  
E-mail: ggonzalez@uaem.mx*

(Recibido: octubre de 2007; aceptado: septiembre de 2008)

#### **Resumen**

Se estudia la eficiencia de inhibición del compuesto Imidazolina Aminoetil Oleica [IM-NH17]) en la corrosión de un acero API5L-X52 en tres soluciones de salmuera acidificada a pH 3 a una temperatura de 50°C, empleando pruebas de polarización potenciodinámica y mediciones de resistencia de polarización. Bajo las condiciones de prueba, los resultados de curvas de polarización indicaron que el inhibidor se comporta como un inhibidor de tipo mixto. Los resultados de resistencia de polarización lineal mostraron un incremento en los valores de  $R_p$  para las soluciones con



inhibidor en comparación con el valor registrado para la solución de referencia sin inhibidor. Así, se encontró que la eficiencia del inhibidor aumenta en el rango de 12.5 ppm a 25 ppm. También, de los resultados se deriva que el modelo de isoterma de Langmuir es el mecanismo de adsorción que mejor se ajusta al presente sistema.

**Descriptores:** Acero X-52, imidazolinas, resistencia de polarización, polarización potenciodinámica, isoterma de adsorción.

#### Abstract

*The inhibition effect of an aminoethyl oleic imidazoline [IM-NH17]) on the corrosion of API5L-X52 steel in acidified 5% NaCl pH 3 solutions at 50°C was studied via electrochemical methods, i.e. potentiodynamic polarization tests and linear polarization resistance measurements. Polarization curves revealed that, under the test conditions, the inhibitor performs as a mixed type inhibitor. Linear Polarization Resistance measurements showed an increase in  $R_p$  values for inhibitor containing solutions as compared with the blank solution. The results revealed that the inhibitor efficiency increases with inhibitor concentration in the range from 12.5 ppm to 25 ppm. From the electrochemical results, it was found that the adsorption mechanism that better fits the present system follows the Langmuir isotherm model.*

**Keywords:** X-52 steel, imidazoline, linear polarization resistance, potentiodynamic polarization, adsorption isotherm.

## Introducción

Durante las dos últimas décadas se ha tenido un aumento considerable en la investigación y desarrollo de nuevos inhibidores de corrosión de baja toxicidad (Hackerman y Snavely, 1984, Bentiss *et al.*, 1999 y 2004). Esfuerzos en todo el mundo han sido encaminados a la búsqueda de compuestos más adecuados que cumplan con las restricciones impuestas a sustancias peligrosas. En general, los inhibidores de corrosión encuentran un amplio campo de aplicación prácticamente en todo tipo de industrias. En particular, compuestos base imidazolinas tienen amplia aplicación en la industria petrolera en operaciones de producción, transporte y refinación de hidrocarburos (Bondareva *et al.*, 2004), así como también en la industria de procesos químicos donde formulaciones ácidas (HCl, ácidos orgánicos etc.) son ampliamente usadas para remover encostramiento por acumulación de óxidos o sales en los equipos de proceso (Baril *et al.*, 2000, Edwards *et al.*, 1994, Kreuser *et al.*, 1997).

Hoy en día, compuestos orgánicos base nitrógeno se cuentan entre los de mayor uso como inhibidores de corrosión para algunas de las aplicaciones mencionadas. Algunas opciones para tener menores niveles de toxicidad implican el uso de compuestos tales como los alifáticos formadores de película, las aminas aromáticas así como las imidazolinas (Gough *et al.*, 2002). Así, a fin de tener un mejor entendimiento de las características de

baja toxicidad y comportamiento de inhibidores a un costo aceptable, se requiere una mejor comprensión del mecanismo de inhibición. Es generalmente aceptado que la inhibición de compuestos tales como imidazolinas resulta de la adsorción de películas del inhibidor sobre la superficie metálica (Cruz *et al.*, 2004). La adsorción de esas moléculas sobre la superficie del acero al carbono ocurre por transferencia de carga parcial entre la molécula y el metal, formando un enlace covalente. En moléculas N-heterocíclicas, esta transferencia de carga es promovida por el par de electrones solitarios presentes en los átomos de hidrógeno de la molécula orgánica (Edwards *et al.*, 1994, Morales *et al.*, 2004). Otra forma de adsorción tiene lugar vía atracción electrostática entre un átomo de hidrógeno cargado positivamente y la superficie metálica cargada negativamente. Diversos autores (Bahadur, 1993, Edwards *et al.*, 1994, Morales *et al.*, 2004) han estudiado diferentes aspectos estructurales de imidazolinas y sus mecanismos de adsorción e inhibición, p. ej. a) el efecto de la longitud de la cadena hidrofóbica (cola), b) la química del grupo principal (anillo imidazolina), y c) la hidrólisis de la imidazolina.

No obstante, el importante trabajo reportado en la literatura sobre el efecto inhibidor de imidazolinas en la corrosión de los aceros al carbono, requiere de más información en algunos aspectos. Luego entonces, el objetivo del presente trabajo es investigar las propiedades de

inhibición de una imidazolina de tipo oleico empleada usualmente en ambientes ácidos, así como su probable mecanismo de protección mediante el uso de parámetros termodinámicos y datos de cinética de adsorción. La información generada es importante porque contribuye al conocimiento sobre el tipo particular de protección al metal y su eficiencia frente a la corrosión para un tipo específico de acero al carbono muy empleado en la industria petroquímica.

### Procedimiento experimental

Se prepararon muestras rectangulares (1 cm x 1 cm x 0.5 cm) de un acero API5L-X52 para ser empleadas como electrodos de trabajo en las mediciones electroquímicas. La composición del acero empleado se presenta en la tabla 1.

Las muestras fueron montadas en resina epóxica y desbastadas con lija de SiC desde grado 300 hasta grado 1200, lavando la superficie de trabajo con agua bidestilada, desengrasando con acetona y secando con una corriente de aire caliente antes de efectuar las pruebas. El electrolito empleado consistió en una solución de NaCl (grado analítico) al 5% acidificada a un pH=3 con una solución de HCl (~0.2 M, preparada con reactivo grado analítico). Esta solución fue usada como blanco para propósitos de comparación de resultados. Para preparar las soluciones conteniendo inhibidor, se empleó agua desmineralizada. En este estudio una imidazolina aminoetil oleica [IM-NH17] (Lakeland Labs., se empleó como inhibidor de corrosión.

Se emplearon dos concentraciones de inhibidor: 12.5 ppm y 25 ppm. En cada experimento se hizo uso de solución fresca. Una celda estándar de vidrio (0.5 Lt) de cuatro bocas fue empleada en los experimentos. Las mediciones electroquímicas se realizaron empleando un potenciostato/galvanostato ACM Instruments acoplado a una PC con el software asociado para adquisición y análisis de datos. Un arreglo convencional de tres electrodos fue empleado: muestras de acero API5L-X52 (con área expuesta de aproximadamente 1 cm<sup>2</sup>) como electrodo de trabajo (ET); un electrodo de calomel saturado como electrodo de referencia (SCE) y una barra de

grafito como contraelectrodo (CE). Las mediciones, empleando la técnica de resistencia de polarización lineal (RPL), se llevaron a cabo aplicando un pequeño barrido de potencial de -10 mV a + 10 mV alrededor del potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ) a una velocidad de barrido de 1.5 mVs<sup>-1</sup>. Se obtuvieron curvas de polarización en un rango de -1000 mV a +350 mV a una velocidad de barrido de 1.5 mVs<sup>-1</sup>.

En todos los casos, las mediciones se efectuaron a una temperatura de 50 °C (323.16 K), la cual fue controlada usando una mantilla de calentamiento digital y un termómetro.

A fin de determinar el mecanismo de adsorción del inhibidor empleado (IM-NH17) sobre el acero API5L-X52, se efectuó un ajuste mediante regresión lineal empleando valores de cobertura superficial ( $\theta$ ). Este valor fue estimado de los resultados de densidad de corriente obtenidos de las pruebas potenciodinámicas, asumiendo un proceso de corrosión uniforme en el electrodo de trabajo. Una vez que se tiene la isoterma más adecuada, la constante de adsorción,  $K_{ad}$  puede ser estimada, y por tanto, también la energía libre de adsorción de Gibbs ( $\Delta G_{ad}^{\circ}$ ) dada por:

$$\Delta G_{ad}^{\circ} = RT \cdot \ln(K_{ad}), \quad (1)$$

donde  $R$  es la constante ideal de los gases ( $8.314 \times 10^{-3}$  kJmol<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>) y  $T$  es la temperatura absoluta en °K.

## Resultados y discusión

### Curvas de polarización

La figura 1 muestra las curvas de polarización obtenidas durante un tiempo de inmersión de 4 hr. Aquí, se observa que la adición de inhibidor (IM-NH17) produce los siguientes efectos: primero, la adición y posterior incremento de la concentración de inhibidor produce un cambio considerable hacia valores menores de densidad de corriente; segundo, los potenciales de corrosión de las soluciones con inhibidor cambian hacia valores más nobles, siendo esto indicativo del carácter anódico del inhibidor.

Tabla 1. Composición química del acero API5L-X52 (% peso)

C	P	Mn	S	V	Ti	Fe
0.31	0.04	1.35	0.05	0.02	0.03	Ba

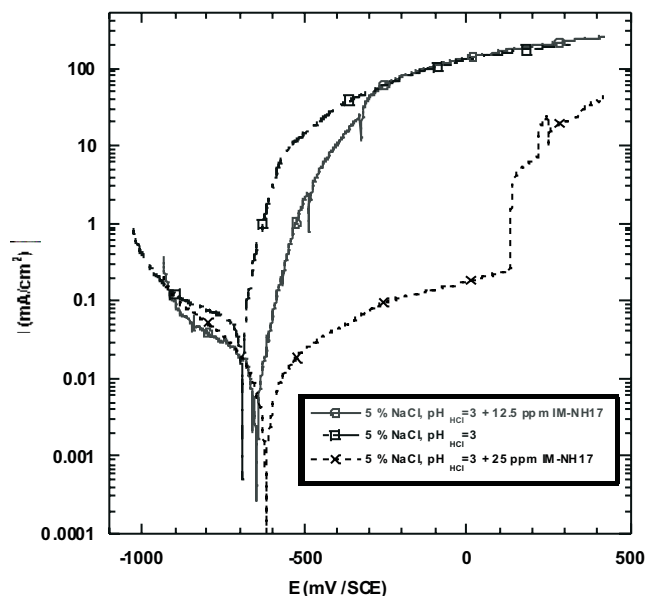


Figura 1. Curvas de polarización obtenidas para el acero API5L-X52 expuesto en las diferentes soluciones con y sin inhibidor

La eficiencia de inhibición (%E.I) para cada concentración de inhibidor fue determinada de acuerdo a la ecuación:

$$\%EI = \frac{i_{corr}^0 - i_{corr}^{inh}}{i_{corr}^0} \times 100 \quad (2)$$

donde  $i_{corr}^0$  e  $i_{corr}^{inh}$  son los valores de densidad de corriente en ausencia y con inhibidor, respectivamente.

Los parámetros electroquímicos obtenidos de las curvas de polarización se tienen en la tabla 2. Para la concentración de 12.5 ppm la curva anódica exhibe un valor de pendiente anódica  $\beta_A$  similar al obtenido por la solución de referencia (sin inhibidor) a bajos sobrepotenciales (de  $E_{corr}$  a  $\sim -500$  mV). A mayores sobrepotenciales (de  $\sim -500$  a  $\sim -300$  mV) el valor de la pendiente es aún mayor, pero menor que la pendiente correspondiente a la solución de referencia. A sobrepotenciales del orden de  $-250$  mV y por arriba, la curva anódica se une a la correspondiente a la de la solución blanco. Aquí, este efecto podría ser atribuido a una desorción de las moléculas de IM-NH17 de la superficie metálica probablemente debido a interacciones de carga de las moléculas adsorbidas con otras moléculas de inhibidor de la solución en volumen. Estas interacciones desvían el sistema sustrato-adsorbato de las condiciones de equilibrio y serán promovidas por las altas densidades de corriente positiva producidas en sitios anódicos, ya que una parte

del número total de sitios anódicos no es cubierta por el inhibidor o productos de corrosión (liberación de iones  $Fe^{+2}$  o  $Fe^{+3}$ ), luego entonces, el valor de  $(\theta)$  no será un máximo (Frenier, 1998, Jovancevic *et al.*, 1999, Baril *et al.*, 2000). Por otra parte, a una concentración de inhibidor de 25 ppm, se observó la menor densidad de corriente anódica y el valor de la pendiente  $\beta_A$  fue el más alto en las regiones de sobrevoltaje bajo y medio (desde  $E_{corr}$  a  $\sim -300$  mV), con una pendiente prácticamente igual a la de la solución blanco a valores de potencial más positivos que  $-250$  mV. A esta concentración de inhibidor, valores bajos de densidad de corriente se observaron en todo el barrido anódico. Este efecto hace pensar que, en este caso, el equilibrio de adsorción se mantiene, debido a la formación de una película de IM-NH17 y alguna cantidad de productos de corrosión. Esta película debe mantener el equilibrio de adsorción del sistema de ser perturbado por cualquier interacción de carga, reduciendo la magnitud de corriente positiva. A 25 ppm de inhibidor, la máxima cobertura superficial  $(\theta)$  se alcanza, dado el importante papel que tiene la formación de productos de corrosión a esta concentración. Este hecho es soportado por la observación de que a 25 ppm de inhibidor productos de corrosión con características protectoras se forman con mayor rapidez (como lo denotan los valores más altos de  $\beta_A$ ) al comienzo de la polarización anódica. Entonces, para este tipo de solución, la concentración óptima de inhibidor debe estar

alrededor de 25 ppm (Luo *et al.*, 1998, Jovancicevic *et al.*, 1999). A esta concentración de IM-NH17, las curvas de polarización sugieren que la eficiencia de inhibidor observada puede ser relacionada con la marcada inhibición del proceso anódico (disolución del metal) y el proceso catódico (evolución de hidrógeno). Los resultados del presente trabajo corresponden bien con el estudio de Szyprowski (2000), donde se reporta que para acero al carbono 1020 y acero inoxidable 304 en una solución de NaCl al 2% y varios tipos de imidazolinas a 40°C, los inhibidores mostraron la mayor eficiencia de protección a una concentración de 25 ppm.

