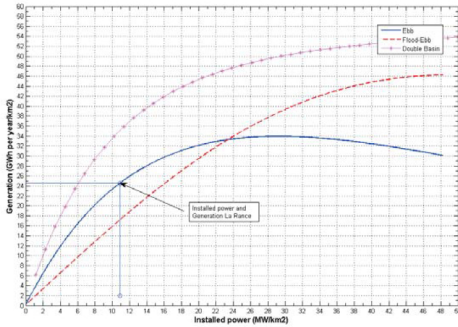
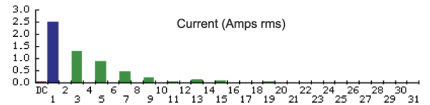
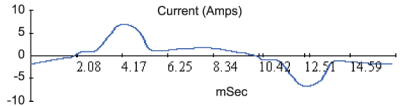




INGENIERÍA

Investigación y Tecnología

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO · FACULTAD DE INGENIERÍA · MÉXICO 2010



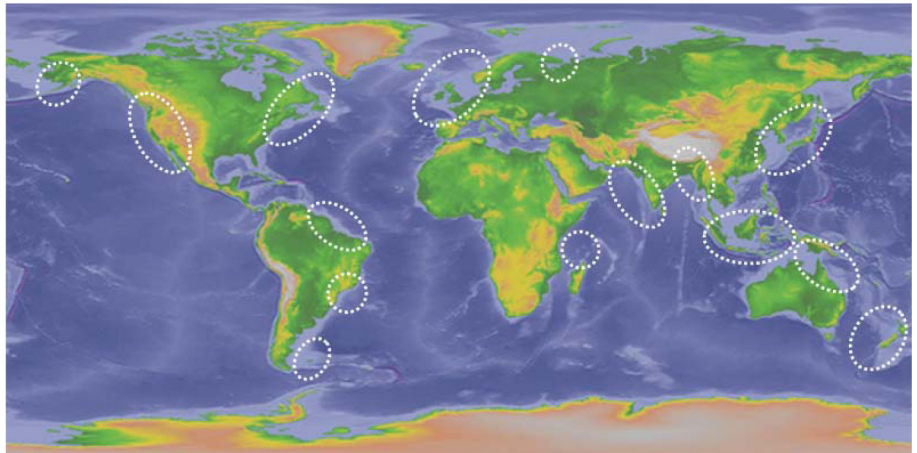
Summary Information

Power KW	0.28
KVAR	0.37
Total PF	0.76

Harmonic

Harmonics	Freq.	I Mag	% RMS
DC	0.00	0.03	1.03
1	59.96	2.52	83.14
2	119.92	0.03	0.91
3	179.88	1.32	43.45
4	239.85	0.01	0.31
5	299.81	0.88	29.16
6	359.77	0.01	0.27
7	419.72	0.48	15.84

	Voltage	Current
RMS	122.77	3.03
THD Rms	1.74	55.54



PR 1-128
 abril - junio 2010
 No. 2
 Vol. XI
 Investigación y Tecnología
 Ingeniería



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

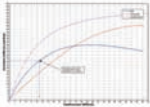
YURITZI RENÉE OLIVERA RANGEL
Coordinación de Diseño y Edición

...

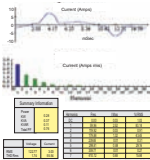
[CONTENIDO / INDEX]

- 127-139 Una estructura neurodifusa para modelar la evapotranspiración instantánea en invernaderos
A Neurofuzzy Structure Modelling Evapotranspiration in a Greenhouse Crop
Ramos-Fernández J.C., López-Morales V., Lafont F., Enea G. y Duplaix J.
- 141-154 Calibration of Parallel Manipulators and their Application to Machine Tools. A State of the Art Survey
Calibración de manipuladores paralelos y su aplicación a las máquinas herramienta.
Un Estudio del estado del arte
Hernández-Martínez E.E., López-Cajún C.S. and Jáuregui-Correa J.C.
- 155-165 Diseño teórico y simulación de un relevador de sobrecorriente con capacidades dinámicas de ajuste
Theoretical Design and Simulation of an Overcurrent Relay with Dynamic Setting
Conde-Enriquez A., Vázquez-Martínez E. y Cantú-Gutiérrez V.P.
- 167-177 La dureza del agua como indicador básico de la presencia de incrustaciones en instalaciones domésticas sanitarias
Water Hardness as Basic Indicator the Presence Fouling in Domestic Sanitary Facilities
Julián-Soto F.
- 179-188 Intensidades máximas de lluvia para diseño hidrológico urbano en la república mexicana
Rainfall Maximum Intensities for Urban Hydrological Design in Mexican Republic
Campos-Aranda D.F.
- 189-198 Contaminación armónica producida por cargas no lineales de baja potencia: modelo matemático y casos prácticos
Harmonic Pollution Produced by Low Power Nonlinear Loads: Mathematical Model and Practical Cases
Mora-Barajas M.A. y Bañuelos-Sánchez P.
- 199-216 Metodología para el modelado del comportamiento mecánico de hueso esponjoso a partir de sus microestructuras
Mechanical Modelling of Cancellous Bone from their Microstructure
Ramírez-Díaz E.I., Ortiz-Prado A., Schouwenaars-Franssens R. y Ruiz-Cervantes O.
- 217-231 Generic Model to Send Secure Alerts for Utility Companies
Modelo genérico para el envío de alertas seguras en empresas del sector energético
Galván-Bobadilla I., Santos-Domínguez M. and Perez-Díaz J.A.
- 233-245 Cuantificación de energía de una planta mareomotriz
Tidal Power Plant Energy Estimation
López-González J., Hiriart-Le Bert G. y Silva-Casarin R.
- 247-252 El análisis campo-sustancia
The Substance-Field Analysis
Acosta-Flores J.J.

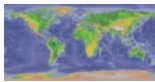
Portada / Cover



Generación en La Rance.



Corriente que demandan varias cargas residenciales, simultáneamente.



Sitios en el mundo con importantes rangos de marea.

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, 2010.

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

E-mail: 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.

Una estructura neurodifusa para modelar la evapotranspiración instantánea en invernaderos

A Neurofuzzy Structure Modelling Evapotranspiration in a Greenhouse Crop

Ramos-Fernández J.C.
Universidad Politécnica de Pachuca, México.
E-mail: jramos@upp.edu.mx

López-Morales V.
Centro de Investigación en Tecnologías de Información y Sistemas-ICBI
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México.
E-mail: virgilio@uaeh.edu.mx

Lafont F.
Laboratoire des Sciences de L'Information et des Systèmes UMR-CNRS 6168
Equipe COSI, Université de Sud-Toulon Var, La Garde.
E-mail: lafont@univ-tln.fr

Enea G.
Laboratoire des Sciences de L'Information et des Systèmes UMR-CNRS 6168
Equipe COSI, Université de Sud-Toulon Var, La Garde.
E-mail: enea@univ-tln.fr

Duplaix J.
Laboratoire des Sciences de L'Information et des Systèmes UMR-CNRS 6168
Equipe COSI, Université de Sud-Toulon Var, La Garde.
E-mail: duplaix@univ-tln.fr

(Recibido: septiembre de 2006; reevaluado: enero de 2009; aceptado octubre de 2009)

Resumen

En este artículo se reportan los resultados obtenidos de la experimentación con una planta de jitomate (*Lycopersicon esculentum*, Mill), en donde se propone una estructura neurodifusa para modelar la evapotranspiración instantánea. Se definen dos dinámicas de operación temporal (diurna y nocturna) en el modo de funcionamiento del sistema, se trabaja con un modelo de jerarquía difusa, así como una estructura de reglas *Si-Entonces* del tipo Takagi-Sugeno (*T-S*) con sus consecuentes lineales. La medición de la radiación solar se utiliza como selector difuso de las dos dinámicas de trabajo. La identificación de las premisas de las reglas difusas se obtiene mediante el algoritmo de clasificación difuso *C-means* y los parámetros de los consecuentes se determinan mediante el algoritmo de mínimos cuadrados ponderado por los valores de pertenencia. Se usa la variable del *déficit de presión de vapor (DPV)* para una mejor simplificación en la estructura neurodifusa del modelo de evapotranspiración. Esta variable se mide de manera indirecta usando las lecturas de la

temperatura y la humedad relativa del invernadero, y así se obtiene una interpretación física del microclima que ayuda a preservar la calidad y sanidad del cultivo en el invernadero.

Descriptores: modelado jerárquico difuso, déficit de presión de vapor, evapotranspiración instantánea, algoritmo difuso de clasificación *C-means*.

Abstract

*This paper shows the applicability of a neurofuzzy method applied to a tomato plant (*Lycopersicon esculentum*, Mill), in order to obtain a model of the instantaneous evapotranspiration. Two operational dynamics (diurnal and nocturnal) are defined in a hierarchical fuzzy model by a Takagi-Sugeno (T-S) type with linear consequents. The fuzzy selector of the two dynamics is the solar radiation measure. The fuzzy C-means algorithm is used to identify the fuzzy rules premises. The hierarchical fuzzy modelling is used to obtain a multi-model of the evapotranspiration cycles. In order to simplify the model structure, the variable of vapour pressure deficit (VPD) is introduced, and thus, a physical interpretation of the interior climate is obtained. VPD helps to preserve the quality and production level in the greenhouse crop.*

Keywords: Hierarchical fuzzy modelling, vapour pressure deficit, instantaneous evapotranspiration, fuzzy C-means classification algorithm.