La figura 2 muestra un esquema del mecanismo de absorción del IM-NH17 en el dominio anódico. Este mecanismo puede darse como sigue: la molécula de inhibidor se fija en los iones  $Fe^{+3}$  o  $Fe^{+2}$  de la red cristalina del óxido de la superficie metálica por medio de los átomos de nitrógeno del anillo de imidazolina sin atar ninguna cadena exterior N3, como ha sido propuesto por (Edwards *et al.*, 1994, Ramachandran *et al.*, 1997, Ramachandran *et al.*, 1999). Luego, el átomo N3 comparte su par de electrones con los iones férrico o ferroso de la superficie porosa del óxido.

La tendencia mostrada por las curvas catódicas indica que el efecto de inhibición no fue tan marcado como en la región anódica y sólo pequeñas diferencias fueron notadas en las soluciones conteniendo inhibidor. Sin embargo, un cambio en la pendiente catódica,  $\beta_c$ , se observó en comparación con la solución blanco: la reacción de descarga protónica parece disminuir con la adición de inhibidor a la solución. El valor más bajo de  $\beta_c$  fue obtenido a una concentración de 25 ppm (tabla 2). Para explicar esto, la siguiente hipótesis es propuesta: en los sitios catódicos la molécula de inhibidor se hace catiónica mediante el enlace de un ion  $H^+$  donando el par de electrones no compartidos del átomo de nitrógeno en el grupo funcional de la cadena amino-etílica (N8). Esta reacción de protonación se muestra en la figura 3.

Una vez que esta reacción tiene lugar, la molécula IM-NH17- $H^+$  es unida a la superficie del metal cargada negativamente, formando una película protectora, bloqueando sitios anódicos activos y limitando el transporte de iones  $H^+$  o moléculas de  $O_2$  en la superficie metálica. En soluciones que contienen altas concentraciones de iones  $Cl^-$ , como en el presente estudio, es razonable asumir que la superficie cargada negativamente consiste de iones  $Cl^-$  adsorbidos.

Tabla 2. Parámetros electroquímicos y E.I.% obtenidas de las mediciones de polarización potenciodinámica para el acero API5L-X52 expuesto a las diferentes soluciones base NaCl 5%

Solución	$E_{corr}$ (mV vs. SCE)	$i_{corr}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$\beta_a$ (mV/dec)	$\beta_c$ (mV/dec)	E.I. (%)
5% NaCl, (Blanco)	-700	0.060	100	450	--
5% NaCl, + 12.5 ppm IM-NH17	-650	0.015	85	400	75.0
5% NaCl, + 25 ppm IM-Nh17	-620	0.010	400	240	83.3

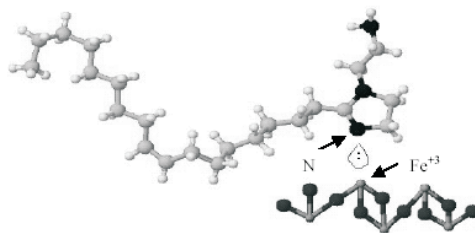


Figura 2. Molécula de IMNH-17 unida a la superficie metálica por medio de un enlace Fe-N

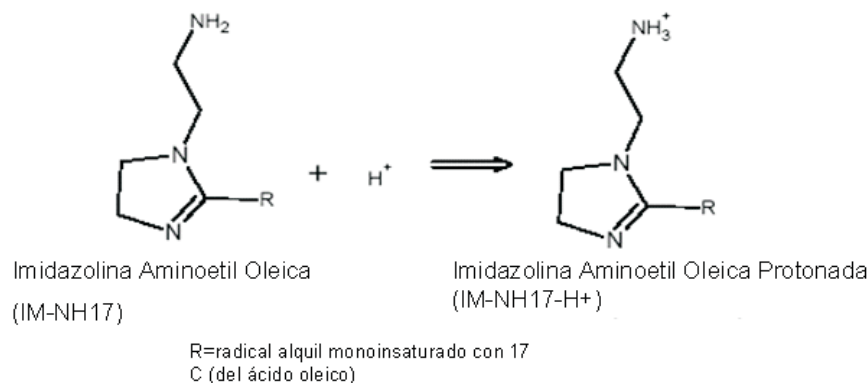


Figura 3. Reacción de protonación del inhibidor IM-NH17

### Resistencia de polarización lineal

Esta técnica representa un medio conveniente para estimar velocidades de corrosión cuando las pendientes de Tafel  $\beta_a$  y  $\beta_c$  son medidas o estimadas de resultados de la literatura para materiales en condiciones similares de exposición a un medio ambiente específico. Una ventaja importante de esta técnica es el evitar perturbación del sistema (polarización) en un amplio rango de potenciales. Así, dentro de un rango de  $\pm 15$  mV del potencial libre de corrosión, se conoce que la densidad de corriente aplicada es una función lineal del potencial de electrodo (Stern and Geary, 1957). Entonces, la pendiente de  $(dE/di)$  se conoce como la resistencia de polarización,  $R_p$ , relacionándose con los parámetros del sistema en la forma:

$$\frac{dE}{di} = R_p = \frac{\beta_a \beta_c}{2.3(\beta_a + \beta_c) i_{corr}} \quad (3)$$

donde  $\beta_a$  y  $\beta_c$  son las pendientes de Tafel anódica y catódica (en  $\text{mVdec}^{-1}$ ) respectivamente,  $i_{corr}$  es la densidad de corriente de corrosión en  $\text{mAcm}^{-2}$  y  $R_p$  es la resistencia de polarización en  $\Omega\text{cm}^2$ .

Esta es la ecuación de Stern-Geary, ampliamente usada para estimar el valor de  $i_{corr}$ . Dado que no es posible obtener las pendientes de Tafel por este método, en el presente trabajo estos valores fueron derivados de las curvas de polarización potenciodinámicas, ver tabla 2. Luego entonces, una vez determinando el valor de  $R_p$ , es posible calcular el valor de  $i_{corr}$ . En general, los valores estimados  $i_{corr}$ , así como los valores de eficiencia de inhibidor (%E.I.) están de acuerdo con los valores calculados de las curvas de polarización (tabla 2). Para la solución con 12.5 ppm de IM-NH-17, los datos de la tabla 3 indican que el valor de  $R_p$  es casi 4 veces mayor que el

medido para la solución blanco y casi 3 veces menor que para la solución con 25 ppm de inhibidor. A esta última concentración, el alto valor de  $R_p$  y el bajo valor de  $\beta_c$  contribuyen a tener un valor alto de la pendiente anódica  $\beta_a$ , con un efecto general de un decremento en la velocidad de corrosión ( $i_{corr}$ ). De manera general, podemos decir que los datos obtenidos de RPL y curvas de polarización son consistentes entre sí (tablas 2 y 3). Los valores de eficiencia calculados para el inhibidor aquí empleado coinciden bien con los resultados para imidazolinas sobre acero al carbono 1018, presentados por Zhao *et al.* (2004).

### Mecanismo de adsorción

Por mucho tiempo se ha pensado que los mecanismos de inhibición de corrosión por moléculas orgánicas (p.ej. aminas, imidazolinas, mercaptanos, etc) ocurren vía el fenómeno de adsorción (Hackerman *et al.*, 1984, Zvaya *et al.*, 1994, Ramachandran *et al.*, 1997). Así, diferentes modelos de isotermas de adsorción tales como la isoterma de Frumkin, la isoterma de Langmuir y la isoterma de Temkin han sido propuestos (Zvaya *et al.*, 1994). Las ecuaciones correspondientes para cada modelo son:

$$\text{Isoterma de Temkin:} \quad K_{ad} C = e^{f\theta} \quad (4)$$

$$\text{Isoterma de Langmuir:} \quad K_{ad} C = \frac{\theta}{1-\theta} \quad (5)$$

$$\text{Isoterma de Frumkin:} \quad K_{ad} C = \left( \frac{\theta}{1-\theta} \right) e^{f\theta} \quad (6)$$

Donde  $K_{ad}$  es la constante de equilibrio de adsorción,  $C$  es la concentración de inhibidor,  $f$  es la constante de

interacción molecular y  $\theta$  es la cobertura superficial. A fin de ligar un ion  $\text{Fe}^{+2}$  o  $\text{Fe}^{+3}$ , cualquier sustancia polar debe desplazar moléculas de agua de la superficie metálica (Kreuser *et al.*, 1997, Morales *et al.*, 2004). Este es el caso de la imidazolina, dado por la siguiente reacción que describe el equilibrio de adsorción para el inhibidor IMNH-17 en la forma.



Ahora bien, para determinar la isoterma de adsorción que mejor se ajuste a nuestro sistema, debemos asumir que un proceso de corrosión uniforme ocurre en el electrodo de trabajo. Entonces, la velocidad de corrosión para las muestras en solución con inhibidor deberá ser igual al número de especies activas que permanecen sin obstruir o sin bloquear después de que ocurre la adsorción de moléculas del inhibidor. La cobertura superficial,  $\theta$ , puede entonces ser calculada por la ecuación (Atkins, 1980, Altura y Nobe, 2004):

$$\theta = \frac{i_{\text{corr}}^0 - i_{\text{corr}}^{\text{inh}}}{i_{\text{corr}}^0} \quad (7)$$

donde  $i_{\text{corr}}^0$  y  $i_{\text{corr}}^{\text{inh}}$  son los valores de densidad de corriente en ausencia y en presencia de inhibidor, respectivamente.

Una vez calculados los valores de  $\theta$  a cada concentración de inhibidor, se efectuó un análisis de regresión lineal para esos datos. De la figura 4 se observa

fácilmente que el modelo de Langmuir (ecuación 5) parece ser el más adecuado a nuestros datos experimentales. A fin de confirmar esto, se graficó la forma linealizada de la ecuación 6 usando datos de varias corridas experimentales incluyendo una nueva concentración más alta de inhibidor, es decir, 37.5 ppm.

Esta concentración de inhibidor dio como resultado un valor de  $\theta$  de  $\sim 0.8416$ , es decir, ligeramente por arriba del obtenido para 25 ppm ( $\sim 0.833$ ). De los resultados de la figura 5 podemos decir que el caso más general (isoterma de Frumkin) puede ser rechazado, dado que el valor de  $f$  se aproxima a cero (Baril *et al.*, 2000). Entonces, los datos pueden ajustarse bien a la isoterma de adsorción de Langmuir, obteniendo un coeficiente de correlación de  $R^2 = 0.986$ . Herrag (2007) en su trabajo con derivados de alquil aminas en solución ácida también ha reportado que la isoterma de adsorción que mejor se ajusta a sus datos experimentales de pérdida de peso es el modelo de isoterma de Lagmuir.

Para nuestro sistema, (acero API5L-X52-IM-NH17), la figura 4 muestra el valor derivado de la constante de adsorción ( $K_{ad}$ ). Este valor es la pendiente inversa en la ecuación de la línea recta correspondiente al ajuste de los datos experimentales (obtenidos de  $i_{\text{corr}}^0$  y  $i_{\text{corr}}^{\text{inh}}$ ) con el modelo de Langmuir (ecuación 4). De los valores  $K_{ad}$  y la ecuación 1, se calculó un valor de energía libre de adsorción  $\Delta G_{ad}^0 \approx -30 \text{ kJmol}^{-1}$  y este valor nos indica un proceso de adsorción espontánea del inhibidor sobre la superficie metálica. El valor calculado para  $\Delta G_{ad}^0$  corresponde bien con el valor reportado recientemente por Durnie *et al.* (2005).

Tabla 3. Parámetros electroquímicos y E.I.% obtenidas de las mediciones de resistencia de polarización lineal para el acero API5L-X52 expuesto a las diferentes soluciones base NaCl 5%

Solución	$E_{\text{corr}}$ (mV vs. SCE)	$R_p$ ( $\Omega\text{cm}^2$ )	$i_{\text{corr}}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	E.I. (%)
5% NaCl, (Blanco)	-702	565	0.0629	--
5% NaCl, + 12.5 ppm IM-NH17	-653	2146	0.0142	77.4
5%NaCl, + 25 ppm IM-Nh17	-625	6097	0.0107	82.9

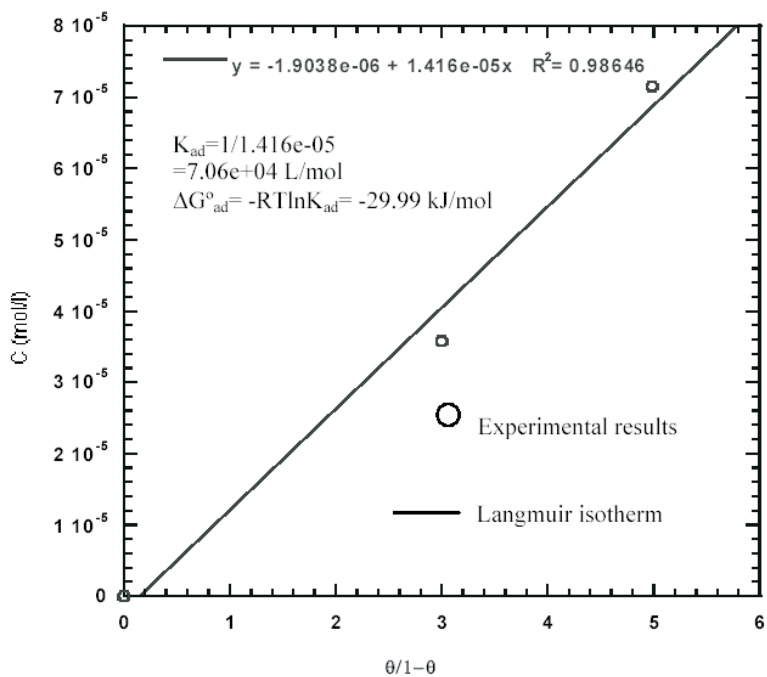


Figura 4. Resultados experimentales de la isoterma de adsorción para el inhibidor IM-NH17 a dos concentraciones (12.5 ppm =  $3.58 \times 10^{-5} \text{ M}$ , y 25 ppm =  $7.16 \times 10^{-5} \text{ M}$ ) en un acero API5L-X52