Introducción

El modelado de la evapotranspiración de cultivos en invernadero, ha sido estudiado por diversos autores con diferentes enfoques, así como el control del microclima, como se muestra en (Seginer, 2002), (Sigrimis *et al.*, 2000), (Harmanto *et al.*, 2004), (Körner *et al.*, 2003), (Orgaz *et al.*, 2004), (Jou *et al.*, 2004), (Tantau *et al.*, 2003), (Poss *et al.*, 2004), (Abdulah *et al.*, 2004), (Medrano *et al.*, 2004), (Roh *et al.*, 1996). Algunos enfoques están orientados al uso eficiente de la energía para mantener la temperatura y la humedad (microclima) del invernadero en el rango deseable para una adecuada calidad en el cultivo, y de esta forma, disminuir la aplicación de agroquímicos para el control de plagas y enfermedades del cultivo. El microclima de un invernadero depende en parte de la dinámica de la evapotranspiración presente, la cual incluye: la transpiración de la planta y la evaporación del suelo, así como de las condiciones existentes en los mecanismos del invernadero (cortinas, domos, sombra, humidificadores y calefacción), también de las perturbaciones climáticas. Uno de los parámetros que mejor integran el estado de sanidad y desarrollo de un cultivo, es el *DPV*, el cual está ligado directamente con las dinámicas de evapotranspiración. En (Prenger *et al.*, 2001) y (Körner *et al.*, 2003) se muestra que el estado del cultivo se ve alterado por las variaciones extremas del microclima y la dinámica de

evapotranspiración, condición que puede propiciar la incidencia de enfermedades y plagas. Un enfoque que ayuda a trabajar los ciclos de producción en invernadero de forma preventiva con resultados favorables, mediante el control del microclima y acciones fitosanitarias, se le conoce como manejo integrado de plagas (MIP) (Tantau *et al.*, 2003). Asimismo, en (López *et al.*, 2008) se considera un sistema inteligente para que a través de la AIP y el *DPV*, se realicen acciones preventivas en el cultivo de un invernadero. Una buena forma de prevenir enfermedades y plagas, así como mejorar la calidad y cantidad de la producción, es realizando el control en lazo cerrado del microclima con la retroalimentación del *DPV*. En (Körner *et al.*, 2003) se reportan valores de referencia del *DPV* entre 0.3-1.0 *kPa* que ayudan a mantener los cultivos sin problemas de enfermedad y con una adecuada transpiración de las plantas. En Sánchez y Rebolledo (2001) se reporta un rango de temperatura adecuado para el cultivo de jitomate en invernadero que debe estar en 16-24 °C; sin embargo, las perturbaciones climáticas no lineales no siempre permiten mantener estos valores de temperatura en el rango de interés. Es por esto que en (Gary, 2001) se ilustra cómo la integración de la radiación solar es una variable importante en las estrategias para el control de riego. Recientemente, algunas técnicas basadas en inteligencia artificial (IA) y algoritmos computacionales han sido utilizadas con resultados alentadores en el modelado y control del

microclima, la evapotranspiración y control de la irrigación en invernadero, como se ilustra en (Bahat *et al.*, 2000), (Abdulelah *et al.*, 2004), (Castañeda *et al.*, 2006), (Trajkovic *et al.*, 2000), (Salgado *et al.*, 2004), (Jou *et al.*, 2004). Por ejemplo, en Salgado *et al.* (2004) se propone un modelo con el enfoque de jerarquía difusa para aproximar la temperatura de un invernadero, en donde la dinámica del modelo de la temperatura se separa en dos regímenes de trabajo: temperatura con ventilación forzada y temperatura sin ventilación forzada. En Roh *et al.* (1996) utilizan la integración de la radiación solar para controlar la frecuencia en los ciclos de riego en un cultivo de pepinos. En Sigrimis *et al.* (2000) utilizan la integración de la temperatura en periodos de días (1, 2, 3, o más), para realizar el control de la temperatura con un enfoque de ahorro en el consumo de energía. En Gary (2001) se reportan algunas estrategias para realizar el control de los ciclos de riego y la nutrición en donde se citan ejemplos para la producción de jitomate en invernadero.

En el presente trabajo se realiza la integración de la radiación solar entre cada ciclo de riego, la cual se usa como una variable de entrada al modelo que se propone, donde se ilustra que la radiación solar es la variable que más peso tiene en las estrategias para el control del riego, mientras que los sistemas de control en lazo abierto mediante temporizadores (de uso bastante extendido actualmente) no responden adecuadamente a las necesidades de riego del cultivo. En Flores *et al.* (2005) se efectúa la integración de la radiación solar como un parámetro para realizar el control de los ciclos de riego a una producción de jitomate en invernadero. Este trabajo presenta también la integración de la radiación entre cada ciclo de riego, que se utiliza como una variable de entrada al modelo neurodifuso de evapotranspiración instantánea. Otro enfoque para programar los ciclos de irrigación, se presenta en Abdulelah *et al.* (2004), en donde se propone un modelo difuso para usar el índice de estrés hídrico foliar del cultivo (por sus siglas al inglés *CWSI*) como indicador del momento del riego, donde se mide la temperatura foliar del cultivo con un termómetro infrarrojo, entre otras diferentes variables del microclima. El *CWSI* toma valores desde *cero* hasta *uno*, el valor ideal se considera cercano a *cero* (sin estrés hídrico), cuando el valor del *CWSI* es *uno* es letal para el cultivo. Sin embargo, en Abdulelah *et al.* (2004) no se indica una metodología para determinar las necesidades hídricas de la planta y solamente proponen que el parámetro *CWSI* sea un valor cercano a *cero* para mantener sin estrés hídrico el cultivo. Así, proponen un modelo tipo Mamdani con 150 reglas difusas, con lo

cual es claro que no es una tarea simple la programación de un microcontrolador comercial.

El trabajo que se reporta en este artículo propone una estructura neurodifusa para modelar la evapotranspiración de forma instantánea de una planta, que utiliza el *DPV* como una entrada al modelo neurodifuso, el cual puede ser tomado como la referencia para un cultivo de la misma variedad bajo invernadero. Se utilizan las mediciones del microclima de un invernadero experimental tipo Richel de La Université du Sud-Toulon Var-Francia, así como registros de una balanza electrónica de alta precisión (± 0.325 gr a 100 kg) para medir la masa de la planta. Esta es una forma de medir la evapotranspiración de manera directa, también se le conoce como método lisimétrico (Coras, 2000).

Cálculo del déficit de presión de vapor

En la estructura del modelo neurodifuso que aquí se propone, es de especial interés medir en tiempo real el déficit de presión de vapor (*DPV*), y para medirlo de forma indirecta, se utilizan las mediciones del invernadero de: la temperatura en grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$) (T_i) y la humedad ($HR\% = H_i$) del invernadero. Se puede lograr una mejor interpretación de la dinámica evapotranspirativa de la planta, si se mide la temperatura foliar con instrumentos del tipo infrarrojo o láser.

Así, en (Prenger *et al.*, 2001) se calcula el *DPV* mediante una tabla psicrométrica y mediante las ecuaciones (1)-(4).

$$T = 1.8 \cdot T_i + 491.67 \quad (1)$$

$$e_s = 6.8947 \cdot e^{(A/T+B+CT+DT^2+ET^3+F\ln(T))} \quad (2)$$

$$e_a = e_s \cdot H_i / 100 \quad (3)$$

$$DPV = 6.894 \cdot (e_s - e_a) \quad (4)$$

donde T es la temperatura en grados Rankine, e_s es la presión de vapor saturado y e_a es la presión de vapor del aire ambas en *kPa* y las constantes $A = -1.040 \times 10^4$, $B = -11.294$, $C = -0.0270$, $D = -1.289 \times 10^{-5}$, $E = -2.478 \times 10^{-9}$, $F = -6.545$ y *DPV* (*kPa*).

Un parámetro básico en el cálculo de la evapotranspiración es el índice de área foliar (*IAF*), el cual es una relación del área foliar por metro cuadrado de tierra. Es conveniente incluir el *IAF* en la estructura del modelo de evapotranspiración y microclima de un invernadero, ya que éste representa la densidad del cultivo, si se desea

obtener un modelo de evapotranspiración de un ciclo completo de producción. En la estructura de modelado neurodifuso de evapotranspiración instantánea que se reporta en este trabajo, no se considera el *IAF*, puesto que la variación en el tamaño de la planta no es considerable entre cada ciclo de irrigación.

Materiales y métodos

Se instaló una maceta con una planta de jitomate variedad corazón de toro y sustrato inerte (perlita, tipo B 0-1.5 mm, 80-90 kg/m²) sobre una balanza electrónica dentro del invernadero, durante el mes de junio de 2005. Se realizaron mediciones de la masa cada minuto. Con un sistema de computadoras personales (PC) conectadas a una red de comunicación interna (Intranet) y un sistema de adquisición de datos analógicos y digitales, se midieron las variables del microclima y se ejecutaron las acciones de control del microclima invernadero. La gestión para la adquisición de datos y el control de los ciclos de irrigación (en lazo abierto) se desarrollaron con el software LabVIEW Ver. 6.1. El hardware de adquisición de datos de las variables climáticas se realizó con el sistema modular FP-2000 de National Instruments. Los sensores para medir las variables ambientales y el microclima del invernadero son del tipo analógico, los cuales envían la información eléctrica normalizada dentro del rango 4-20 mA hacia el sistema de adquisición de datos.

En una PC se guardaron las mediciones de la masa, el microclima, las variables ambientales y las acciones de control del sistema de sombra y la ventilación cenital. Naturalmente, la primera variable calculada fue el *DPV* para las condiciones existentes en el invernadero.

En la figura 1 se muestran algunas mediciones de la humedad relativa (H_i), la temperatura (T_i) del invernadero y el *DPV* calculado con (1)-(4).

Se observa que la (H_i) tiene valores inferiores de 20%, al mismo tiempo la T_i alcanza *n* valores por arriba de 45 °C. Así, el *DPV* adquiere valores máximos de alrededor de 8.0 kPa durante el periodo de altas temperaturas. Estos valores de temperatura y humedad son extremos para un cultivo agrícola en invernadero.

Observe que a medida que la temperatura incrementa la humedad disminuye. Estos valores tomados como referencia no son comunes en un invernadero manejado correctamente y con sistemas de regulación en lazo cerrado.

Enseguida y mediante un algoritmo en computadora, se realizó la aplicación de riego con un control clásico encendido-apagado, que se programó para activarse cada hora. La solución que se utilizó para irrigar la planta se preparó para la nutrición de jitomate, en formulación similar a la que se indica en (Sánchez y Rebolledo, 2001). Así mismo, se cuidó que el potencial de hidrógeno (*pH*) del agua estuviera dentro del rango sugerido para el cultivo de jitomate.

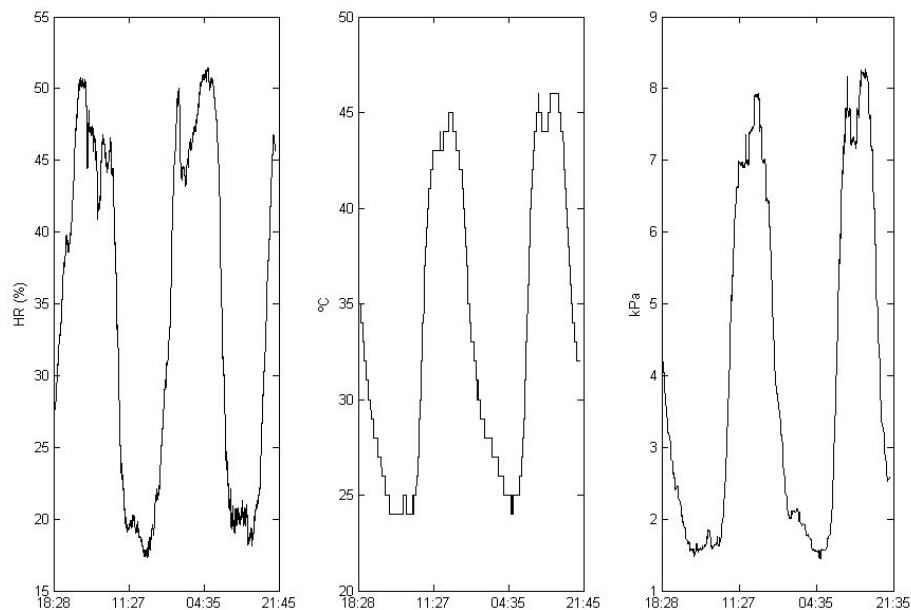


Figura 1. Humedad relativa (H_i %), temperatura (T_i °C) y *DPV* (kPa).