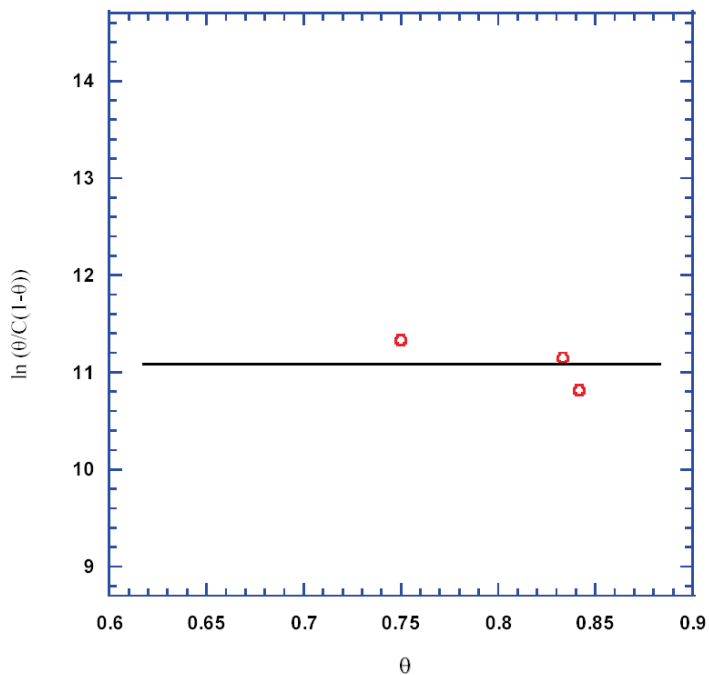


Figura 5. Gráfico de resultados experimentales de la isoterma de adsorción para el inhibidor IM-NH17 a tres concentraciones (12.5 ppm, 25 ppm y 37.5 ppm) en una solución de NaCl (5%) a pH 3

## Conclusiones

El compuesto IM-NH17 es una imidazolina aminoetil oleica que ofrece buena protección al acero API5L-X52 en soluciones acuosas de NaCl (5%) acidificadas. A una concentración de 25 ppm, la eficiencia de inhibición es del 83% bajo las condiciones del presente trabajo.

En el dominio anódico la molécula de IM-NH17 se adsorbe a la superficie metálica mediante interacciones donador-aceptor entre un átomo de nitrógeno del anillo imidazolínico y un ion férrico o ferroso del óxido formado en la superficie del acero. En el dominio catódico el efecto catiónico del compuesto IM-NH17 sugiere que la molécula se protona mediante el ataque de un ion hidrógeno de la solución. Este proceso parece ocurrir mediante la donación del par de electrones del átomo de nitrógeno en el grupo funcional aminoetil de la cadena. Después de protonarse, la adsorción del IM-NH17 será dada por interacción electrostática con la superficie metálica negativamente cargada.

El inhibidor IM-NH17 actúa bloqueando sitios activos en el metal (inhibición de tipo mixto), pero también reduciendo la cinética de descarga protónica (evolución de hidrógeno) y suprimiendo el proceso de disolución (reacción anódica).

La técnica de resistencia de polarización lineal mostró un aumento en los valores de  $R_p$  con la adición e incremento de la concentración de inhibidor. En general, los resultados derivados con esta técnica y los obtenidos de las curvas de polarización fueron concordantes entre sí.

El inhibidor de corrosión IM-NH17 se comporta de acuerdo al modelo de Langmuir, con una energía libre de adsorción de -30 kJ/mol.

## Agradecimientos

Los autores agradecen al CONACYT-México por el financiamiento para llevar a cabo este trabajo, así como la asistencia técnica de J. Lugo-Cuevas y G. Vázquez-Olvera (Cimav).

## Referencias

Altura D., Nobe K. *Corrosion*, 29:433. 1973.  
 Atkins P.W. *Chemisorbed and Physisorbed Species*. Oxford. A Textbook in Physical Chemistry University Press. 1980. Pp. 936-938.  
 Bahadur A. *Corrosion Reviews*, 11:106. 1993.  
 Baril G., Moran F., Pebere N. 9th European Symposium on Corrosion Inhibitors. Ferrara, Italy, Sept., Vol. 2, pp.849. 2000.

Bentiss F., Lagrenee M., Traisnel M., Hornez J.C. *Corrosion*, 55:968. 1999.  
 Bentiss F., Traisnel M., Vezin H., Hildebrand H.F., Lagrenee M. *Corrosion Sci.*, 46:2781. 2004.  
 Bondareva S.O., Lisitskii V.V., Yakovtseva N.I., Murinov Yu. I. *Russian Chemical Bulletin*, 53:803. 2004  
 Cruz J., Martínez R., Genesca L., García-Ochoa E. *Electroanal. Chem.*, 566:111. 2004.  
 Durnie W., De Marco R., Kinsella B., Jefferson A., Pejčić A. J. *Electrochem Soc.*, 152:B1. 2005.  
 Edwards A., Osborne C., Webster S., Klenerman D., Joseph M., Ostovar P., Doyle M. *Corrosion Sci.*, 36:315. 1994.  
 Frenier W.W. *Corrosion 98*. NACE San Diego, Cal. Paper 214. 1998.  
 Gough M.A., Durnie W.H., Auty E.K., Hedges B. *Corrosion 2002*. NACE Denver, Co., Paper 02301. 2002.  
 Hackerman N., Snavely E.S. *Corrosion Basics: An Introduction*, National Association of Corrosion Engineers, Chapter Inhibitors. 1984.  
 Herrag L. Hammouti B., Aouniti A., El Kadiri S., Touzani R. *Acta Chim Slov.*, 54:419. 2007.  
 Jovancicevic V., Ramachandran S., Prince P. *Corrosion*, 55:449. 1999.  
 Kreuser R.T., Vanlaer A., Damour A. *Corrosion 97*. NACE, New Orleans, LA., Paper 409. 1997.  
 Luo H., Guan Y.C., Han K.N. *Corrosion*, 54:721. 1998.  
 Morales-Gil P., Negrón-Silva G., Romero-Romo M., Ángeles-Chávez C., Palomar-Pardavé M. *Electrochim. Acta.*, 49:4733. 2004.  
 Ramachandran S., Jovancicevic V. *Corrosion*, 55:259. 1999.  
 Ramachandran S., Tsai B.L., Blanco M., Chen H., Tang Y., Goddard III W.A.J. *Phys. Chem. A*, 101:83. 1997.  
 Ramachandran S., Tsai B.L., Blanco M., Chen H., Tang Y., Goddard III W.A. *Langmuir*, 12:6419. 1996.  
 Stern M., Geary A.L. *Journal of Electrochemical Society*, 104:56. 1957.  
 Svauya R., Dawson J.L. *J. Appl. Electrochem.*, 24:943. 1994.  
 Szykowski A.J. *Brit. Corr. J.*, 35:155. 2000.  
 Zhao L., Teng H.K., Yang Y.S., Tan X. *Materials and Corrosion*, 55:684. 2004.



---

### Semblanza de los autores

*Adriana G. Reynaud-Morales.* Obtuvo el grado de doctora en ciencia de materiales por el Centro de Investigación en Materiales Avanzados S.C. Cursó la licenciatura en ingeniería química por la Universidad Veracruzana y tiene una maestría en cinética química aplicada a hidrocarburos por la Université Pierre et Marie Curie (Paris VI), Francia. Su interés en investigación se centra en la caracterización y efectos de inhibidores de la corrosión, así como en métodos de monitoreo de la corrosión.

*Maura Casales-Díaz.* Se desempeña como técnico académico en el Instituto de Ciencias Físicas de la Universidad Nacional Autónoma de México. Tiene la licenciatura y una maestría en ingeniería mecánica por la Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Obtuvo el doctorado en ciencia de materiales por el Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C. y trabaja en el campo de la corrosión y protección de materiales desde el 2000. Es investigadora nacional nivel I por el SNI.

*José G. Chacón-Nava.* Es investigador titular en el Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C. Su experiencia de trabajo es en las áreas de corrosión en alta temperatura, ingeniería de materiales, análisis de fallas y monitoreo de la corrosión. Es ingeniero químico por el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente, en Guadalajara, Jal. Tiene la maestría y el doctorado en ciencias de la corrosión e ingeniería por la Universidad de Manchester, Inglaterra, así como un postdoctorado en ingeniería de corrosión por la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Sus intereses en investigación incluyen métodos de protección contra la corrosión *i.e.* inhibidores de corrosión, protección catódica y recubrimientos metálicos y no-metálicos. Es investigador nacional nivel II por el SNI.

*Lorenzo Martínez-Gómez.* Es investigador titular en el Instituto de Ciencias Físicas de la Universidad Nacional Autónoma de México. Tiene los grados de licenciatura, maestría y doctorado en física por la Facultad de Ciencias de la UNAM, así como un postdoctorado en ciencia de materiales por la Universidad de Stanford, USA. Sus principales líneas de investigación se relacionan con ciencia de materiales, metalurgia y el estudio de fenómenos de corrosión y métodos de protección. Ha dirigido varios proyectos sobre corrosión microbiana, corrosión asistida por esfuerzo y efecto de inhibidores de corrosión en ductos para transporte de hidrocarburos. Es investigador nacional nivel III por el SNI.

*Alberto Martínez-Villafañe.* Es investigador titular en el Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C. Sus intereses en investigación incluyen el comportamiento de materiales en alta temperatura, recubrimientos metálicos y métodos de control de la corrosión. Tiene la licenciatura en físico-matemáticas y una maestría en ciencia de materiales por el Instituto Politécnico Nacional, así como el doctorado en ciencias de la corrosión e ingeniería por la Universidad de Manchester, Inglaterra. Es jefe del Departamento de Física de Materiales del CIMAV y consultor en corrosión del CONACYT. Es investigador nacional nivel III por el SNI.

*José G. González-Rodríguez.* Es investigador en el Centro de Investigaciones en Ingeniería y Ciencias Aplicadas de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Es licenciado en física por la Universidad Autónoma de Nuevo León. Tiene una maestría y el doctorado en ciencias de la corrosión e ingeniería por la Universidad de Manchester, Inglaterra. Actualmente es jefe del grupo de ingeniería y ciencia de materiales del CIICAp. Es investigador nacional nivel II por el SNI.

# Nonlinear Motion Control of a Rotary Wing Vehicle Powered by Four Rotors

## *Control no lineal del movimiento de un vehículo de ala rotativa impulsado por cuatro rotores*

S. Araujo-Estrada

*Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica,  
Unidad Ticomán, México.  
E-mail: leon\_re4@hotmail.com*

E. Liceaga-Castro

*Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica,  
Unidad Ticomán, México..  
E-mail: eliceagac@uk2.net*

H. Rodríguez-Cortés

*Departamento de Ingeniería Eléctrica, CINVESTAV-IPN. México.  
E-mail: hrodriguez@cinvestav.mx*

(Recibido: octubre de 2007; aceptado: marzo de 2008)

### **Abstract**

This paper presents a solution to the motion control problem for a rotary wing vehicle powered by four rotors. It is considered that the rotary wing vehicle performs an indoor low speed flight mission so that aerodynamic effects are not taken into account. The proposed controller is based on a combination of the well-known backstepping nonlinear control design technique and bounded controllers. It is shown that the resulting closed-loop dynamics evolves inside a set where singularities are avoided. Numerical simulations show the performance of the proposed controller.

**Keywords:** Nonlinear control, bounded control, unmanned aerial vehicle, rotary wing vehicle, trajectory tracking asymptotic stability.

### **Resumen**

*En este artículo se presenta una solución al problema de seguimiento de trayectorias en un vehículo de ala rotativa impulsado por cuatro rotores. Se considera que el vehículo de ala rotativa realiza una misión en un espacio cerrado con baja velocidad de manera que los efectos aerodinámicos no se toman en cuenta. Se muestra que la dinámica en lazo cerrado resultante evoluciona en un espacio en el cual no se tienen singularidades. Por medio de simulaciones numéricas se muestra el desempeño de la estrategia de control propuesta.*

**Descritores:** Control no lineal, control acotado, vehículo aéreo no tripulado, vehículo de ala rotativa, seguimiento de trayectorias, estabilidad asintótica.

### **Introduction**

In the past years there has been a steady increase in the development of sophisticated unmanned aerial vehicles (UAVs) for military and civilian applications. The UAVs have a variety of potential uses,

including local reconnaissance, fire control, and detection of intruders. Law enforcement organizations use UAVs for hostage rescue, border patrol, traffic surveillance and riot control (Davis *et al.*, 1998). The commercial success of UAVs together with the revolutionary advances in the miniaturization of computers,

sensors and mechanical actuators has posed new challenges to control engineers. Nowadays, UAVs are considered challenging benchmarks for the development of new nonlinear controllers to solve the motion control problem on existing UAV configurations and recently proposed UAV configurations (Kendoul *et al.*, 2005).

Existing UAVs can be classified mainly in two classes: rotary wing vehicles and fixed wing vehicles. For missions requiring the vehicle to remain stationary (hover) or to maneuver in tightly constrained environments rotary wing vehicles have significant advantages over fixed wing vehicles. For example, a traffic surveillance mission around buildings requires a hovering vehicle with good maneuverable characteristics. However, it is important to point out that hover flight consumes approximately twice the power of a similarly loaded fixed wing vehicle moving forward. This energy consumption difference between fixed and rotary wing vehicles is expected to be solved by new power technologies. The hope is that new power technologies will allow achieving reasonable endurance for rotary wing vehicles.

In this paper a rotorcraft powered by four non-tilting rotors known as the X4-flyer (Hamel *et al.*, 2002) or the Dragan-flyer is considered. It is assumed that the vehicle performs an indoor low speed flight mission so that aerodynamic effects are disregarded. Although disregarding aerodynamic effects is a quite restrictive assumption it is common in most of the existing literature about this rotorcraft.

Besides its practical relevance, the Dragan-flyer system is an interesting case of study, e.g. it is a six degrees of freedom mechanical system whose dynamics is described by an under-actuated twelfth order highly coupled nonlinear model.

The goal of this paper is to address and solve the trajectory tracking problem. In particular, the problem is solved by combining the backstepping technique introduced in (Sepulchre *et al.*, 1997) and the results on bounded controllers of (Kaliora *et al.*, 2001). It is important to point out that the trajectory tracking problem for this rotary wing vehicle has been addressed in (Salazar *et al.*, 2005) using a nested saturation control algorithm and in (Hamel *et al.*, 2002) using the backstepping technique. However, it is necessary to underscore that the proposed controller in this paper is different to the controller presented in (Hamel *et al.*, 2002) as the translational dynamics has a different closed-loop behavior.

The rest of the paper is organized as follows. In Section II the rotorcraft dynamical model and a precise

definition of the control problem of interest are defined. Section III is devoted to the design of the state feedback controller. In Section IV the effectiveness of the control design is shown through a series of numerical simulations. Finally, in Section V some concluding remarks are presented.

## II. The model

The rotary wing vehicle is shown in figure 1. It is powered by four non-tilting rotors attached to a rigid frame. The dynamical model of the rotary wing vehicle can be obtained as follows. Let  $Ox^e y^e z^e$  denote a right-hand inertial frame (earth frame) such that  $z^e$  points downwards into the earth and  $Ox^b y^b z^b$  a right-hand frame fixed to the centre of mass of the aircraft structure (body frame). The vehicle dynamics in the body frame is described by (Roskam, 1982)

$$\begin{aligned} m\dot{V}_{CM}^b + m\Omega \times V_{CM}^b &= F_e^b \\ I\dot{\Omega} + \Omega \times I\Omega &= M_e^b \end{aligned} \quad (1)$$

where  $m$  represents the vehicle mass,

$$V_{CM}^b = [u \ v \ w]^T$$

denotes the linear velocity of the vehicle centre of mass expressed in the body axis frame,  $\Omega = [p \ q \ r]^T$  denote the angular velocity of the body frame,  $I$  is the vehicle inertia matrix<sup>1</sup>,  $F_e^b$  represents the external applied forces expressed in the body frame and  $M_e^b$  represents the external applied moments expressed in the body frame.

In order to express the vehicle dynamics (1) referred to earth axis, it is necessary to specify the orientation of the body axis with respect to the earth frame. Considering the classical Euler yaw-pitch-roll rotation sequence. The rotation matrix that describes the orientation of the body reference frame relative to the earth frame is given by

$$R = \begin{bmatrix} c_\theta c_\psi & c_\theta s_\psi & -s_\theta \\ c_\psi s_\theta s_\phi - s_\psi c_\phi & s_\psi s_\theta s_\phi + c_\psi c_\phi & c_\theta s_\phi \\ c_\psi s_\theta c_\phi + s_\psi s_\phi & s_\psi s_\theta c_\phi - c_\psi s_\phi & c_\theta c_\phi \end{bmatrix} \quad (2)$$

where  $\eta = [\phi \ \theta \ \psi]^T$  are the Euler angles with  $\phi$  the roll angular displacement,  $\theta$  the pitch angular displacement

<sup>1</sup> As the vehicle has two symmetry axes  $I = \text{diag}\{I_{xx}, I_{yy}, I_{zz}\}$ .

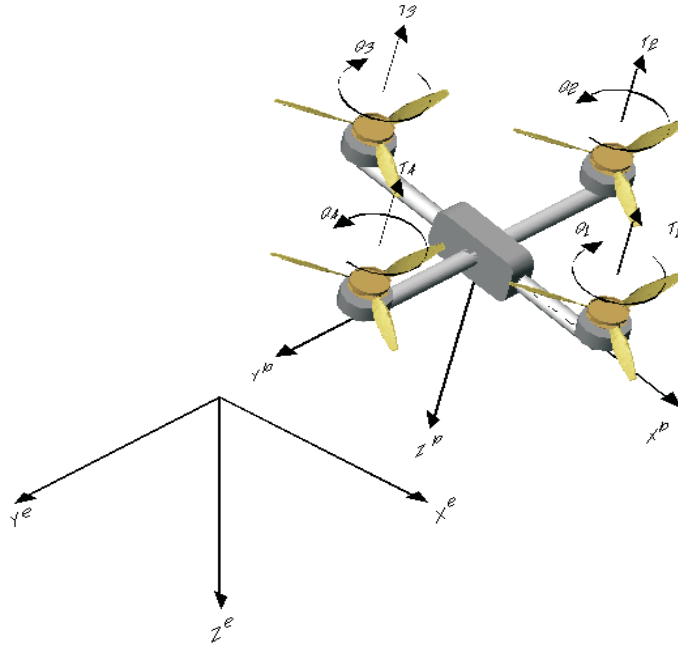


Figure 1. Rotary wing vehicle

and  $\psi$  the yaw angular displacement. Moreover,  $c_x = \cos(x)$  and  $s_x = \sin(x)$ . On the other hand, the body frame angular velocity  $\Omega$  is related to the Euler angles velocity as follows (Roskam, 1982)

$$\Omega = W\dot{\eta} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\sin(\theta) \\ 0 & \cos(\theta) & \cos(\theta)\sin(\phi) \\ 0 & -\sin(\phi) & \cos(\theta)\cos(\phi) \end{bmatrix} \dot{\eta} \quad (3)$$

From equation (2) we have that the relationship between the velocity components in the earth frame and the velocity components in the body frame is defined as

$$V_{CM}^b = R V_{CM}^e \quad (4)$$

where  $V_{CM}^e = [\dot{x} \ \dot{y} \ \dot{z}]^T$  is the linear velocity of the vehicle centre of mass expressed in the earth frame. Thus, the vehicle dynamics expressed in the earth frame can be written as

$$m \dot{V}_{CM}^e = R^T F_e^b \quad (5)$$

$$I_\eta \ddot{\eta} + W^T I \dot{W} \dot{\eta} + W^T (W \dot{\eta} \times I W \dot{\eta}) = W^T M_e^b$$

where the following facts have been considered  $R^{-1} = R^T$ ,  $\dot{R} R^T V_{CM}^b = -Sk(\Omega)V_{CM}^b$ , with  $Sk(\Omega)$  a skew

symmetric matrix such that  $\Omega \times V_{CM}^b = Sk(\Omega)V_{CM}^b$  and the new inertia matrix  $I_\eta = W^T I W$  has been introduced.

Since we are not considering aerodynamic effects, the external applied forces expressed in the body frame are the vehicle weight and the total thrust produced by the four rotors, that is,

$$F_e^b = \begin{bmatrix} -m g \sin(\theta) \\ m g \cos(\theta) \sin(\phi) \\ m g \cos(\theta) \cos(\phi) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -T_T \end{bmatrix} \quad (6)$$

where  $T_T = \sum_{i=1}^4 T_i$  with  $T_i$  the thrust of each rotor. It is shown in (Gressow *et al.*, 1978) that the thrust generated by each rotor can be expressed as

$$T_i = C_{T_i} \pi r_i^4 \rho \omega_i^2$$

where  $C_T$  is the thrust coefficient of rotor  $i$ ,  $\rho$  is the air density,  $r_i$  is the radius of rotor  $i$  and  $\omega_i$  is the angular velocity of rotor  $i$ .

The external applied moments in the body frame are defined as follows. The pitching motion is actuated by the moment around  $y^b$  produced by increasing the thrust of rotor 1 and reducing the thrust of rotor 3. The roll movement is generated in a similar way, that

is, by producing a differential thrust between rotors 2 and 4. Due to the torque applied to the rotor shaft by the motors a reaction torque of the same magnitude but opposite direction is experienced on the structure of the vehicle. By manipulating these reaction torques it is possible to control the yaw moment. Finally, the external applied moment is given by

$$M_e^b = \begin{bmatrix} L \\ M \\ N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (T_3 - T_1) \ell \\ (T_2 - T_4) \ell \\ \sum_{i=1}^4 Q_i \end{bmatrix} \quad (7)$$

where  $\ell$  is the distance between the rotor rotation axis and the aircraft centre of mass and  $Q_i$  is the reaction moment produced by rotor  $i$ . The reaction moment is given as (Gressow *et al.*, 1978)

$$Q_i = C_{Q_i} \pi r_i^5 \rho \omega_i^2$$

As shown in (Hamel *et al.*, 2002) there exist a globally defined change of coordinates from

$$[-T_T \ L \ M \ N]^T \text{ to } [\omega_1^2 \ \omega_2^2 \ \omega_3^2 \ \omega_4^2]^T \text{ for } C_{T_i} > 0 \text{ and}$$

$$C_{Q_i} > 0.$$

The control objective is to asymptotically track prescribed trajectories for the vehicle spatial position  $(x, y, z)$  and the yaw orientation  $\psi$ . In the following, we show that the considered control objective is achievable with a nonlinear time variant state feedback under the following standing assumption

- All system states are measurable and all system physical parameters are known.

### Control design

In this section we present a bounded backstepping control design for the rotary wing vehicle modeled by equation (5). The control strategy is developed as follows. First, the controller for the vehicle vertical motion is designed and then through the pitch and roll angles the vehicle position in the plane  $xy$  is controlled. The motion in the yaw direction is controlled independently. From the first equation of (5) we have that the translational dynamics is described by

$$\begin{aligned} m \ddot{x} &= T_T \sin(\theta) \\ m \ddot{y} &= -T_T \cos(\theta) \sin(\phi) \end{aligned} \quad (8)$$

$$m \ddot{z} = -T_T \cos(\theta) \cos(\phi) + m g$$

Vertical motion control can be obtained by defining the total thrust as

$$T_T = m \frac{g - \gamma_z}{\cos(\theta) \cos(\phi)} \quad (9)$$

where  $\gamma_z$  is a function defined in such a way that the dynamic equation

$$\ddot{z} = \gamma_z$$

globally asymptotically satisfies

$$\lim_{t \rightarrow \infty} z = z_d$$

The translational dynamics (8) in closed loop with the controller (9) is described by the following equations

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= \frac{g - \gamma_z}{\cos(\phi)} \tan(\theta) \\ \ddot{y} &= -(g - \gamma_z) \tan(\phi) \\ \ddot{z} &= \gamma_z \end{aligned} \quad (10)$$

Following the backstepping nonlinear control design methodology (Sepulchre, 1997) the motion control in the  $x$  and  $y$  directions can be achieved through  $\theta$  and  $\phi$  as follows.

Consider the functions

$$\zeta_x = \tan(\theta) - \frac{\cos(\phi)}{g - \gamma_z} \gamma_x, \zeta_y = \tan(\phi) - \frac{1}{g - \gamma_z} \gamma_y \quad (11)$$

where  $\gamma_x$  and  $\gamma_y$  are functions that will be defined in a similar way to  $\gamma_z$ . Note that the new variables  $\zeta_x$  and  $\zeta_y$  will be well defined provided

$$g - \gamma_z \neq 0$$

therefore  $\gamma_z$  needs to satisfy the following condition

$$|\gamma_z| < g \quad (12)$$

The condition above will be fulfilled by designing  $\gamma_z$  as a bounded function; this will be achieved following the bounded control design technique proposed in (Kaliora *et al.*, 2001).

Solving equation (11) for  $\tan(\theta)$  and  $\tan(\phi)$ , and replacing them into equation (10) we obtain

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= \gamma_x + \frac{g-\gamma_z}{\cos(\phi)} \zeta_x \\ \ddot{y} &= -\gamma_y - (g-\gamma_z)\zeta_y \\ \ddot{z} &= \gamma_z \end{aligned} \tag{13}$$

Supposing that  $\zeta_x$  and  $\zeta_y$  are vanishing perturbations the trajectory tracking problem in the plane  $x$ - $y$  can be solved by selecting the functions  $\gamma_x$  and  $\gamma_y$  in such a way that the following dynamic equations

$$\ddot{x} = \gamma_x, \ddot{y} = -\gamma_y$$

globally asymptotically satisfy

$$\lim_{t \rightarrow \infty} x = x_d, \lim_{t \rightarrow \infty} y = y_d$$

Now, we force the variables  $\zeta_x$  and  $\zeta_y$  to be vanishing perturbations. For, let us define the following linearizing feedback for the angular dynamics

$$\begin{bmatrix} L \\ M \\ N \end{bmatrix} = W^{-T} [I_{\eta} \tau + W^T I \dot{W} \dot{\eta} + W^T (W \dot{\eta} \times I W \dot{\eta})] \tag{14}$$

where  $\tau = [\tau_\phi, \tau_\theta, \tau_\psi]^T$  is the new control input. With the controller defined by (14) the rotational dynamics reads as follows

$$\begin{aligned} \ddot{\phi} &= \tau_\phi \\ \ddot{\theta} &= \tau_\theta \\ \ddot{\Psi} &= \tau_\psi \end{aligned} \tag{15}$$

It is easy to verify that the system described by equations (10) and (15) with output (11) has vector relative degree  $\{r_1, r_2\} = \{2, 2\}$  provided (12) and

$$-\frac{\pi}{2} < \phi < \frac{\pi}{2}, -\frac{\pi}{2} < \theta < \frac{\pi}{2} \tag{16}$$

holds. As a result, we have

$$\begin{bmatrix} \ddot{\zeta}_x \\ \ddot{\zeta}_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_1(x, \dot{x}, y, \dot{y}, z, \dot{z}, \phi, \dot{\phi}, \theta, \dot{\theta}, t) \\ \Phi_2(y, \dot{y}, z, \dot{z}, \phi, \dot{\phi}, t) \end{bmatrix} + M \begin{bmatrix} \tau_\phi \\ \tau_\theta \end{bmatrix}$$

where

$$M = \begin{bmatrix} \frac{\sin(\phi)\gamma_x}{g-\gamma_z} & 1 + \tan(\theta)^2 \\ 1 + \tan(\phi)^2 & 0 \end{bmatrix} \tag{17}$$

is the decoupling matrix. The main characteristics of the proposed controller can be stated as follows.