En la figura 2 se muestra el sistema que se utilizó para realizar la experimentación, en donde se observa la balanza electrónica, la maceta con la planta, la guía tutor de la planta y el depósito del agua drenada. A la izquierda, se encuentra el depósito de agua con la solución nutrimental y una pequeña bomba eléctrica.

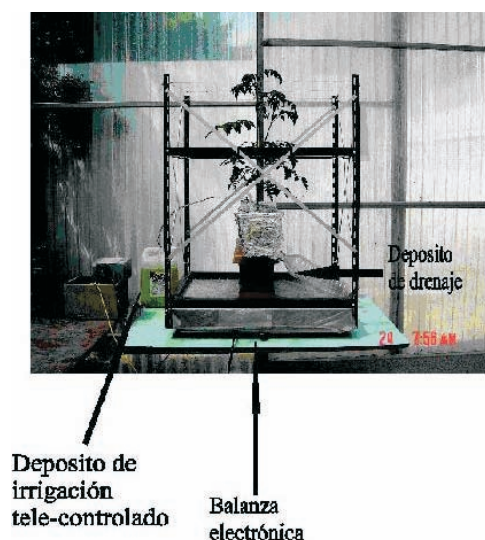


Figura 2. Planta de jitomate, sistema de riego y balanza electrónica

El agua drenada se conservó sobre la balanza electrónica en un depósito como se ve en la figura 2, ya que de esta forma se puede cuantificar el total de agua drenada al final de los ciclos de riego. También se realizaron ciclos de riego con cantidades de agua conservadoras para evitar el drenado.

Como se recomienda en Nuez *et al.* (2001), el volumen de agua disponible para el experimento se inició con sustrato saturado de agua, y durante toda la experimentación se caracterizó la evapotranspiración del conjunto sustrato-planta-microclima. De esta forma, se probaron dinámicas de evapotranspiración desde condiciones con saturación de agua en el sustrato hasta condiciones de estrés de la planta, que permiten así verificar la robustez de la estructura del modelo que se propone en este trabajo.

Lo anterior, obedece a que en las técnicas de modelado neurodifuso con aprendizaje mediante mediciones del proceso, se sugiere excitar al sistema en los modos de operación que se desean modelar e identificar para asegurar que las dinámicas que se aproximan con la estructura del modelado sean muy apegadas a las dinámicas reales (Babuška, 1998).

Desarrollo de la instrumentación virtual para la irrigación

Se realizaron diferentes manipulaciones con el sistema de irrigación para caracterizar el caudal entregado por una pequeña bomba eléctrica alimentada con un voltaje de 5 volts y que es controlada (encendido/apagado) con una tarjeta de adquisición de datos que fabrica la empresa Rabbit®, que cuenta con un puerto de comunicación TCP conectada a una PC remota. Mediante interpolación lineal y utilizando diferentes mediciones de la masa agregada en gramos (*gr*) de agua y el tiempo de encendido de la pequeña bomba en segundos (*s*), se caracterizó el caudal entregado por la bomba eléctrica de acuerdo a (5).

$$Q(t) \begin{cases} 4.137t - 1.625; & \text{si } \textit{bomba} = 1 \\ 0; & \text{si } \textit{bomba} = 0 \end{cases}, \quad (5)$$

donde $Q(t)$ es el caudal entregado por la bomba medido en gramos por segundo (*gr/s*), t es el tiempo que dura encendida la bomba en segundos. La simulación del modelo de aproximación del caudal entregado por la pequeña bomba y los datos reales, se muestran en la figura 3.

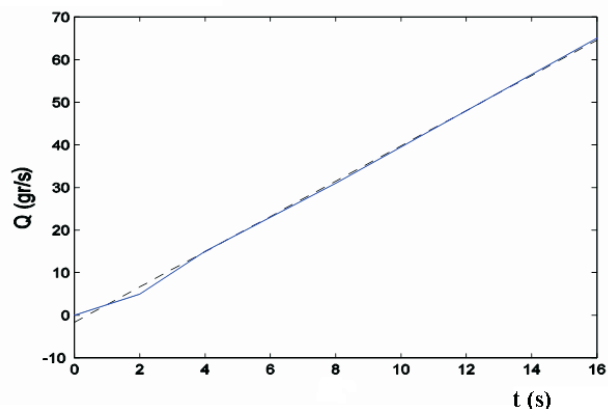


Figura 3. Línea continua caudal real, línea punteada caudal simulado

En un sistema de producción con un invernadero comercial equipado con sistema de riego por goteo, se debe realizar la caracterización del caudal de los goteros, considerando que son autocompensantes. De esta forma, se puede obtener una ecuación que represente al caudal de agua adicionado a cada planta en función del tiempo de encendido-apagado del motor-bomba del sistema de irrigación. Utilizando (5) se desarrolló un instrumento virtual en ambiente de programación de

LabVIEW, para efectuar los ciclos de irrigación, y donde se pueden reprogramar los ciclos de irrigación (en segundos), que se realizan cada hora, a partir de las 6:00 hasta las 22:00 horas.

Estructura neurodifusa de modelado utilizando mediciones del sistema

Tradicionalmente, el arte de modelar sistemas ha sido tratado como un enlace del conocimiento con herramientas matemáticas y la observación en el comportamiento del sistema a modelar. El modelo neurodifuso tipo T-S de evapotranspiración instantánea que se propone en este artículo describe las relaciones entre las variables del sistema por medio de reglas difusas *Si-Entonces*, como se ilustra a continuación:

$$R_i: S_i \text{ X es } A_i \text{ Entonces } Y_i = X\theta_i \quad (6)$$

donde R_i es la regla que describe el i -ésimo submodelo, X es un vector donde se encuentran todas las variables medidas, A_i es la categoría similar o característica común del conjunto de variables X , Y_i es la variable de salida del sistema y θ_i es el vector de parámetros del submodelo de aproximación.

Una ventaja de la estructura de modelado que aquí se propone sobre otras metodologías donde se utilizan parámetros que se describen de forma empírica, v. gr. (Coras, 2001), es que con este modelo se puede realizar la aproximación de manera instantánea de la evapotranspiración.

La aproximación en tiempo real que se realiza para una planta puede extrapolarse para un gran número de plantas y obtenerse así, una buena aproximación de referencia en un cultivo dentro de un invernadero de dimensiones comerciales.

Algoritmo de clasificación de dinámicas C-means difuso

En (6) se observa que A_i es la i -ésima clasificación de la premisa en la regla R_i , de las variables que son medidas para determinar A_i se realizó un proceso de identificación. Para ello, se programó el algoritmo de clasificación *C-means* difuso que a continuación se describe.

Dada una matriz de mediciones Z de un experimento real, que se puede escribir en forma matricial (7), donde las columnas son las muestras en el tiempo, mientras que las filas son las variables $Z \in \mathfrak{R}^{N \times n}$, donde n es el número de variables y N es el número de muestras.

$$Z = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \dots & z_{1N} \\ z_{21} & z_{22} & \dots & z_{2N} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ z_{n1} & z_{n2} & \dots & z_{nN} \end{bmatrix} \quad (7)$$

El objetivo de utilizar el algoritmo *C-means* difuso es hacer la clasificación en cúmulos de datos con *similitud* entre sí, donde este término se entiende como una *similitud matemática* que se calcula por medio de una norma métrica, y para el algoritmo *C-means* difuso, se utiliza la norma *Euclidiana* (Babuška, 1998), (Yen *et al*, 1999). Enseguida, se define el número de cúmulos o particiones difusas $1 < c < N$, donde c es el número de cúmulos en la estructura de reglas difusas T-S, donde cada cúmulo identifica la premisa de una regla. Se propone el exponente difuso $m > 1$. Como *C-means* es un algoritmo iterativo, se fija una tolerancia (ϵ) y un máximo número de iteraciones (l) para finalizar la búsqueda de los cúmulos con *similitud* entre sí. Se inicializa la matriz de partición difusa $U^0 = \mu_{ik}^0$ con números aleatorios $\in [0,1]$.

Con el algoritmo *C-means* difuso se estiman los antecedentes de la estructura de reglas *Si-Entonces*, que son los centros de los cúmulos o prototipos de cúmulos de datos, como se describe en el siguiente algoritmo.

Algoritmo C-means difuso

Repetir para $l = 1, 2, \dots$

Paso 1: Cálculo de los prototipos de los centros de cúmulos de datos

$$v_i^l = \frac{\sum_{k=1}^N (\mu_{ik}^{l-1})^m z_k}{\sum_{k=1}^N (\mu_{ik}^{l-1})^m}; \quad 1 \leq i \leq c.$$

Paso 2: Cálculo de las distancias

$$D_{ikA}^2 = (z_k - v_i^l)^T A (z_k - v_i^l); \quad 1 \leq i \leq c, 1 \leq k \leq N,$$

donde A es la matriz identidad.

Paso 3: Cálculo de la matriz de partición difusa

Si $D_{ikA} > 0$ para $1 \leq i \leq c, 1 \leq k \leq N$

$$\mu_{ik}^l = \frac{1}{\sum_{j=1}^c \left(\frac{D_{ikA}}{D_{jkA}} \right)^{2/(m-1)}}.$$

De otra manera:

$$\mu_{ik}^l = 0 \text{ si } D_{ikA} > 0, \text{ y } \mu_{ik}^l \in [0,1] \text{ con } \sum_{i=1}^c \mu_{ik}^l = 1$$

$$\text{Hasta } \|U^l - U^{l-1}\| < \varepsilon.$$

Fin del Algoritmo

El algoritmo *C-means* difuso converge hasta que se cumple la condición $\|U^l - U^{l-1}\| < \varepsilon$ ó bien hasta un número máximo de iteraciones (l).

Aplicación del algoritmo C-means difuso a las dinámicas del sistema

En las pruebas realizadas a la estructura que se propone en este trabajo, el número máximo de iteraciones se prefijó en 50 iteraciones ($l=50$) y el resultado en la convergencia del algoritmo no fue mayor a 30 iteraciones. Se observó que el tiempo de convergencia en la búsqueda de los prototipos de cúmulos fue menor al periodo de muestreo que se programó en el sistema de adquisición de datos para los experimentos efectuados. También, en las simulaciones que se realizaron con los datos de los experimentos, se concluyó que era suficiente hacer el aprendizaje con los datos de un ciclo de irrigación, que permiten hacer una buena aproximación del ciclo de irrigación futuro, lo cual hace factible la implementación del algoritmo en tiempo real. Aún así, en este trabajo se tomaron una gran cantidad de mediciones (3000), para que el aprendizaje de los submodelos se realizara durante siete ciclos de irrigación para el periodo diurno y 200 mediciones (3 horas con 20 minutos) para el periodo nocturno.

Así, se puede apreciar la robustez en la respuesta de la estructura de modelado neurodifusa de evapotranspiración instantánea que se propone, cuando se trabaja con un rango de datos mayor a la que se tendría con el algoritmo trabajando en tiempo real.

En la fase de validación con los parámetros determinados en el aprendizaje, el modelo neurodifuso de evapotranspiración instantánea, aproxima la evapotranspiración por más de un día y una noche. Es decir, se puede realizar el aprendizaje entre cada ciclo de riego y obtener un modelo que prediga la evapotranspiración antes del siguiente ciclo de riego. De esta forma, se puede conservar un déficit de agua cercana a cero, considerando la disponibilidad de agua en la maceta como se sugiere en Nuez *et al.* (2001). Aún así, es siempre recomendable tener un porcentaje de drenaje un poco mayor a cero (Sánchez y Rebolledo, 2001).

Cálculo de los consecuentes lineales para el modelo difuso T-S

La estimación de los parámetros consecuentes se realiza con el método de mínimos cuadrados ordinal, en cada cúmulo de datos identificado con el algoritmo *C-means* difuso se hace un mapeo con un submodelo lineal y en consecuencia le corresponde una regla *Si-Entonces*. Los vectores de mediciones del experimento a modelar son agrupados como se indica en (8) y (9)

$$X = \begin{bmatrix} x_1^1 & x_1^2 & \dots & x_1^n \\ x_2^1 & x_2^2 & \dots & x_2^n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_N^1 & x_N^2 & \dots & x_N^n \end{bmatrix} \tag{8}$$

$$Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_N \end{bmatrix}, \tag{9}$$

donde $X \in \mathfrak{R}^{N \times n}$, N es el número de muestras tomadas del experimento para realizar el aprendizaje, es el número de vectores de las mediciones que se utilizan como entradas del modelo y $Y \in \mathfrak{R}^{N \times 1}$ es el vector de mediciones de la variable que se desea aproximar. Se utilizan los valores del grado de pertenencia en cada cúmulo de datos que se expresan en una matriz diagonal como en (10).

$$W_i = \begin{bmatrix} \mu_{i1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \mu_{iN} \end{bmatrix}, \tag{10}$$

donde μ_{ik} son los valores de pertenencia calculados con el algoritmo de *C-means* difuso de la l -ésima iteración, $i=1, 2, \dots, c$, $k=1, 2, \dots, N$ es el índice de muestreo.

Finalmente, los parámetros consecuentes de cada submodelo, se calculan con el algoritmo de mínimos cuadrados (11).

$$\theta_i = [X^T W_i X]^{-1} X^T W_i Y \tag{11}$$

donde $\theta_i \in \mathfrak{R}^{n \times 1}$ es el vector de parámetros lineales que caracteriza al i -ésimo submodelo neurodifuso.

Es decir, un submodelo lineal corresponde a cada cúmulo de datos *similares* entre sí, representados por la

estructura de reglas difusas T-S, como se muestra en (6). Así, particularmente en este caso, se tiene que cada regla tiene la siguiente estructura:

$$R_i: Si X es V_i Entonces Y_i = X\theta_i, \quad (12)$$

donde R_i es la regla que describe el i -ésimo submodelo. La premisa de la regla es: *Si X es V_i* donde V_i es el vector de centros del i -ésimo cúmulo de datos. El consecuente de la i -ésima regla es *Entonces Y_i = Xθ_i*, donde Y_i es la aproximación con la activación de la i -ésima regla, X son las mediciones del sistema que son la entrada al modelo neurodifuso y θ_i es el vector de parámetros estimados mediante el algoritmo de mínimos cuadrados (11).

Modelo de evapotranspiración instantánea

Para obtener la estructura del modelo jerárquico neurodifuso de evapotranspiración instantánea del tipo T-S (12), se analizaron diferentes arquitecturas de entrada-salida con las variables medidas climáticas, las acciones de control del invernadero y la masa del conjunto maceta-planta, utilizando todas las variables disponibles del invernadero experimental. Se utilizó un primer conjunto de datos para hacer el aprendizaje y estimar los parámetros de las reglas difusas T-S. Con otro conjunto de datos se realizó la validación de los submodelos obtenidos. Para las arquitecturas que se proponen en este trabajo, se consideró el menor número de variables de entrada al modelo. La razón es que hay dos dinámicas naturales de evapotranspiración instantánea, una para el día (luz solar) y otra para la noche. Por la noche, la radiación solar es cercana a cero y normalmente no se realizan ciclos de irrigación.

En la figura 4 se muestra la arquitectura propuesta para el submodelo de evapotranspiración que corresponde a la dinámica diurna, donde $T_i(k)$ y $H_i(k)$ son la temperatura y la humedad relativa del interior del invernadero en el evento de tiempo (k), respectivamente.

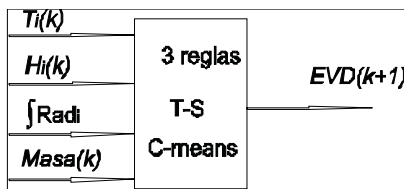


Figura 4. Submodelo de evapotranspiración para la dinámica del día

La variable $Masa(k)$ es la masa de la maceta con la planta, (kg) y $\int Rad_i$ es la integración de la radiación solar en el interior del invernadero ($Rad_i(k)$ en kW/m^2) que se calcula por medio de (13).

$$\int Rad_i = \begin{cases} 0; si bomba = 1 \\ \sum_{k=k_0}^{k=K_{bomba=1}} Rad_i(k); si bomba = 0 \end{cases}, \quad (13)$$

donde k_0 es el primer instante después de la transición enciende ($bomba = 1$) hacia apaga ($bomba = 0$) y $K_{bomba=1}$ es el instante en el cual se inicia el ciclo de irrigación. En los experimentos realizados se fijó un tiempo corto para esta transición ($\leq 9s$). El periodo de muestreo que se utilizó para la adquisición de datos fue de un minuto. Cada vez que hay un ciclo de irrigación se inicializa $\int Rad_i = 0$, es decir, un instante después cuando se adicionó agua a la planta se inicia la integración de la radiación solar hasta el siguiente ciclo de irrigación. Hay que remarcar que los resultados obtenidos utilizando la $\int Rad_i$ como una entrada al modelo, mejoraron la aproximación del mismo con relación a las diferentes arquitecturas entradas-salida que se probaron con las mediciones disponibles del invernadero. Así, el submodelo para la dinámica diurna está en función de las cuatro variables, como se ilustra en (14).

$$MD = [T_i(k)H_i(k)\int Rad_i Masa(k)] \quad (14)$$

En consecuencia, a través de este primer modelo se puede calcular la masa de agua evapotranspirada durante el día y durante el periodo de tiempo comprendido entre cada ciclo de irrigación por medio de (15).

$$EVD(k+1) = \frac{\sum_{i=1}^3 \mu_i^d(k)[MD]\theta_i}{\sum_i \mu_i^d} \quad (15)$$

donde $EVD(k+1)$ es la evapotranspiración aproximada, (kg), $\mu_i^d(k)$, es el valor de pertenencia del i -ésimo cúmulo del algoritmo *C-means* difuso, y

$$\theta_i = [a_i^{T_i} a_i^{H_i} a_i^{\int Rad_i} a_i^{Masa}]^T$$

es el i -ésimo vector de parámetros de los consecuentes lineales obtenidos con aprendizaje local, con el método de mínimos cuadrados.

El submodelo para la dinámica nocturna, no incluye la variable $\int Rad_i$, ya que por la noche la radiación solar es casi nula. Así, la arquitectura del submodelo propuesto para la noche se muestra en la figura 5.

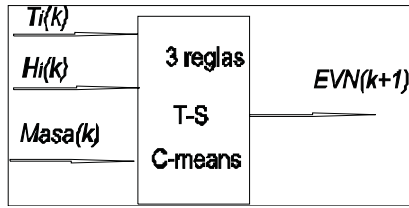


Figura 5. Submodelo de evapotranspiración para el periodo nocturno

La planta transpira cuando se encuentra hidratada de forma adecuada y cuando la planta tiene necesidad de agua y comienza a sufrir estrés hídrico, ésta se auto-protecte hasta cierto punto de su deshidratación cerrando sus estomas por donde transpira y así auto-regula su temperatura biológicamente. El submodelo final para la dinámica nocturna está en función de tres variables, como se muestra en (16).

$$MN = [T_i(k)H_i(k)Masa(k)], \quad (16)$$

en consecuencia, a través del modelo obtenido se puede calcular la masa de agua evapotranspirada en la dinámica de noche y entre cada periodo de muestreo por medio de (17).

$$EVN(k+1) = \frac{\sum_{i=1}^3 \mu_i^n(k)[MN]\beta_i}{\sum_{i=1}^3 \mu_i^n(k)}, \quad (17)$$

donde $EVN(k+1)$ es la evapotranspiración en la noche (kg). El vector $\beta_i = [b_i^{Ti} b_i^{Hi} b_i^{Masa}]^T$ son los parámetros de los consecuentes lineales T-S, de la i -ésima regla, con $i=1, 2, 3$ reglas.

El modelo global instantáneo se obtiene con la agregación jerárquica difusa de los submodelos con (18), donde se utiliza el valor de pertenencia de la radiación solar, que es la variable del selector difuso.

$$EVG(k+1) = \mu^n(Rad_i(k))EVN(k+1) + \mu^d(Rad_i(k))EVD(k+1) \quad (18)$$

donde $EVG(k+1)$ es la evapotranspiración global y $\mu^n(Rad_i(k))$ y $\mu^d(Rad_i(k))$ son los valores de pertenencia del selector difuso para los submodelos de la noche y el día, respectivamente. En este método se utilizan tres cúmulos para cada submodelo (día, noche) y el parámetro difuso $m=2.5$.