### Proposition 1

Consider the rotary wing vehicle dynamics described by equations (5). Let  $x_d(t), y_d(t), Z_d(t)$  and  $\psi_d(t)$  be reference signals with bounded derivatives. The state feedback control law defined by (9), (11) (14) and

$$\begin{bmatrix} \tau_\phi \\ \tau_\theta \\ \tau_\psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M^{-1} \left\{ - \begin{bmatrix} \Phi_1 \\ \Phi_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \gamma_{\zeta_1} \\ \gamma_{\zeta_2} \end{bmatrix} \right\} \\ \gamma_\psi \end{bmatrix} \tag{18}$$

with

$$\begin{aligned} \gamma_z &= \ddot{z}_d - \frac{\varepsilon_z}{2} \tanh\left(\frac{2\lambda_{z_1}}{\varepsilon_z} e_z\right) - \frac{\varepsilon_z}{4} \tanh\left(\frac{4\lambda_{z_2}}{\varepsilon_z} \dot{e}_z\right) \\ \gamma_x &= \ddot{x}_d - \frac{\varepsilon_x}{2} \tanh\left(\frac{2\lambda_{x_1}}{\varepsilon_x} e_x\right) - \frac{\varepsilon_x}{4} \tanh\left(\frac{4\lambda_{x_2}}{\varepsilon_x} \dot{e}_x\right) \\ \gamma_y &= -\ddot{y}_d - \frac{\varepsilon_y}{2} \tanh\left(\frac{2\lambda_{y_1}}{\varepsilon_y} e_y\right) + \frac{\varepsilon_y}{4} \tanh\left(\frac{4\lambda_{y_2}}{\varepsilon_y} \dot{e}_y\right) \\ \gamma_{\zeta_x} &= -\lambda_{12} \dot{\zeta}_x - \lambda_{11} \zeta_x \\ \gamma_{\zeta_y} &= -\lambda_{22} \dot{\zeta}_y - \lambda_{21} \zeta_y \\ \gamma_\psi &= \ddot{\Psi}_d - \lambda_{32} \dot{e}_\psi - \lambda_{31} e_\psi \end{aligned} \tag{19}$$

and

$$\begin{aligned} e_x &= x - x_d \\ e_y &= y - y_d \\ e_z &= z - z_d \\ e_\psi &= \psi - \psi_d \end{aligned} \tag{20}$$

where  $\lambda_{(\cdot)1}$  and  $\lambda_{(\cdot)2}$  are constants such that the polynomial  $s^2 + \lambda_{(\cdot)2}s + \lambda_{(\cdot)1}$  has all roots with negative real part, positive constants  $\varepsilon_x, \varepsilon_y$  and

$$\varepsilon_z < \frac{4}{3} (g - |\ddot{z}_d| - \sigma_z) \tag{21}$$

generates a closed loop dynamics such that, for any initial conditions in the set

$$S = \left\{ (x, \dot{x}, y, \dot{y}, z, \dot{z}, \phi, \dot{\phi}, \theta, \dot{\theta}, \psi, \dot{\psi}) \in R^6 \right. \\ \left. \times \left( -\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2} \right) \times R \times \left( -\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2} \right) \times R \times (-\pi, \pi) \right\} \quad (22)$$

the trajectories of the closed loop system remain in  $\mathbf{S}$  and are such that

$$\lim_{t \rightarrow \infty} [e_x(t)] = 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} [e_y(t)] = 0$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} [e_z(t)] = 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} [e_\psi(t)] = 0$$

for any positive constant  $\sigma_z > 0$ .

Proof

To begin with, note that the vertical motion dynamics expressed in terms of the vertical tracking error is described by

$$\ddot{e}_z = -\frac{\varepsilon_z}{2} \tanh\left(\frac{2\lambda_{z_1}}{\varepsilon_z} e_z\right) - \frac{\varepsilon_z}{4} \tanh\left(\frac{4\lambda_{z_2}}{\varepsilon_z} \dot{e}_z\right) \quad (23)$$

as shown in (Kaliora *et al.*, 2001) the dynamics (23) is globally asymptotically stable (GAS) and locally exponentially stable (LES) so that  $z(t)$  converges to  $z_d(t)$ . Moreover, from (21) we have that

$$g - \gamma_z > \sigma_z$$

thus the new coordinates defined in (11) are well defined in the set  $\mathbf{S}$ . In a similar way we have that the dynamics

$$\ddot{e}_x = -\frac{\varepsilon_x}{2} \tanh\left(\frac{2\lambda_{x_1}}{\varepsilon_x} e_x\right) - \frac{\varepsilon_x}{4} \tanh\left(\frac{4\lambda_{x_2}}{\varepsilon_x} \dot{e}_x\right) \quad (24)$$

$$\ddot{e}_y = -\frac{\varepsilon_y}{2} \tanh\left(\frac{2\lambda_{y_1}}{\varepsilon_y} e_y\right) - \frac{\varepsilon_y}{4} \tanh\left(\frac{4\lambda_{y_2}}{\varepsilon_y} \dot{e}_y\right)$$

are GAS and LES. As a consequence, there exist quadratic Lyapunov functions

$$V_x(e_x, \dot{e}_x), \quad V_y(e_y, \dot{e}_y) \quad (25)$$

such that

$$\dot{V}_x = -W_x(e_x, \dot{e}_x), \quad \dot{V}_y = -W_y(e_y, \dot{e}_y)$$

with  $W_x$  and  $W_y$  positive definite functions along (24). Additionally, it is easy to verify that for the dynamic equations

$$\ddot{\zeta}_x = -\lambda_{12} \dot{\zeta}_x - \lambda_{11} \zeta_x \quad (26) \\ \ddot{\zeta}_y = -\lambda_{22} \dot{\zeta}_y - \lambda_{21} \zeta_y$$

there exist radially unbounded Lyapunov functions  $V_{\zeta_x}(\zeta_x, \dot{\zeta}_x)$  and  $V_{\zeta_y}(\zeta_y, \dot{\zeta}_y)$  such that

$$\dot{V}_{\zeta_x} = -W_{\zeta_x}(\zeta_x, \dot{\zeta}_x)$$

$$\dot{V}_{\zeta_y} = -W_{\zeta_y}(\zeta_y, \dot{\zeta}_y)$$

with  $W_{\zeta_x}$  and  $W_{\zeta_y}$  being positive definite functions. Consequently, there exist constants  $\kappa_x$  and  $\kappa_y$  such that

$$|\zeta_x| < \kappa_x, \quad |\zeta_y| < \kappa_y \quad (27)$$

Note now that the vehicle dynamics (5) in closed-loop with (9), (14) and (18) can be expressed in terms of the

$$x, \dot{x}, y, \dot{y}, \zeta_x, \dot{\zeta}_x, \zeta_y, \dot{\zeta}_y, \psi, \dot{\psi}$$

coordinates as follows

$$\ddot{x} = \gamma_x + \sqrt{(g - \gamma_z)^2 + [\gamma_y + (g - \gamma_z)\zeta_y]^2} \zeta_x \\ \ddot{y} = -\gamma_y - (g - \gamma_z)\zeta_y \\ \ddot{z} = \gamma_z \quad (28) \\ \ddot{\zeta}_x = \gamma_{\zeta_x} \\ \ddot{\zeta}_y = \gamma_{\zeta_y} \\ \ddot{\psi} = \gamma_\psi$$

so that the time derivative of the Lyapunov functions (25) along (28) gives

$$\dot{V}_x = -W_x + \frac{\partial V_x}{\partial \dot{e}_x} \sqrt{(g - \gamma_z)^2 + [\gamma_y + (g - \gamma_z)\zeta_y]^2} \zeta_x \quad (29)$$

$$\dot{V}_y = -W_y - \frac{\partial V_y}{\partial \dot{e}_y} (g - \gamma_z) \zeta_y$$

Consider now equation (27) and some positive constants  $\kappa_1, \kappa_2$  and  $\kappa_3$ . Then the Lyapunov function time derivatives (29) can be bounded as follows

$$\begin{aligned} \dot{V}_x &\leq (\kappa_1 \kappa_x + \kappa_2 \kappa_x \kappa_y) \left| \frac{\partial V_x}{\partial \dot{e}_x} \right| \\ \dot{V}_y &\leq \kappa_2 \kappa_y \left| \frac{\partial V_y}{\partial \dot{e}_y} \right| \end{aligned} \quad (30)$$

which gives

$$\dot{V}_x \leq (\kappa_1 \kappa_x + \kappa_2 \kappa_x \kappa_y) V_x, \dot{V}_y \leq \kappa_2 \kappa_y V_y \quad (31)$$

this implies that along the trajectories of the closed loop dynamics  $V_x$  and  $V_y$  are bounded. As a result, the tracking errors  $e_x$  and  $e_y$  and their time derivatives are bounded and, by standard properties of cascade systems  $x(t)$  and  $y(t)$  converge to  $x_d(t)$  and  $y_d(t)$  respectively. It is easy to verify that the last equation of (28) is GAS and  $\psi(t)$  converges to  $\psi_d(t)$ . Finally, straightforward computations show that

$$\begin{aligned} \theta &= \arctan(\zeta_x + F(\gamma_z, \gamma_y, \zeta_y) \gamma_x) \\ \phi &= \arctan\left(\zeta_y + \frac{\gamma_y}{(g - \gamma_z)}\right) \\ \dot{\theta} &= \frac{\dot{\zeta}_x + \dot{F}(\gamma_z, \gamma_y, \zeta_y) \zeta_x + \dot{F}(\gamma_z, \gamma_y, \zeta_y) \dot{\gamma}_x}{1 + (\zeta_x + F(\gamma_z, \gamma_y, \zeta_y) \zeta_x)^2} \\ \dot{\phi} &= \frac{(g - \gamma_z)^2 \dot{\zeta}_y + (g - \gamma_z) \dot{\gamma}_y + \gamma_y \dot{\gamma}_z}{(g - \gamma_z)^2 + [(g - \gamma_z) \zeta_y + \gamma_y]^2} \end{aligned} \quad (32)$$

where

$$F(\gamma_z, \gamma_y, \zeta_y) = \sqrt{(g - \gamma_z)^2 + [\zeta_y (g - \gamma_z) + \gamma_y]^2}$$

Note that the functions  $\dot{\gamma}_x, \dot{\gamma}_y, \dot{\gamma}_z$ , and  $\dot{F}(\gamma_z, \gamma_y, \zeta_y)$  can be written in terms of  $\{\zeta_x, \zeta_y, \gamma_x, \gamma_y, \gamma_z\}$  then the

diffeomorphism from  $\{\phi, \dot{\phi}, \theta, \dot{\theta}\}$  to  $\{\zeta_x, \dot{\zeta}_x, \zeta_y, \dot{\zeta}_y\}$  is well defined in the set **S**. This completes the proof.

Remark

The control law of **Proposition 1** has  $\epsilon_x$  and  $\epsilon_y$  as free parameters that could be used to enforce saturation limits on the actuators. Moreover, as the closed-loop dynamics evolves inside **S** the singularities in equations (9) and (14) are avoided.

### Simulation results

Numerical simulations were carried out to assess the performance of the controller proposed. The numerical value of the vehicle parameters are presented in table 1.

Note that we consider similar characteristics for all rotors. The desired trajectory is defined as follows

$$\begin{aligned} \left. \begin{aligned} x_d &= 12 \sin(0.2t) \\ y_d &= 12 \cos(0.2t) \\ z_d &= 20 e^{-0.1t} \\ \psi_d &= \sin(0.2t) \end{aligned} \right\} t \leq 50 \text{seg} \\ \left. \begin{aligned} x_d &= -15 \\ y_d &= -15 \\ z_d &= 0 \\ \psi_d &= 0 \end{aligned} \right\} t > 50 \text{seg} \end{aligned} \quad (33)$$

In the numerical simulations we have considered the following initial conditions

$$\begin{aligned} [x(0) \ y(0) \ z(0) \ \phi(0) \ \theta(0) \ \psi(0)]^T \\ = [0 \ 12 \ 20 \ 0 \ 0 \ 0]^T \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} [\dot{x}(0) \ \dot{y}(0) \ \dot{z}(0) \ \dot{\phi}(0) \ \dot{\theta}(0) \ \dot{\psi}(0)]^T \\ = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \end{aligned}$$

Table 1. Rotary wing vehicle parameters

Parameter	Value	Parameter	Value
m (kg)	1	$C_{Qi}, i=1, \dots, 4$	0.1
g(m/s <sup>2</sup> )	9.81	$\ell$ (m)	0.25
r (m)	1	$I_{xx}$ (kg m <sup>2</sup> )	1.25
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1	$I_{yy}$ (kg m <sup>2</sup> )	2.2
$C_{Ti}, i=1, \dots, 4$	0.5	$I_{zz}$ (kg m <sup>2</sup> )	1.23



In order to tune the controller parameters we do need to be careful to fulfill condition (12) this can be achieved by selecting adequately the controller gain  $\varepsilon_z$ . Note that through the controller gains  $\varepsilon_x, \varepsilon_y$  the functions  $\gamma_x$  and  $\gamma_y$  can be arbitrarily bounded. However, by

bounding  $\gamma_x$  and  $\gamma_y$  we bound the available control force and slow the controller response. In the following numerical simulations we select the controller parameters presented in table 2.