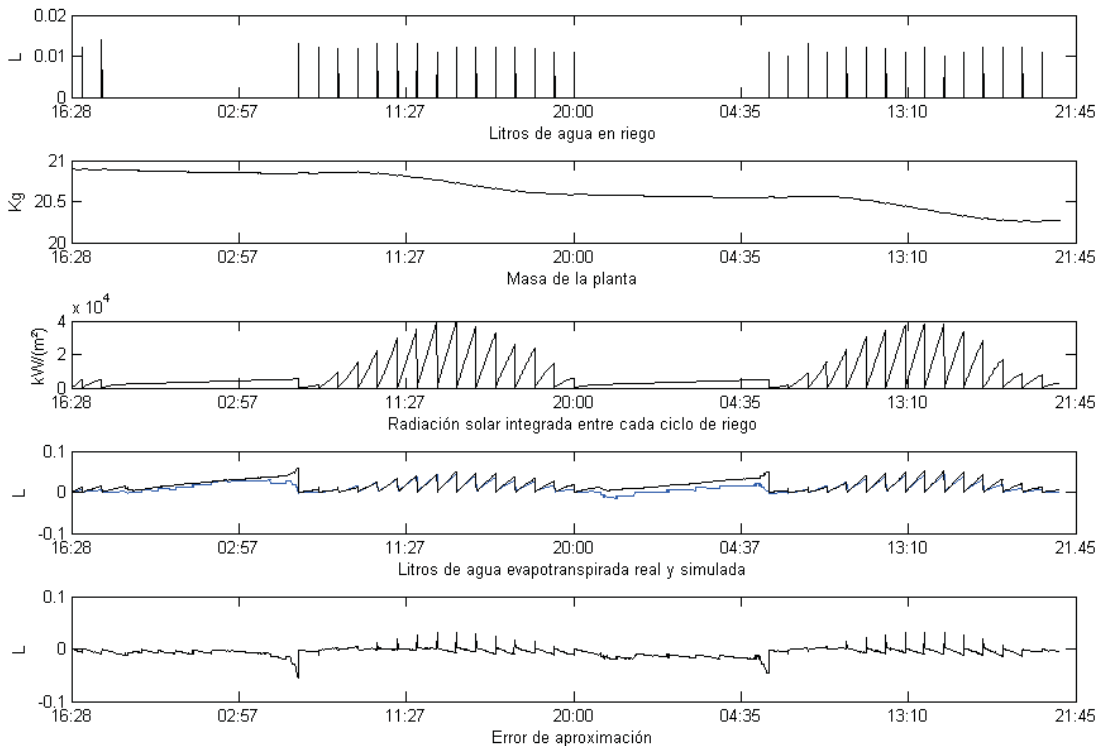


Figura 6. Evapotranspiración utilizando temperatura y humedad relativa

La identificación de los parámetros antecedentes y consecuentes del submodelo que corresponde al periodo nocturno, se realizó con los datos del 15 de junio de 2005 desde las 21:52 hasta las 01:15 del 16 de junio de 2005.

Para el submodelo diurno se tomaron los datos del día 16 de junio de 2005 desde las 06:01 hasta las 13:59 del mismo día.

La validación de los submodelos obtenidos se efectuó con los datos del día 15 de junio de 2005 desde las 18:28, hasta las 20:55 del 17 de junio de 2005.

Los resultados del modelo neurodifuso de evapotranspiración instantánea se pueden ver en la figura 6. El número de muestra $k = 1$ corresponde a la muestra de las 18:28 del día 15 de junio de 2005. En la figura 6 se muestran los ciclos de irrigación con una cantidad de agua en litros (L). Si se considera, la densidad del agua evapotranspirada igual a uno, entonces se puede aproximar la cantidad de agua como $1\text{ gr} = 1\text{ ml}$.

Debido a que el modelo neurodifuso propuesto tiene también como objetivo proporcionar datos precisos de la salida con la mínima cantidad de variables en la entrada, en los siguientes resultados que se muestran en simulación en la figura 7, se suplieron las variables de temperatura y humedad por la variable del Déficit de

Presión de Vapor Se utilizaron los mismos periodos de los datos de aprendizaje y de validación del modelo de evapotranspiración mostrado previamente. De esta forma, también se mejoró la varianza del error y la media del error como índices de calidad en la aproximación con el mismo periodo de experimentación. La estructura del modelo, donde se utiliza el DPV es bastante simple en cuanto al número de parámetros en los antecedentes y consecuentes.

La figura 7 muestra los resultados de la simulación con esta reducción en el número de variables. La variable contiene información del microclima del invernadero, la cual es sumamente útil para relacionar y predecir la sanidad y calidad de cultivo, a nivel de plagas, hongos y deformaciones en los frutos por inadecuada polinización como se ilustra en López-Morales *et al.* (2008).

Análisis de los resultados obtenidos

En los experimentos realizados se determinó mediante la comparación del error de aproximación, que tres cúmulos de datos es suficiente para aproximar la evapotranspiración de forma instantánea, lo que implica submodelos con tres reglas difusas T-S.

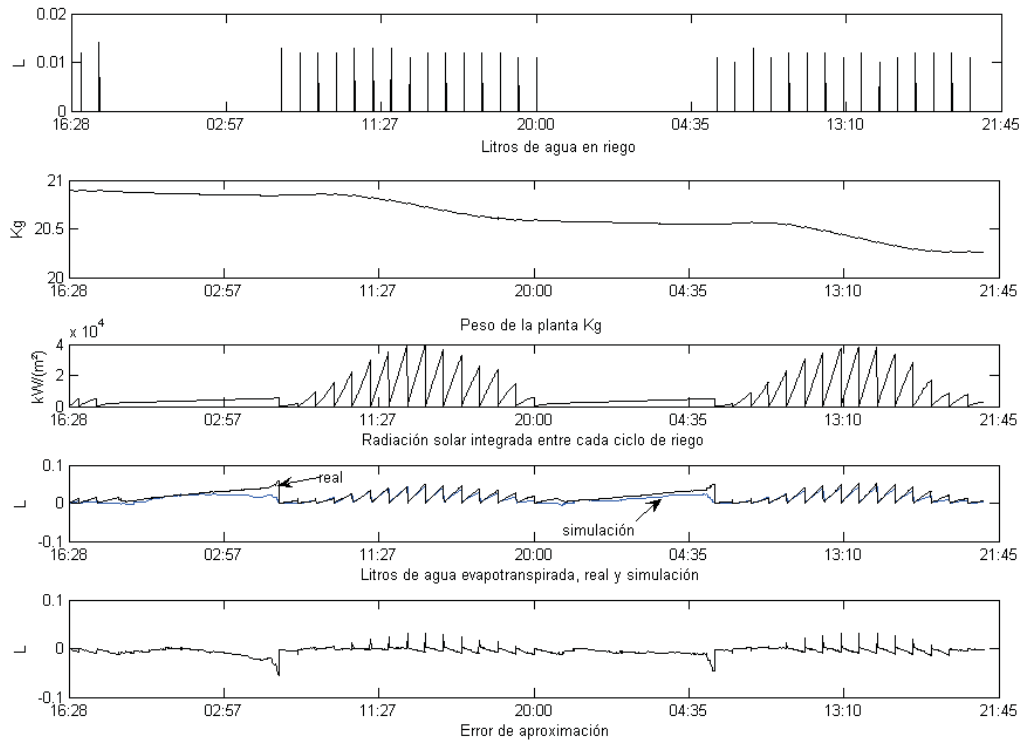


Figura 7. Evapotranspiración utilizando el DPV

Los resultados que se muestran corresponden a dos días de experimentación, una condición inicial que se consideró es el conjunto maceta-sustrato con plena disposición de agua, es decir, después de ser saturada y drenada el agua.

La masa inicial fue de 20.898 kg, y la masa al final de la experimentación fue de 20.262 kg. Se realizaron 32 ciclos de riego (un promedio de 11.843 gr en cada manipulación de riego), con 0.3790 kg de agua suministrada en todo el periodo de la experimentación, donde no se obtuvo drenaje de agua.

Así que, la cantidad de agua evapotranspirada durante el periodo de manipulación se puede determinar con el siguiente balance de masa:

$$M_F = M_0 + M_{ad} - M_{evapo} - M_{dre} \quad (19)$$

$$M_{evapo} = M_0 + M_{ad} - M_F - M_{dre} \quad (20)$$

donde M_F es la masa al final de la manipulación, M_0 es la masa de inicio, M_{ad} es la masa adicionada durante un periodo de irrigación, M_{dre} es la masa de agua drenada y M_{evapo} es la masa de agua evapotranspirada. La masa total que la planta perdió en el periodo de los experimentos realizados fue de 1.016 kg.

El déficit de agua fue grande, debido a la elevada temperatura, y en consecuencia generó un efecto importante en la evapotranspiración. La mínima temperatura y humedad relativa registrada fueron de 28 °C y 17.3%, respectivamente, mientras que la máxima temperatura y humedad relativa fueron 46 °C y 51.4%, respectivamente. Estos valores están fuera de los rangos de las variables recomendadas para un cultivo de este tipo. La estimación del agua total evapotranspirada es posible obtenerla con la estructura de modelado neurodifuso presentado. El modelo toma en cuenta las variables principales que influyen en el proceso dinámico de evapotranspiración. Con ayuda de este modelo y a través del cálculo del DPV es posible en una siguiente fase, regular la cantidad de agua que se suministra a una planta (y enseguida a un cultivo) mientras se conserva un rango deseable del DPV, para asegurar condiciones óptimas de desarrollo y sanidad del cultivo.

Conclusiones y perspectivas

La estructura neurodifusa para modelar la evapotranspiración de una sola planta (testigo) en un invernadero, como aquí se reporta, puede servir de referencia para conocer la dinámica de evapotranspiración en un cultivo que se encuentra con las mismas condiciones de la

planta testigo. Sin embargo, esta dinámica tendrá algunas modificaciones al tomarse en cuenta el cultivo completo (Medrano *et al.*, 2004) dentro del invernadero, debido a que cada planta del cultivo que es hidratada adecuadamente; en plena transpiración funciona como un pequeño regulador de temperatura. Una extensión directa del modelo que se propone es la evapotranspiración, regulando el microclima del invernadero con referencia a los perfiles sugeridos en la literatura que permiten un estado de sanidad de la producción.

Al tomar en cuenta la medición del agua drenada de la planta testigo en una balanza independiente a la medición de la masa evapotranspirada, con el fin de introducir una consigna de drenaje mínima en los ciclos de riego para minimizar la cantidad de agua drenada entre cada ciclo de riego, resultaría en una minimización de agua drenada por planta en un cultivo de dimensiones comerciales, y en consecuencia, un ahorro del agua total utilizada. El DPV puede además ser utilizado como una consigna para realizar el control en lazo cerrado del microclima, como se demuestra en este artículo, es una variable valiosa para realizar el modelado y control del microclima para poder regular la cantidad de irrigación de un cultivo.

Agradecimientos

El trabajo de investigación de Julio Cesar Ramos Fernández, ha sido apoyado por el convenio de Cooperación Científica Internacional ECOS-NORD/ANUIES-SEP-CONACyT M02:M03 (Francia y México) y PROMEP- TTT. El trabajo de investigación de Virgilio López Morales es parcialmente apoyado por el proyecto de investigación ANUIES-SEP CONACyT/ECOS-NORD M02:M03.