Table 2. Controller parameters

Parameter	Value	Parameter	Value
$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$	15, 15, 9.21	$\lambda_{x1}, \lambda_{x2}$	0.49, 1.4
$\lambda_{y1}, \lambda_{y2}$	0.81, 1.8	$\lambda_{z1}, \lambda_{z2}$	0.25, 1
$\lambda_{11}, \lambda_{12}$	1, 2	$\lambda_{21}, \lambda_{22}$	1, 2
$\lambda_{31}, \lambda_{32}$	0.36, 1.2	$\sigma_z$	0.4

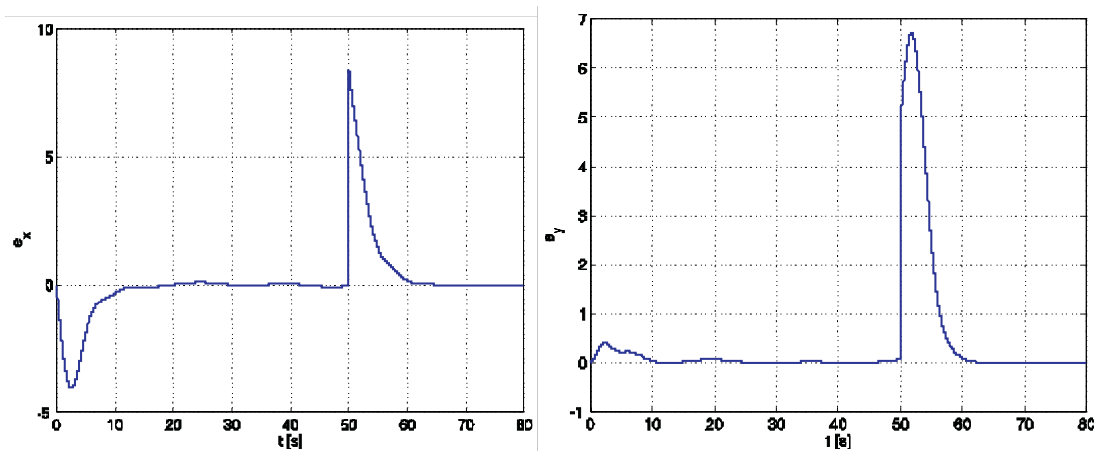


Figure 2. Tracking error  $e_x$  (left) and tracking error  $e_y$  (right)

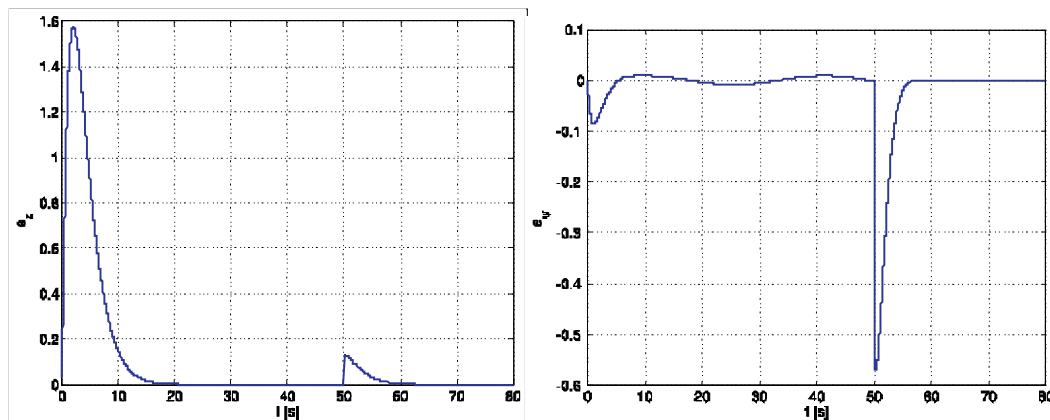


Figure 3. Tracking error  $e_z$  (left) and tracking error  $e_\psi$  (right)

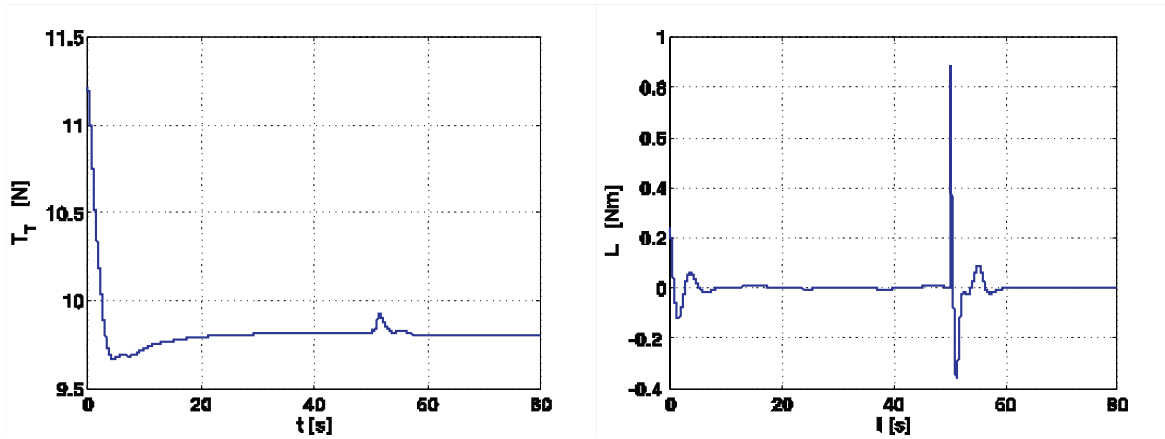


Figure 4. Total thrust  $T_T$  (left) and moment applied on the roll direction  $L$  (right)

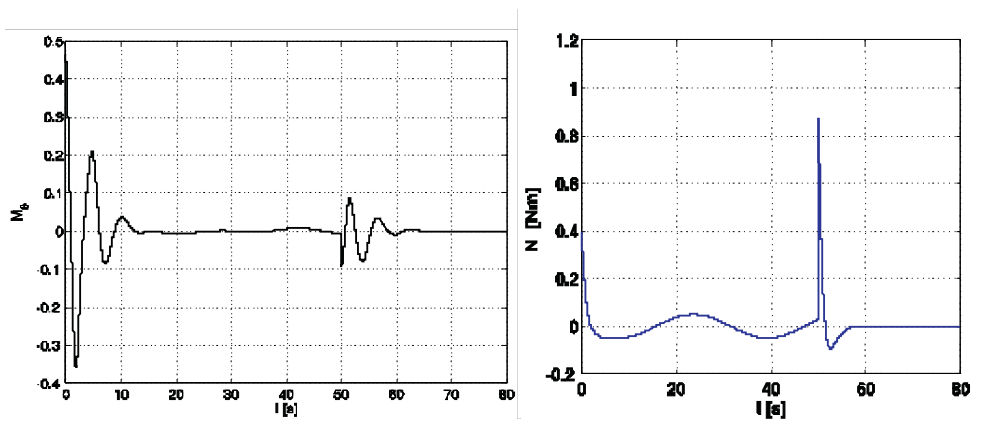


Figure 5. Moment applied on the pitch direction  $M$  (left) and moment applied in the yaw direction  $N$  (right)

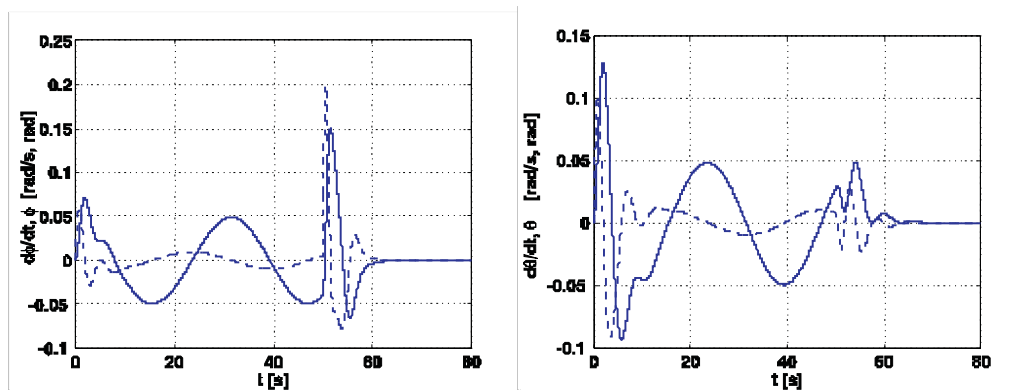


Figure 6. Roll angle  $\phi$  (continuous line) and roll angular velocity  $\dot{\phi}$  (dashed line) (left). Pitch angle  $\theta$  (continuous line) and pitch angular velocity  $\dot{\theta}$  (dashed line) (right)

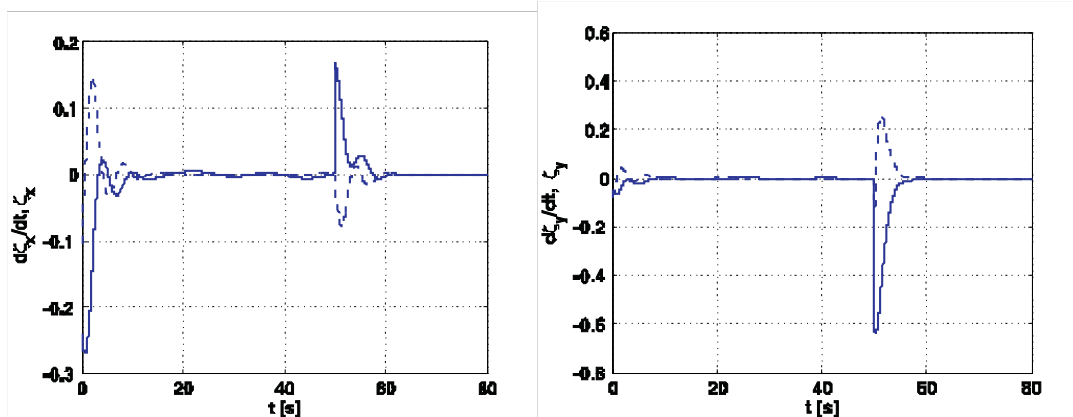


Figure 7.  $\zeta_x$  (continuous line) and  $\dot{\zeta}_x$  (dashed line) (left).  $\zeta_y$  (continuous line) and  $\dot{\zeta}_y$  (dashed line) (right)

In order to test the controller robustness in the following simulations the linearizing controller (14) is not included. Figures 2 and 3 show the time histories of the trajectory tracking as it can be observed they converge asymptotically to zero. The divergence observed at  $t=50$  seg corresponds to the non smooth change of reference. However, after a transient period the trajectory tracking errors converge asymptotically to zero.

Figures 4 and 5 display time histories of the control signals, as it can be they remain bounded. Finally, in Figures 6 and 7 the time histories of the states ( $\phi, \theta$ ) as well as ( $\zeta_x, \zeta_y$ ) and its time derivatives are shown. Note that all these signals remain bounded showing that the diffeomorphism from  $\{\phi, \dot{\phi}, \theta, \dot{\theta}\}$  to  $\{\zeta_x, \dot{\zeta}_x, \zeta_y, \dot{\zeta}_y\}$  is well defined.

## Conclusions

The trajectory tracking problem for a rotary wing vehicle powered by four rotors has been addressed and solved by means of a full information control law, which is based on the backstepping technique and bounded controllers. Numerical simulations have been proposed to illustrate the properties of the closed loop system.

A few issues are left open in the present paper. First, all the system parameters are assumed to be known. Second, all the states are assumed to be measurable, hence further work is necessary to relax (or avoid) these assumptions. A straightforward solution to the issues left open in this paper is to include an observer/estimator to observe some system' states and to estimate some system's parameters, for instance translational velocities, angular displacements and vehicle mass. The main complications in this direction is to be able to

conclude some kind of stability of the new resulting nonlinear closed—loop dynamics now composed of vehicle dynamics, controller and observer.

## Acknowledgments

This work has been partially supported by the Instituto Politécnico Nacional under the project SIP-20060127. Authors would like to thank to anonymous reviewers for their helpful suggestions.

## References

- Davis Jr. W.R., Kosicki B.B., Boroson D.M., Kostishack D.F. Micro Air Vehicles for Optical Surveillance. *The Lincoln Laboratory Journal*, 9:2, 1998.
- Gessow A., Myers C.G. Jr. *Aerodynamics of the Helicopter*. FREDERICK UNGAR PUBLISHING CO. New York. Fifth Printing. 1978.
- Hamel T., Mahony R., Lozano R. Dynamic Modelling and Configuration Stabilization for an X4-flyer. Proc. of the 15th Triennial World IFAC Congress Barcelona, Spain, 2002.
- Kaliora G., Astolfi A. A Simple Design for the Stabilization of Cascaded Nonlinear Systems with Bounded Control. Proc. of the 40th Conference on Decision and Control Orlando, FL, pp. 3784-3789, 2001.
- Kendoul F., Fantoni I., Lozano R. Modelling and Control of Small Autonomous Aircraft Having Two Tilting Rotors. Proc. of the 44th Conference on Decision and Control and the European Control Conference 2005, Seville, Spain, December 12-15, 2005.
- Roskam J. *Airplane Flight Dynamics and Automatic Flight Controls*. Part I, A. Roskam Aviation and Engineering Corporation. 1982.

Salazar-Cruz S., Palomino A., Lozano R. Trajectory Tracking for a Four Rotor Mini-craft. Proc. of the 44th Conference on Decision and Control and the European Control Conference 2005, Seville, Spain, December 12-15, 2005.

Sepulchre R., Jankovic M., Kokotovic P. *Constructive Nonlinear Control*. London. Springer Verlag. 1997.

---

#### About the authors

*Sergio Araujo-Estrada*. Is a M.S. student at the Centro de Investigación y de Estudios Avanzados. He received his bachelor in aeronautical engineering from the Instituto Politécnico Nacional in 2008. His research interests are design and control of unmanned aerial vehicles.

*Eduardo Liceaga-Castro*. He received his bachelor in aeronautical engineering from the Instituto Politécnico Nacional, M.S. in automatic control from the Centro de Investigación y de Estudios Avanzados and Ph. D. from Glasgow University. He was a postdoctoral research fellow at Glasgow University, Strathclyde University and Glasgow Caledonian University. He has held academic appointments at Universidad Carlos III, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Ticomán and Instituto de Estudios Superiores de Monterrey Campus Cd. de México. He has worked at Daimler Chrysler in Germany. His current research interests include nonlinear control of electric machines and aerial vehicles.