Referencias

- Abdullah Al-Faraj, Meyer G.E., Horts G.L. A Crop Water Stress Index for Tall Fescue (*Festuca Arundinacea* Schreb) Irrigation Decision-Making a Fuzzy Logic Method. *Computers and Electronics in Agriculture*, 32:69-84. 2004.
- Babel M.S., Tantau H.J., Salokhe V.M. Water Requirement of Drip Irrigation Tomatoes Grown in Greenhouse in Tropical Environment. *Agricultural Water Management*, 71(3):225-242. 2005.
- Babuška R. *Fuzzy Modeling for Control*. Kluwer Academic Publishers. 1998.
- Bahat M., Invar G., Yaniv O., Shneider M. A Fuzzy Irrigation Controller System. *Engineering Application, Artificial Intelligence*, 1:37-145. 2000.

- Castañeda M.R., Ventura R.E., Peniche V.R.R., Ruiz H.G. Fuzzy Greenhouse Climate Control System Based on a Field Programmable Gate Array. *Biosystems Engineering*, 94(2):165-177. 2006.
- Coras-Merino P.M. *Evapotranspiración y programación de riego*. Universidad Autónoma de Chapingo, Departamento de Fitotecnia. 2000.
- Foulloy L., Galichet S., Titli A. *Commande Floue 2, Systèmes Automat.* Hermes Science (Eds). 2003.
- Flores j., Ojeda-Bustamante W., López I., Rojano A., Salazar I. Requerimientos de riego para tomate de invernadero. *Terra Latinoamericana*, 25(2):127-134. 2005.
- Gary C. Strategies to Control Water and Nutrient Supplies to Greenhouse Crops. *A Review, Agronomie*, 21:311-321. 2001.
- Jou L.J., Liao C.M., Chiu C.Y. A Boolean Algorithm Suitable for Use in Temperature-Humidity Control of a Grafted Seedling Acclimatization Chamber. *Computers and Electronics in Agriculture*, 48:1-18. 2004.
- Körner O., Challa H. Process-Based Humidity Control Regime for Greenhouse Crops. *Comp. and Electr. in Agric.*, 39:173-192. 2003.
- Lafont F., Balmat J.F. Optimized Fuzzy Control of a Greenhouse. *Fuzzy Sets and Systems*, 128:47-59. 2002.
- Lopez-Morales V., López-Ortega O., Ramos-Fernández J.C., Muñoz L.B. JAPIEST: An Integral Intelligent System for the Diagnosis and Control of Tomatoes Diseases and Pests in Hydroponic Greenhouses. *Expert Systems with Applications*, 38(4):1506-1512. 2008.
- Medrano E., Lorenzo P., Sánchez G.M.C., Montero J.I. Evaluation and Modelling of Greenhouse Cucumber-Crop Transpiration Under High and Low Radiation Conditions. *Scientia Horticulturae*, 105:163-175. 2004.
- Nuez F., Rodríguez del R. A., Tello J., Cuartero J., Segura B. *El cultivo del tomate*. Mundi-Prensa. 2001. Pp. 139-141.
- Orgaz F., Fernández M.D., Bonachela S., Gallardo M., Federes E. Evapotranspiration of Horticultural Crops in Unheated Plastic Greenhouse. *Agricultural Water Management*, 72:81-96. 2004.
- Poss J.A., Russell W.B., Shouse P.J., Austin R.S., Grattan S.R., Grieve C.M., Lieth J.H., Zeng L. A Volumetric Sysimeter System (VLS): An Alternative to Weighing Lysimeters for Plant-Water Relations Studies. *Computers and Electronics in Agriculture*, 43:55-68. 2004.
- Prenger J.J., Ling P.P. *Greenhouse Condensation Control, Understanding and Using Vapor Pressure Deficit (VPD)*. Fact Sheet (series) AX-804. Ohio State University Extension, Columbus, OH 1-4. 2001.
- Roh M.Y., Lee Y.B. Control of Amount and Frequency of Irrigation According to Integrated Solar Radiation in Cucumber Substrate Culture. *Proc. Int. Sym. Plant Production in Closed Ecosystems*, 332-337. 1996.
- Salgado P., Boaventura-Cunha J. Greenhouse Climate Hierarchical Fuzzy Modelling Control. *Engineering Practice*. 2004. Pp. 1-16.
- Sánchez Del Castillo F., Rebolledo E.R.E. *Hidroponía*. Edit. Univ. Autónoma de Chapingo. 2001.
- Seginer I. The Penman-Monteith Evapotranspiration Equation as an Element in Greenhouse Ventilation Design. *Biosystems Engineering*, 82(4):423-439. 2002.
- Sigrimis N., Anastasiou A., Rerras N. Energy Saving in Greenhouse Using Temperature Integration: A Simulation Survey.- *Computers and Electronics in Agriculture*, 26:321-341. 2000.
- Tantau H.J., Lange D. Greenhouse Climate Control: And Approach for Integrated Pest Management. *Computers and Electronics in Agriculture*, 40:141-152. 2003.
- Trajkovic S., Stankovic M., Todorovic B. Estimation of FAO Blaney-Criddle b Factor by RBF Network. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 126:268-270. 2000.
- Yen J., Langari R. *Fuzzy Logic Intelligence, Control and Information*. Pearson Education, Inc. 1999.

Semblanza de los autores

Julio Cesar Ramos-Fernández. Realizó sus estudios de ingeniería eléctrica en el Instituto Tecnológico de Pachuca. Fue becario del programa PROMEP para la formación de investigadores y realizó sus estudios de doctorado en co-tutela en la Universidad del Sur Toulon Var-Francia y la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo-México. Sus principales temas de interés en investigación incluyen modelado y control de sistemas complejos utilizando técnicas neurodifusas con aplicaciones en tiempo real a invernaderos agrícolas, actualmente es profesor de la Universidad Politécnica de Pachuca.

Virgilio López-Morales. Realizó sus estudios de doctorado en la Ecole Centrale de Nantes-Francia. Actualmente es investigador de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo-México. Sus temas principales de investigación incluyen el análisis y programación de técnicas de sistemas inteligentes distribuidos, sistemas neurodifusos y control de sistemas dinámicos.

Frédéric Lafont. Recibió en 1997 el grado de doctor en ciencias de la ingeniería por la Universidad del Sur Toulon Var-Francia. Desde 1998 es investigador en el Instituto Universitario de Tecnología de la Universidad del Sur Toulon Var-Francia. Su principal línea de investigación es la identificación y el control de sistemas con múltiples entradas y múltiples salidas con técnicas neurodifusas.

Gilles Enea. Recibió en 1967 el grado de ingeniero electricista por la escuela Supérieure Electronique, Electrotechnique, Informatique et Hydraulique de la Universidad de Toulouse Francia. Desde 1967 a 1972, fue asistente de investigación en el Laboratoire d'Automatique et d'Analyses des Systèmes en la Universidad de Toulouse. Recibió el grado de doctor ingeniero y doctor de estado en ciencias por la Universidad Paul Sabatier, Toulouse en 1970 y 1975, respectivamente. Desde 1972, es profesor en la Universidad del Sur de Toulon Var-Francia, impartiendo cursos de control automático. Fue vice-presidente de esa Universidad de 1995 a 1998. Desde 2002 a 2004 fue co-director del Laboratorio de Sistemas Información y Señales de la misma Universidad.

Jean Duplaix. Estudio en la escuela Supérieure de Cachan-Francia de 1970 a 1975. Es investigador de la Universidad del Sur Toulon Var-Francia. Recibió el grado de doctor en 1994 en la misma Universidad. Actualmente es profesor de matemáticas aplicadas y control automático en el Instituto Universitario de Tecnología de la misma Universidad. Un área de interés en investigación es el control óptimo en el contexto del lugar de los polos. Recientes trabajos que realiza mediante *soft computing* en el contexto de sistemas complejos es el modelado, identificación y control con aplicaciones al microclima en invernaderos agrícolas.

Calibration of Parallel Manipulators and their Application to Machine Tools. A State of the Art Survey

Calibración de manipuladores paralelos y su aplicación a las máquinas herramienta. Un Estudio del estado del arte

Hernández-Martínez E.E.

Facultad de Ingeniería.

Universidad Autónoma de Querétaro, México.

E-mail: e.hernandez@unicas.it

López-Cajún C.S.

Facultad de Ingeniería.

Universidad Autónoma de Querétaro, México.

E-mail: cajun@uaq.mx

Jáuregui-Correa J.C.

CIATEQ

E-mail: jcjaur@ciateq.mx

(Recibido: diciembre de 2007; aceptado: agosto de 2009)

Abstract

Some of the main investigations on calibration methods of parallel mechanisms are briefly discussed in this work. Initially, the identification of errors in these structures applied to machine tools is presented, later the kinematics and the concept of parallel mechanisms calibration is introduced. Additionally, the main characteristics of the existing methods of calibration are discussed, such as the parametrical approaches, the calibration methods with internal/external measuring devices, innovative calibration methods and works that provide assistance to this aim.

Keywords: Parallel mechanisms, calibration, machine tools, inverse kinematics, forward kinematics.

Resumen

Las investigaciones más relevantes sobre métodos de calibración de mecanismos paralelos se discuten brevemente en este trabajo. Inicialmente se aborda la identificación de errores de estas estructuras como aplicación a las máquinas herramienta, después se introduce la cinemática y el concepto de calibración de los mecanismos paralelos. Adicionalmente, se discuten las principales características de los métodos de calibración existentes, tales como los métodos paramétricos, los métodos de calibración con dispositivos internos/externos de medición y trabajos adicionales que proporcionan ayuda para este fin.

Descriptores: *mecanismos paralelos, calibración, máquinas-herramienta, cinemática inversa, cinemática directa.*

Introduction

Parallel mechanisms present several advantages over serial mechanisms, such as high flexibility, high stiffness and elevated accuracy. For this reason, the interest on these structures has been increasing over the last few years. As a consequence, the number of works that deal with open problems of these mechanisms type has also grown. Nowadays, parallel mechanisms are starting to be used in industry such as machine tools, pick and place high velocity robots, and flight simulators, among other applications. This is so due to the high accuracy required for their processes. For the same reason, they are also used for medical applications and rehabilitation. A parallel mechanism has the main property of having its end-effector connected to the base through several serial (and/or parallel) kinematic chains. This allows the parallel mechanism to support heavy loads, high velocity operation and show a better repeatability (Merlet, 1997). However, its great number of links and passive joints offer limited performance in terms of accuracy (Wang and Masory, 1993). For this reason, the kinematic parameters of these mechanisms should be identified with the process called kinematic identification (or kinematic calibration). The objective of the robot kinematic calibration is to determine the exact kinematic parameters for improving its accuracy.