*Hugo Rodríguez-Cortés*. Is a mechatronics researcher at the Centro de Investigación y de Estudios Avanzados. He received his bachelor in aeronautical engineering from the Instituto Politécnico Nacional in 1995, M.S. in automatic control from the Centro de Investigación y de Estudios Avanzados in 1997 and doctorate in signal processing and automatic control from Paris XI University in 2002. He has been a postdoctoral research fellow at the Imperial College of Technology and Medicine and Northeastern University. His research interests are design and control of unmanned aerial vehicles.

# CONTENIDO

## contenido volumen X

---

RIIT Vol.X. NÚM. 1. ENERO-MARZO 2009 ISSN 1405-7743 FI-UNAM

---

DIAGNOSTIC BASIC ELEMENTS FOR QUALITY PRACTICES IMPLEMENTATION B. Sánchez-Lara and G. Sánchez-Guerrero	1
CORROSIÓN MICROBIOLÓGICA EN ACEROS DE BAJO CARBONO O. Medina-Custodio, A. Ortiz-Prado, V.H. Jacobo-Armendáriz y R. Schouwenars-Franssens	9
SECURE COMMUNICATION SYSTEM USING CHAOTIC SIGNALS I. Campos-Cantón, E. Campos-Cantón, J.S. Murguía-Ibarra and M.E. Chavira-Rodríguez	21
DESARROLLO Y CALIBRACIÓN DE UN MODELO PARA LA DETERMINACIÓN DEL CAMPO DE VELOCIDADES DE VIENTOS HURACANADOS EN LA PENÍNSULA DE YUCATÁN L.E. Fernández-Baqueiro, J.L. Varela-Rivera y E.J. Félix-Solís	29
INFLUENCIA DE LA CARBONATACIÓN EN MORTEROS DE CEMENTO PÓRTLAND Y CENIZA VOLANTE P.L. Valdez-Tamez, A. Durán-Herrera, G. Fajardo-San Miguel y C.A. Juárez-Alvarado	39
CONTROL DE UN RECTIFICADOR PWM CON FUNCIONES AMPLIADAS BASADO EN UN PROCESADOR DIGITAL DE SEÑALES C. Núñez-Gutiérrez, J. Lira-Pérez, V.M. Cárdenas-Galindo and R. Alvarez-Salas	51
FUSING INTERESTING TOPICS IN THE WEB A.D. Cuevas-Rasgado and A. Guzman-Arenas	63
FUNCIONES DISTANCIA ASIMÉTRICAS Y NO POSITIVAS DEFINIDAS PARTE II: Modelado H. Sánchez-Larios y S.T. Guillén-Burguete	75

---

RIIT Vol.X. NUM. 2. ABRIL-JUNIO 2009 ISSN 1405-7743 FI-UNAM

---

STRUCTURAL RELIABILITY ANALYSIS OF LIMIT STATE FUNCTIONS WITH MULTIPLE DESIGN POINTS USING EVOLUTIONARY STRATEGIES F. Barranco-Cicilia, E. Castro-Prates de Lima, L.V. Sudati-Sagrilo	87
ESTUDIO DE LA LADERA OCCIDENTAL DEL CERRO DEL CHIQUIHUIE, CIUDAD DE MÉXICO MEDIANTE SIG Y GPS M. Martínez-Yáñez, E. Cabral-Cano, F. Correa-Mora, O. Díaz-Molina, G. Cifuentes-Nava, E. Hernández-Quintero, H. Delgado-Granados	99
CARACTERÍSTICAS MEDIAS DE VÓRTICES CÓNICOS EN ARISTAS DE CUBIERTAS PLANAS DE EDIFICACIONES BAJAS CUBOIDALES UTILIZANDO VELOCIMETRÍA POR IMÁGENES DE PARTÍCULAS M. Gamboa-Marrufo, C.J. Wood, R. Belcher	113
ESTANDARIZACIÓN DE LAS ECUACIONES PARA ESTIMAR LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO DE REFERENCIA M.D. Mundo-Molina	125
AUDITORÍAS DE SEGURIDAD VIAL DE CARRETERAS EN OPERACIÓN A. Mendoza-Díaz, E. Abarca-Pérez, A.G. Centeno-Saad	137
ARQUITECTURA DE SISTEMAS TECNOLÓGICOS PARA LA EDUCACIÓN BASADA EN WEB A. Canales-Cruz, R. Peredo-Valderrama, L. Balladares-Ocaña, I. Peredo-Valderrama, J.H. Sossa-Azuela	145
AVAILABLE ENERGY AND CUMULATIVE FREQUENCY CURVES FOR PARABOLIC TROUGH CONCENTRATORS WITH ALIGNMENT NORTH-SOUTH, IN THE NORTHWEST OF MEXICO A. Lentz-Herrea, R. Almanza-Salgado, S. López -Ríos, R. Cadenas-Tovar	159
HANDOFF BETWEEN A WIRELESS LOCAL AREA NETWORK (WLAN) AND A WIDE AREA NETWORK (UMTS) J. Sánchez-García, L.A. Villaseñor-González, M.E. Vaquera-Flores, R. Aquino-Santos	167

ESTIMADORES DE FASE ÓPTICA EN SISTEMAS MODERNOS DE COMUNICACIONES HOMODINAS A. Arvizu-Mondragón, F.J. Mendieta-Jiménez y J. de D. Sánchez-López	187
EXPONENTIAL CONVERGENCE OF MULTIQUADRIC COLLOCATION METHOD: A NUMERICAL Study J.A. Muñoz-Gómez, P. González-Casanova and G. Rodríguez-Gómez	197
PREDICCIÓN NUMÉRICA DEL TAMAÑO Y FORMA DE UNA LLAMA EN UN QUEMADOR ELEVADO DENTRO DE UN FLUJO CRUZADO DE AIRE W. Vicente y Rodríguez, M. Salinas-Vázquez, J.E. Barrios-Bonilla y E.R. Barrera-Avenidaño	207
OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE RECUPERACIÓN DE METALES VALIOSOS PRESENTES EN LOS RESIDUOS DE LA AMALGAMA DENTAL C.M. Parra-Mesa, J. Ruiz-Cordoba, J.I. Pérez-Rave, M.E. Carmona-Arango, G.J. Gómez-Mejía, R. Carmona-Correa y J.A. Muñoz-Tabarez	217
ESTIMACIÓN PROBABILÍSTICA DEL VOLUMEN DE ACARREOS EN SUSPENSIÓN EN CUENCAS SIN AFOROS DE LA REGIÓN HIDROLÓGICA No. 10 (SINALOA) D.F. Campos-Aranda	227
ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS DEL CONSUMO INSTANTÁNEO DE AGUA POTABLE DE LECTURAS ACUMULADAS V.H. Alcocer-Yamanaka y V. Tzatchkov	237
MIXED DISTRIBUTIONS IN LOW-FLOW FREQUENCY ANALYSIS C.A. Escalante-Sandoval	247
NEW DIRECTIONAL MORPHOLOGICAL APPROACHES FOR THE CHARACTERIZATION OF FINGERPRINTS L.A. Morales-Hernández, I.R. Terol-Villalobos, A. Domínguez-González and G. Herrera-Ruiz	255
A FLAT SOLAR COLLECTOR BUILT FROM GALVANIZED STEEL PLATE, WORKING BY THERMOSYPHONIC FLOW, OPTIMIZED FOR MEXICAN CONDITIONS Á. Marroquín de Jesús, J.M. Olivares-Ramírez, G.A. Ramos-López and R.C. Pless	269

DISEÑO EXERGOECONÓMICO DE LA GEOMETRÍA DE UN CALENTADOR DE AIRE TUBULAR VERTICAL DE TRES PASOS J.I. Marín-Hernández, M.L. González-Petitlean y O.M. Cruz-Fonticiella	285
WIRELESS PROPAGATION CHARACTERISTICS FOR VEHICULAR Ad-HOC NETWORKS IN MOTORWAY ENVIRONMENTS R. Aquino-Santos, V. Rangel-Licea, L.A. Villaseñor-González and A. Edwards	295
DESPACHO UNIFICADO DE ENERGÍA Y RESERVAS EN MERCADOS DE ELECTRICIDAD J.A. Quiñónez-Osobampo, J.H. Tovar-Hernández y G. Gutiérrez-Alcaraz	303
FLUCTUACIONES DE PRESIÓN EN LA BASE DEL POZO DE OSCILACIÓN DEL P.H. ZIMAPÁN HGO., CON DIFERENTES ARREGLOS ESTUDIADOS EN MODELO HIDRÁULICO ANTE LAS CONDICIONES MÍNIMAS DE OPERACIÓN H. Marengo-Mogollón, F.J. Ochoa-Álvarez y C. Cortés-Cortés	321
EFEECTO DEL NaCl SOBRE UNA ALEACIÓN DE Al-Si HIPOEUTÉCTICA VACIADA E.J. Martínez-Delgado, R. Ortega de la Rosa, M.A. Cisneros-Guerrero y S. Haro-Rodríguez	331
LA ENERGÍA DEL VIENTO EN MÉXICO: SIMULACIÓN DE UN PARQUE EÓLICO Y APLICACIÓN DE ANÁLISIS PROBABILÍSTICO DE SEGURIDAD C. Martín del Campo-Márquez, P.F. Nelson-Edelstein y M.Á. García-Vázquez	343
CÁLCULO DE REGISTROS SINTÉTICOS DE INGRESOS POR CUENCA PROPIA DE UN SISTEMA DE PRESAS DE LA REGIÓN NOROESTE DE MÉXICO, CARACTERIZADA POR EVENTOS INVERNALES R. Domínguez-Mora y M.L. Arganis-Juárez	353
EFEECTO DE LA IMIDAZOLINA [IM-NH17] EN EL PROCESO DE CORROSIÓN DEL ACERO API 5L-X52 EN SALMUERAS ACIDIFICADAS A.G. Reynaud- Morales, M. Casales-Díaz, J.G. Chacón-Nava, L. Martínez-Gómez, A. Martínez-Villafañe y J.G. González-Rodríguez	363
NONLINEAR MOTION CONTROL OF A ROTARY WING VEHICLE POWERED BY FOUR ROTORS S. Araujo-Estrada, E. Liceaga-Castro and H. Rodríguez-Cortés	373

## ÍNDICE DE AUTORES

---

### RIIT Vol.X. NÚM. 1. ENERO-MARZO 2009

---

Alvarez-Salas Ricardo	51
Campos-Cantón Isaac	21
Campos-Cantón Eric	21
Cárdenas-Galindo Víctor M.	51
Cuevas-Rasgado Alma D.	63
Chavira-Rodríguez Mayra E.	21
Durán-Herrera Alejandro	39
Fajardo- San Miguel Gerardo	39
Félix-Solís Evérica J.	29
Fernández-Baqueiro Luis E.	29
Guillén-Burguete Servio T.	75
Guzmán-Arenas Adolfo	63
Jacobo-Armendáriz Víctor Hugo	9
Juárez-Alvarado César A.	39
Lira-Pérez Jesús	51
Medina-Custodio Oscar	9
Murguía-Ibarra José S.	21
Núñez-Gutiérrez Ciro	51
Ortiz-Prado Armando	9
Sánchez-Gerrero Gabriel de las N.	1
Sánchez-Larios Hérica	75
Sánchez-Lara Benito	1
Schouwenaars-Franssens Rafael	9
Valdez-Tamez Pedro L.	39
Varela-Rivera Jorge L.	29

---

### RIIT Vol.X. NUM.2. ABRIL-JUNIO 2009

---

Abarca-Pérez Emilio	137
Almanza-Salgado Rafael	159
Aquino-Santos Raúl	167
Balladares-Ocaña Leandro	145
Belcher Rex	113
Barranco-Cicilia Federico	87
Cabral-Cano Enrique	99
Cadenas -Tovar Roberto	159
Cifuentes-Nava Gerardo	99
Canales-Cruz Alejandro	145
Centeno-Saad Agustín G.	137
Correa-Mora Francisco	99
Castro-Prates de Lima Edison	87
Delgado-Granados Hugo	99
Díaz-Molina Oscar	99
Gamboa-Marrufo Mauricio	113

Hernández-Quintero Esteban	99
Lentz-Herrea Álvaro	159
López-Ríos Serafín	159
Martínez-Yañez Mario A.	99
Mendoza-Díaz Alberto	137
Mundo-Molina Martín D.	125
Peredo-Valderrama Rubén	145
Peredo-Valderrama Iván	145
Sánchez-García Jaime	167
Sossa-Azuela Humberto	145
Sudati-Sagrilo Luis Volnei	87
Villaseñor-González Luis A.	167
Vaquera-Flores Mario E.	167
Wood Colin John	113

---

NUM. 3. JULIO-SEPTIEMBRE 2009

---

Alcocer-Yamanaka Víctor H.	237
Arvizu-Mondragón Arturo	187
Barrera-Avendaño Erick R.	207
Barrios-Bonilla José E.	207
Campos-Aranda Daniel F.	227
Carmona-Arango María E.	217
Carmona-Correa R.	217
Domínguez-González Aurelio	255
Escalante-Sandoval Carlos A.	247
Gómez-Mejía Gabriel J.	217
González-Casanova Pedro	197
Herrera-Ruíz Gilberto	255
Marroquín de Jesús Ángel	269
Mendieta-Jiménez Francisco J.	187
Morales-Hernández Luis A.	255
Muñoz-Gómez José A.	197
Muñoz-Tabarez José A.	217
Olivares-Ramírez Juan M.	269
Parra-Mesa Carlos M.	217
Pérez-Rave Jorge I.	217
Pless Reynaldo C.	269
Ramos-López Gonzalo A.	269
Rodríguez-Gómez Gustavo	197
Ruíz-Córdoba Jairo	217
Salinas-Vázquez Martín	207
Sánchez-López Juan de Dios	187
Terol-Villalobos Ivan R.	255
Tzatchkov Velitchko	237
Vicente- Y Rodríguez William	207



Aquino-Santos Raúl	295
Araujo-Estrada Sergio	373
Arganis-Juárez Maritza L.	353
Casales-Díaz Maura	285
Chacón-Nava José G.	285
Cisneros-Guerrero Miguel A.	331
Cortés-Cortés Carlos	321
Dominguez-Mora Ramón	353
Edwards Arthur	295
García-Vázquez Miguel A.	343
González-Rodríguez José G.	285
Gutiérrez-Alcaraz Guillermo	303
Haro-Rodríguez Sergio	331
Liceaga-Castro Eduardo	373
Martínez-Delgado Enrique J.	331
Martín del Campo-Márquez Cecilia	343
Martínez-Gómez Lorenzo	285
Martínez-Villafañe Alberto	285
Marengo-Mogollón Humberto	321
Nelson-Edelstein Pamela F.	343
Ochoa-Alvarez Federico J.	321
Ortega-De la Rosa Rubín	331
Quiñones-Osobampo Jorge A.	303
Rangel-Licea Víctor	295
Reynaud-Morales Adriana G.	285
Rodríguez-Cortés Hugo	373
Tovar-Hernández José H.	303
Villaseñor-González Luis A.	295

---

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 septiembre de 2009 en México DF y consta de 1800 ejemplares más sobrantes para reposición.

Derechos Reservados ©

Universidad Nacional Autónoma de México, 2009

---

# [ INFORMACIÓN PARA AUTORES ]

Ingeniería. Investigación y Tecnología es una publicación arbitrada y de investigación científica que tiene como propósito difundir información y conocimientos originales e inéditos relacionados con la ingeniería en todas sus áreas. Es un foro abierto para profesores, investigadores, profesionales y estudiantes de todo el mundo con artículos en español e inglés.

## MANUSCRITOS

1. Enviar un artículo a consideración de la revista, compromete a sus autores a no someterlo a evaluación simultáneamente a otra revista. Las contribuciones pueden ser propuestas para su publicación mediante su envío electrónico a:

[iit.revista@gmail.com](mailto:iit.revista@gmail.com)

O bien, en las oficinas de la Revista Ingeniería. Investigación y Tecnología, ubicadas en el edificio principal de la Facultad de Ingeniería, UNAM, Biblioteca Antonio Dovalí J. Circuito interior, Ciudad Universitaria, CP. 04510 Delegación Coyoacán, México DF ó al Apartado Postal 70-440, Administración de Correos "Ciudad Universitaria".

2. Los manuscritos deberán ser elaborados a doble espacio, con márgenes de 3 cm y en formato de Texto o Word, integrando en el mismo las figuras, tablas e ilustraciones a color (en su caso); que a su vez, deberán mandarse en un archivo por separado y en formato: JPG, PSD, CDR o TIF a 300 dpi mínimo (alta resolución). De preferencia, el artículo no debe exceder 10 páginas ó 4000 palabras.

3. El encabezado del artículo deberá integrar la siguiente información: título del artículo en inglés y español, nombre completo del autor o autores, grado académico, institución a la que pertenecen, E-mail, dirección postal, teléfono y fax. Asimismo, deberán ser elaborados dos resúmenes, uno en español y otro en inglés que no excedan 200 palabras cada uno. Posteriormente, se debe crear una lista de 6 palabras clave en español e inglés.

4. La estructura de los artículos deberá contener introducción, desarrollo, conclusiones, agradecimientos y apéndices (en su caso), así como las referencias, por lo que las secciones y subsecciones del artículo deberán estar claramente marcadas. Además, se deberá incluir una semblanza de la trayectoria profesional de cada autor, la cual no rebase las 100 palabras.

5. Las expresiones matemáticas deberán ser escritas claramente, cuidando que sean legibles los símbolos. Asimismo, se deberá utilizar el Sistema Internacional de Unidades (m, kg, s), según la Norma NOM-008- SCFI.

6. Las referencias anotadas durante el artículo, deberán elaborarse indicando el apellido del autor y el año de su publicación, por ejemplo: "Recientemente, Gracia (1996) explica..." o "...de acuerdo con la ingeniería moderna (Gracia, 1996)."... O bien, para dos autores: Gracia *et al.* (1996) o (Gracia *et al.*, 1996). Asimismo, éstas deberán ser enumeradas por orden alfabético al final del trabajo, empleando el criterio que se indica enseguida:

## LIBROS

Crack-Andersen J. *Frecuencia y análisis de ingeniería*. 2ª edición. Oxford. McGraw-Hill. 2003. pp. 388-396.

## CAPÍTULO DE UN LIBRO IMPRESO

Moyor M.A. Evaluación del lenguaje de ingeniería. En: Verdugo-Alonso J. Evaluación curricular: una guía para la intervención del ingeniero. 2ª edición. Madrid. Salvat, 1994. pp. 324-344.

Sapag-Chain N. Efectos económicos de los aspectos organizacionales. En su: Preparación y evaluación de proyectos. 4ª edición. México DF. McGraw-Hill, 2004. Pp. 119-131.

## LIBROS ELECTRÓNICOS

Pumarino A. La propiedad intelectual en ambientes digitales educativos [en línea]. Revisión sistemática. Santiago, Chile. DuocUC, 2004 [fecha de consulta 18 de octubre 2005]. Disponible en: <http://www.uca.es/dept/psicologia/bvsss/csahud/memoria/pdf/tecnologia.html>

## CAPÍTULO DE UN LIBRO ELECTRÓNICO

Anderson S. Multimedia en internet [en línea]. California. Agencia de Evaluación de Tecnologías Multimedia, 1998 [fecha de consulta 16 de mayo 1998]. Capítulo 6. Formación y acreditación de modelos multimedia. Disponible en: <http://www.usu.edu/sanderso/multinet.pdf>

## ARTÍCULO DE REVISTA IMPRESA

García-Sosa J., Morales-Burgos A., Zaragoza-Grifé N. Determinación del gasto en sistemas de tuberías en serie utilizando el Mathcad. *Ingeniería: Revista Académica de la FIUADY*, 9 (2): 19-34. Enero-Abril 2005.

## REVISTA ELECTRÓNICA

Revista de la OMPI [en línea]. 1ª edición. Ginebra. OMPI, 1998 [fecha de consulta 25 de abril 2006]. Disponible en: <http://www.wipo.int/freepublications/es/index.jsp>. I

## ARTÍCULO DE REVISTA ELECTRÓNICA

Druker M.F. Propiedad intelectual, innovación y desarrollo de nuevos productos. *Revista de la OMPI* [en línea]. Vol. 3. No. 4. Julio-Agosto 2005 [fecha de consulta 25 de julio 2006]. Disponible en: [Hhttp://www.wipo.int/freepublications/es/index.jsp](http://www.wipo.int/freepublications/es/index.jsp).

## TESIS

Iturbe-Argüelles M. del R. Transporte y dispersión de compuestos químicos orgánicos a través del flujo en medios porosos. Tesis (Doctorado en ingeniería). México DF. Universidad Nacional Autónoma de México. 1997. 120 p.

## CONFERENCIAS, CONGRESOS, SEMINARIOS

Congreso de la Asociación Chilena de Control Automático (10º, 1992, Santiago Chile). Trabajos de planeación. Santiago, Chile. Asociación Chilena de Control Automático, 1992, pp. 340-356.

## DOCUMENTO PRESENTADO EN CONGRESO O REUNIÓN

Castellano-Costa J. El impacto ambiental del proceso edificatorio. En: Seminario Internacional de Edificación (1ª, 2005, Santiago, Chile). Trabajos de ingeniería. Santiago, Chile. DUOCUC, 2006, pp. 52-62. En caso de que el tipo de material citado no se mencione aquí, deberá proporcionar la información lo más completa posible.

## ARBITRAJE

Los artículos serán valorados por tres especialistas reconocidos y de alto nivel, con la habilidad y experiencia para evaluar de manera confiable y expedita, tanto la calidad y la originalidad como el mérito del contenido de cada trabajo.

## PRUEBAS DE GALERA

Los autores recibirán las pruebas finales de su trabajo con el objeto de hacer una última revisión antes de su publicación, asimismo, deberán autorizar la forma de "autoría, aprobación de sobretiros y cesión de derechos de autor".

## SOBRETIROS

Los autores pueden disponer de 10 ejemplares, los interesados deberán comunicarse a las oficinas de la revista vía telefónica, por correo electrónico ó a través de la página de Internet.

# [ INSTRUCTIONS FOR AUTHORS ]

Ingeniería. Investigación y Tecnología is an arbitrary publication of scientific research that has as purpose, spread original and unpublished information and knowledge related with engineering in all areas. It is an open forum for professors, investigators, professionals and students worldwide that include articles in English and Spanish.

## MANUSCRIPTS

1. The shipment of an article jeopardizes its authors simultaneously not to put under it the consideration of another magazine. The contributions can be propose for their publication by their electronic shipment a:

iit.revista@gmail.com

or directly to the offices of the Revista Ingeniería. Investigación y Tecnología, located in the edificio principal de la Facultad de Ingeniería, UNAM, Biblioteca Antonio Dovalí J. Circuito interior, Ciudad Universitaria, CP. 04510 Delegación Coyoacán, México DF ó al Apartado Postal 70-440, Administración de Correos "Ciudad Universitaria".

2. The manuscripts will have to be written double-spaced, with margins of 3 cm and in Text or Word format, integrating the figures, tables and color illustrations (if it is the case); have to be sent separately they will also in a file and format: JPG, PSD, CDR or TIF with at east 300 dpi. Preferably, the article must not to exceed 10 pages or 4000 words, including illustrations.

3. The headline of the article will have the following information: title of the article in English and Spanish, complete name of the author or authors, academic degree, institution to which they belong, email, mailing dress, telephone and fax. Also, two abstracts will be needed one in Spanish and another one in English, which must not exceed the 200 words each. A list with 6 key words in English and Spanish will be included.

4. The articles will contain introduction, development, conclusions, acknowledgements and appendices (if it is the case), as well as references; the sections and subsections of the article will have to be marked clearly. In addition, each author must include a biographical sketch of his/her professional trajectory which, does not exceed 100 words.

5. The mathematical expressions will have to be written clearly, making sure all the symbols are legible. Also System of International Units (m, kg, s) must be used, according to the Norm NOM-008- SCFI.

6. The references cited along the text will indicate the last name of the author and the year of publication, for example: "Recently, Grace (1996) explains..." or "...according to modern in engineering (Grace, 1996)."... Or, for two authors: Grace *et al.* (1996) or (Grace *et al.*, 1996). Also, to be enumerated by alphabetical order at the end of the work, using the criterion that is indicated immediately:

## Books

Crack-Andersen J. *Frequency and analysis of engineering*. 2nd edition. Oxford. McGraw-Hill. 2003. pp. 388-396.

## CHAPTER OF A PRINTED BOOK

Moyor M.A. Evaluation of the engineering language. In: Verdugo-Alonso J. Curricular Evaluation: a guide for the intervention of an engineer. 2nd edition. Madrid. Salvat, 1994. pp. 324-344.

Sapag-Chain N. Economic Effects of the organizational aspects. In his: Preparation and evaluation of projects. 2nd edition. Mexico DF. McGraw-Hill, 2004. pp. 119-131.

## ELECTRONIC BOOKS

Pumarino A. The intellectual property in digital educative surroundings [in Web]. Systematic revision. Santiago, Chile. DuocUC, 2004 [date of consultation 18 of October 2005]. Available in:

<http://www.uca.es/dept/psicologia/bvsss/csahud/memoria/pdf/tecnologia.html>

## CHAPTER OF AN ELECTRONIC BOOK

Anderson S. Multimedia in internet [in Web]. California. Agency of Evaluation of Multimedia technology, 1998 [date of consultation 16 of May 1998]. Chapter 6. Formation and accreditation of multimedia models. Available in:  
<http://www.usu.edu/sanderso/multinet.pdf>

## ARTICLE PRINTED MAGAZINE

García-Sosa J., Morales-Burgos A., Zaragoza-Grifé N. Determination of the cost in systems of pipes in series using the Mathcad. *Engineering: Academic magazine of FIUADY*, 9 (2): 19-34. January-April 2005.

## ELECTRONIC MAGAZINE

Magazine of the OMPI [in Web]. 1a edition. Ginebra. OMPI, 1998 [date of consultation 25 of April 2006]. Available in:  
<http://www.wipo.int/freepublications/es/index.jsp>.

## ARTICLE ELECTRONIC MAGAZINE

Druker M.F. Intellectual property, innovation and development of new products. *Magazine of the OMPI* [in Web]. Vol. 3, No. 4. June-August 2005 [date of consultation 25 of July 2006]. Available in:  
<http://www.wipo.int/freepublications/es/index.jsp>.

## THESIS

Iturbe- Arguelles M. of the R. Transport and organic chemical compound dispersion through the porous flow. Thesis (Doctorate in engineering). Mexico DF. Universidad Nacional Autónoma de México. 1997. 120 p.

## CONFERENCES, CONGRESSES, SEMINARIES

Congress of the Chilean Association of Automatic Control (10°, 1992, Santiago Chile). Works of plantation. Santiago, Chile. Chilean Association of Automatic Control, 1992, pp. 340-356.

## DOCUMENT PRESENTED IN CONGRESSES OR MEETINGS

Castellano-Costa J. The environmental impact of the edificatory process. In: International Seminary of Construction (1a, 2005, Santiago, Chile). Works of engineering. Santiago, Chile. DUOCUC, 2006, pp. 52-62.

In case the type of material cited is not mentioned here, make sure the information provide is complete.

## ARBITRATION

The articles will be valued by three recognized specialists of high level, with the ability and experience to evaluate in reliable and expeditious way, as much the quality and the originality like the merit of the content of each work.

## PROOFREADING OF GALLEYS

The authors will receive the final tests of their work with the intention of making a last revision before their publication; also, will have to authorize the form of "responsibility, approval of copies and cession of author rights".

## REPRINTS

The authors can have 10 copies of issue, which be ordered calling the office of the journal, by e-mail or through our Web Page.