In order to be applied as a parallel kinematic machine (PKM) tool, calibration strategies for parallel mechanisms should be defined and consolidated, (Merlet, 2002). Conventional machine tools typically consist on three mutually orthogonal axes, each one

controlled by a separate driver in linear guides. For a parallel mechanism of n degrees-of-freedom, the global pose depends on all its drivers. For this application, the global error at the end of the tool is the main concern. This error could be due to manufacturing tolerances or assembly errors in the parallel mechanism construction that can be used for tool or workpiece positioning. At high speed, control speed and accuracy play an important role in the overall final position.

In this work, a study on parallel mechanism calibration is presented, including some of the main works recently published and a discussion of the advantages and disadvantages of the calibration methods being used. In Section 2 the identification of PKM source errors is outlined, in Section 3 a mechanism kinematic is presented including the introduction of the calibration concept, and finally, beginning in Section 4, an actualized classification of the calibration methods of parallel structures is included.

Errors identification of parallel kinematic structures used as machine tools

In all manufactured machines or mechanisms a deviation from nominal design values occurs due to assembly or manufacture errors. Many works have been focused on error identification with the objective of improving the absolute accuracy of parallel mechanisms and their applications. In the PKMs, the factors listed below may cause positioning and orientation errors:

1. Parametric errors caused by geometrical deviation of the machine parts and errors in their assembly (i.e.

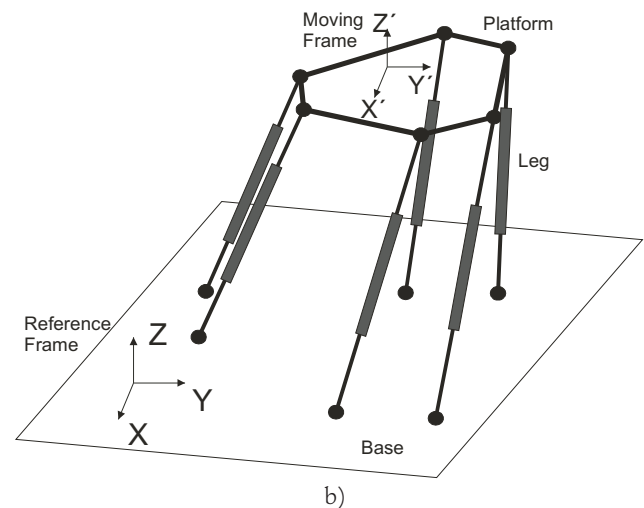
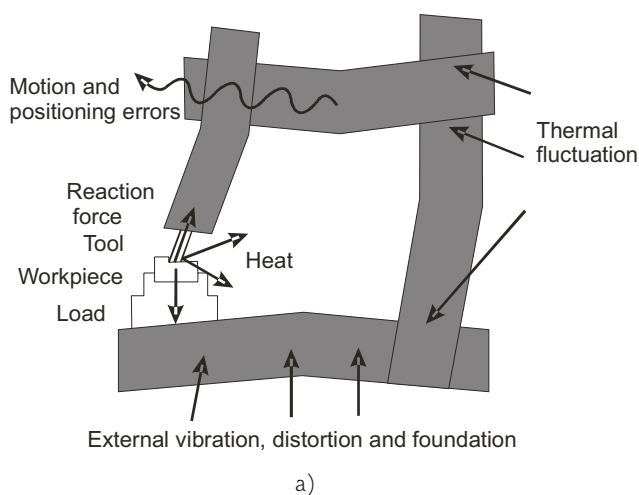


Figure 1. Current structures for machine tools: a) Conventional machine tool, positioning error generation; b) Gough-Stewart platform

- manufacturing process of the machine components, which is known as tolerances);
2. Joint runout caused by geometrical deviation of the joint parts, which is caused by mechanism motion;
 3. Elastic deformations of the links and the joints, which are generated by external forces or by displacement of the center of gravity;
 4. Elastic deformation of the machine frame supporting the mechanism, which is caused by external forces or displacement of center of gravity;
 5. Thermal expansion of the links and the frame, caused by temperature fluctuation.

The abovementioned factors (2-5) can be divided into two groups: mechanism errors and frame deformations. In figure 1a, the positioning error cases related to the tool and the workpiece for a conventional machine tool are shown; these errors also affect the PKMs accuracy. Some studies have been made in order to improve the PKM accuracy, Zhuang and Roth (1993) proposed a measurement method that consists of the separate estimate of parameters for each leg. In a machine tool of hexapod type, Ziegert (1996) attributed the source errors in the model to the uncertainties of the theoretical model, such as coordinates of the base joint center and moving platform, link length in the initial position, as well as tool length. Soons (1997) reported the measurement and analysis of the geometrical errors in a PKM, through its kinematic model and experimental measurements using conventional metrology tools. The research reported in (Rudder, 1997) was focused in error modeling, error computation and stiffness analysis.

Parenti-Castelli *et al.* (1998) emphasizes that kinematic and dynamic behavior of a PKM is strongly influenced by joint geometrical errors. Iowa and Tamaki (2000) reported that the spherical joints distance located at the leg end (which is the leg length) is fundamental for platform accuracy positioning. In (Cui *et al.*, 2005) the kinematic and error modeling using Jacobian matrix method was established for TAU robot (Brogangrdh *et al.*, 2002). In addition, that research introduced the Jacobian approximation method to calculate the forward kinematic problem instead of the Newton-Raphson method. The full size Jacobian matrix is used in order to estimate and identify the model parameters. Error compensation methods for PKMs have been described by Oiwa, (2005). He discussed the joint and link deformations caused by external forces and heat by working with two types of errors that establish the relative positioning between tool and workpiece for conventional machines, the mechanical

errors and the frame deformation of the mechanism. Deblaise *et al.* (2004) studied the Delta robot and took into account errors due to the elasticity of the links.

Kinematics and calibration of parallel structures

The best known parallel mechanism is the Gough-Stewart platform and it commonly has been applied as machine tool. This manipulator consists of two rigid bodies, called the base and moving platform, connected to the base by six legs, as shown in figure 1b. Each leg is, in turn, a six degree-of-freedom (dof) serial kinematic chain. These legs provide a sixth dof for any arbitrary pose (position and orientation) of the end-effector relative to the base that corresponds to the operation point, given as a vector \mathbf{p} and the orientation imbedded in a rotation matrix \mathbf{Q} . Thus, the pose \mathbf{x} can be expressed as $\mathbf{x}=\mathbf{x}(\mathbf{p},\mathbf{Q})$, which in turn, depends on the variations of each length of the prismatic joint, c_i , for $i=1,\dots,6$, which can be measured by internal sensors. Each leg is attached to the base by a universal joint and to the platform by a ball joint. Thus, there are 42 kinematic parameters -36 parameters for joints centers and six nominal lengths of the legs-, (Wang and Masory, 1993). In addition, the main error source in positioning is related to the limited knowledge of the joints center and a fraction of the size is not defined by the sensors. The kinematic models are essential for robot control, and produce the constraints used in calibration. By inverse kinematics, the length c_i of the i th leg as a function of the desired pose can be computed as

$$c_i = \|\mathbf{p}_i - \mathbf{b}_i\| = \|\mathbf{x} + \mathbf{Q}\mathbf{p}_i - \mathbf{b}_i\| \quad i = 1, \dots, 6 \quad (1)$$

where \mathbf{b}_i and \mathbf{p}_i are the position vectors of the attachment points of the legs on the base and platform, respectively, in a coordinate frame fixed to the base, meanwhile \mathbf{p}'_i are the position vectors of platform points in a coordinate frame fixed to the platform. For the Gough-Stewart platform, the forward kinematics is more difficult to calculate since one must solve Eq. (1) for \mathbf{p} given c_i for $i=1,\dots,6$ and the mechanism parameters. Clearly, the parallel mechanism configuration is related to the parameters of the kinematic structure through the equations of the kinematic model. The calibration proposal is the positioning error reduction of the end-effector using a precision identification of the kinematic parameters. It is known that the feasible and economical way to improve the parallel mechanism accuracy is by kinematic calibration. Calibration is crucial to any autonomous manipulator when high accuracy is

required. Additionally, if the precise mathematical model is used as support, it can get an excellent positioning performance. Nowadays, a necessary condition to introduce the PKMs in the industrial context is to develop a fast calibration technique.

The calibration could be achieved measuring several mechanism configurations and identifying its respective kinematic parameters. The number of equations given by measurements is less than the number of unknown parameters. Data measurements are generally produced by a sensor, thus it is necessary to consider the noise associated to this device. The general parallel manipulator calibration includes the following tasks:

1. Platform kinematic modeling in order to know the main source of error;
2. Measurement of platform poses;
3. Error identification of platform kinematic parameters using measurement data;
4. Compensation of the platform accuracy using identified error parameters.

An important part of the calibration process is measuring the actual pose of some parts of the manipulator. A great variety of sensors have been used for this purpose. For some of them extra objects have to be installed on the manipulator, so it is possible to add extra accuracy problems. In accordance with the above four points of calibration tasks, a great variety of calibration algorithms has been developed according to specific requests. In Figure 2, several calibration methods for parallel manipulator calibration are shown, and discussed below.

Parametrical approaches

The classic methods for the calibration of parallel robots require extra sensor devices for the measurement of the pose of the moving platform and the values of the joint variables. Then, the calibration problem can be formulated to derive a residue, which is the difference between the measured variables and the calculated ones by using the kinematic model.

Parametrical approaches are also called model-based calibration strategies. Hollerbach *et al.*, (1994) concluded an important principle for the calibration of parallel mechanisms: *The calibration is possible if the number of joint sensors (including the measurement equipment), referred as the sensor degree, exceeds the mobility system to calibrate.* They define the calibration index as the excess of sensors on the mobility of the mechanism. Furthermore, they established that the calibration index represents the number of independent equations by pose available for the calibration.

Some calibration methods are based on the forward kinematics model (FKM) and come up directly from the methods developed for serial mechanisms. Such methods reduce a nonlinear error between the pose measurement of the end-effector and its estimation of measurement values of the joint variables, (Wang and Masory, 1993). However, in general, a single numerical evaluation of the FKM for the parallel mechanism is obtained.

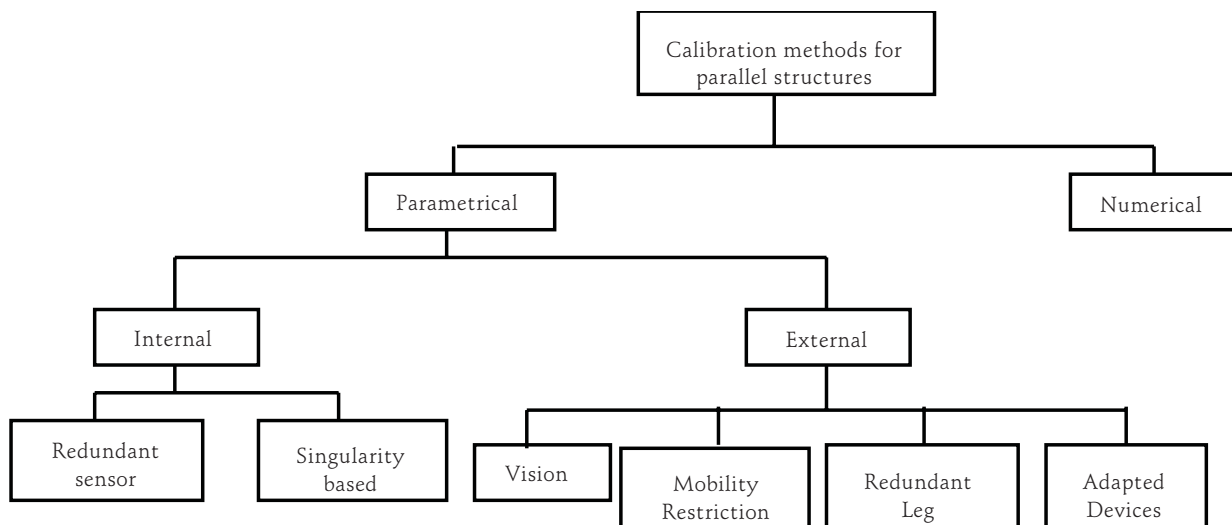


Figure 2. Calibration approaches of parallel structures

This could lead to numerical instabilities of the identification (Daney, 1999), and translated to the case of control, this result means that convergence cannot be guaranteed. Daney *et al.*, (2005) proposed an algorithm based on a constrained optimization method, which allows to choose a set of measurement configurations. In (Daney *et al.*, 2006) the dependency on the parameters of pose of a planar parallel manipulator calibration is eliminated; the FKM in the scheme of calibration is used. Since this model has different solutions, the authors set out two alternatives. One of them makes use of algebra to explain the relation between the set of sensors and the parameters, and the other one diminishes the residual errors of a restricted formulation of the FKM.

For solving the control problem, many investigators are innovating in the subject of structural synthesis, that is to say, they try this type of mechanisms with analytical or semi-analytical FKM. Redundant sensors for position have been used as an advisable way to solve the problem of forward kinematics. By reducing the number of necessary sensors, it is possible to overcome such problem. Nevertheless, for many applications of parallel manipulators, the problem of forward kinematics is a single small part of the control stage, used to obtain knowledge of the current manipulator position, but not in real time. A typical scheme control is represented in figure 3.

The trajectory is generated first in the Cartesian space; then, each Cartesian location is transformed to a position vector into the joint space via the inverse kinematics model (IKM). The control—that is, the heavy part in real time of the process—is obtained in the last space, the FKM frequently is implemented as a man-machine interface routine in the initial phase. Based on the error model, it is possible the mapping from the geometric errors to the pose error of a PKM. However, this

mapping error could increase the global accuracy of the structure.

It is well known that for parallel mechanisms, the IKM can easily be derived. Then, the most natural method to develop the identification is to diminish an error between the measurements of the joint variables and their corresponding values, considering the pose measurement of the end-effector through the IKM. Last *et al.* (2005a) presented an IKM for the HEXA parallel robot which contains an increased number of geometric parameters as compared to the ideal geometric models while still being analytical solvable. Huang *et al.* (2005) presented an external-calibration-based approach that enables the geometric parameter errors of 6 dof PKM to be identified using a minimum set of pose error measurements.

With simulation results, they found strong correlations between all the parameters in the kinematic calibration of a Gough-Stewart platform. Sato *et al.* (2004) proposed to use *a priori* knowledge of the kinematic parameters to eliminate their correlation and to give robustness to the calibration. Using this knowledge through simulations, all kinematic parameters are identified in the artefact calibration without divergence.

The method of calibration based on IKM is seen more efficient in a numerical way in many of the identification algorithms for parallel mechanisms, but it is restricted by the necessity of precise measurements of all the poses of the end-effector, (Khalil and Besnard, 1999). In order to reduce the parametrical errors, some studies called parametrical calibrations have been performed.

These calibrations deal with static or kinematic systematic errors and do not allow the inclusion of unexpected disturbances or thermal fluctuation. Nevertheless, such non repetitive or geometrical errors should be compensated before kinematic calibration.

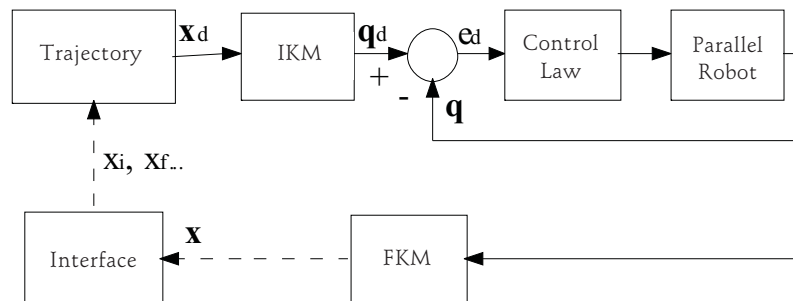


Figure 3. A scheme of the typical control for parallel robots

Calibration with additional internally measuring systems

The self calibration methods of parallel robots generally make use of extra sensors on the passive joints and allow the identification of the workspace. In this method, the values of the kinematic/geometrical parameters with the purpose of diminishing a remainder between the measured values and the calculated ones of the variables of the passive joints, are due to fit.

Approach of redundant sensors

In this approach it is necessary to have one or more sensors on the passive joint in an appropriate way, with the purpose of increasing the number of sensor degrees on the dof, so that the calibration algorithm can be applied. Yang *et al.*, (2002) focus on the calibration of the base and tool. Sensors in the passive joints and the transformation kinematics of the base to the frame of the moving platform are used and calculated. The iterative algorithm of least squares is utilized to identify the errors of the parameters. In Zhuang and Liu, (1996), for calibrating the Gough-Stewart platform, three functions for rotational parametric identification are used by applying IKM and FKM with six encoders. In this same approach, in (Hollerbach *et al.*, 1994) the calibration for a redundant parallel robot of 3 dof is reported. Multiple closed loops in the optimization method were used with least squares. In (Khalil and Besnard, 1999), a method for the kinematic calibration of 6 dof robots using two inclinometers is presented. The calibration model takes into account the error from the angle between the axes of the inclinometer. The estimation of the parameters is obtained using the Levenberg-Marquardt algorithm, (Marquardt, 1963).

With the use of additional sensors in the passive joints, the control functions, like calibration, supervision of the workspace and position control can be improved. In order to operate the potential of the concept of sensors in the passive joints, in (Hesselbach *et al.*, 2005) calibration algorithms are developed to evaluate the additional information for certain functions of control, determining the necessary resolution of the sensors for a class of parallel robots. In (Zhang *et al.*, 2007) based on the study of the relationship between the projected tracking error of the redundant joint angles, and the error of the sensor zero positions, the calibration of the sensor zero positions of a planar 2 dof parallel manipulator is studied. Two algorithms for the self-calibration of the joint angle offsets are proposed by (Yiu *et al.*, 2003). The calibration is done by utilizing the

redundancy sensor information, sampling over the workspace, and optimizing a cost function.

Ecorchard and Maurine (2005) proposed a geometrical self-calibration method for the Delta robot with compensation of the non-geometrical gravity effects, by using redundant sensors on its kinematic structure. For the HEXA parallel robot, Last *et al.*, 2005b reported a technique to calibrate the structure by means of redundant angular sensors added to its passive joints. An important difference to previous work is the fact, that only angular measurements are available from both the actuator encoders as well as passive joints sensors. In order to consider the effect of measurement inaccuracies, they took the noise into account. The disadvantages of this approach are that sensors need high precision; it is not possible to place these sensors on all the passive joints and some kinematic parameters are dependent on the model error. Therefore, the tool position on the platform cannot be calibrated, (Zhuang and Liu, 1996). In addition, it is difficult to add extra sensors on the already existing mechanisms and sometimes almost impossible when ball joints exist

This approach offers an online calibration, which collects, evaluate data and return corrected parameters automatically to the control stage. In addition, the redundant sensors can be used to get an analytic and time-efficient solution of the direct kinematic problem. Moreover, the additional sensors are integrated to manipulator as durably parts, yet for commercial manipulators they increase the cost.

Singularity based calibration

In (Last *et al.*, 2007) the singularity based calibration is presented and validated within simulated calibration studies. This technique allows parameter estimation without using any calibration equipment, the basic idea is to obtain redundant information from particular characteristics in singular configurations. It has been successfully adopted to a family of 3 dof planar parallel robots. Nevertheless, a parallel mechanism can be calibrated only if it permits singularities of second type in different places of the workspace.

Calibration with external devices

The self-calibration methods with external measuring systems can be divided in four categories: (1) calibration with vision as measurement device, (2) the approach of mobility restriction, (3) the approach of redundant leg, and (4) the approach with adapted device of measurement.

Calibration with vision as measurement device

Vision constitutes a suitable sensor, thus within these methods of calibration, the use of an external camera to obtain measurement of position or orientation can be considered. In (Renaud *et al.*, 2002a) for a PKM, the calibration system by using IKM is formed by a simple camera and a calibration board generated on a LCD monitor. Precisions in the order of 1 micrometer for two translations and 0.001° for each of the three rotations are considered for a displacement of 400 mm. In (Renaud *et al.*, 2002b) a criterion of pose selection for the kinematic calibration of an orthogonal mechanism is used, which necessarily implies to consider the measurement of the error amplification. In (Shaoping and Ming, 2002) a calibration method based on tool transformations is developed by virtue of optical position sensors. The pose measurement using a commercial 3D measurement system is also described.

For the kinematic calibration of parallel mechanisms with linear actuators in the base, in (Renaud *et al.*, 2005) a camera is used without modifying the mechanism. With this system, the calibration can be done on line; the method is developed theoretically and experimentally applied to an I4 mechanism. Renaud *et al.*, (2006a) sets out a device of measurement based on vision for a H4 parallel robot, introduces a monocular measurement device of high precision. The precision of the measurement device is evaluated on the order of 10 micrometers in position and 0.0005° in orientation. For the same robot, in (Daney *et al.*, 2004) the calibration according to the method of the IKM is utilized too. Renaud *et al.* (2006b) provided a method for the complete identification of the physical model of a H4 robot. The researchers identify the parameters of the robot, describing the geometric parameters and the dynamic ones, with which they explained the effects of the masses, inertias and friction that act on the physical behavior. They used two algorithms of calibration based on vision, and two models, namely, the implicit model and the IKM.

Using a motion capture system in (Van Driel and Carretero, 2005), a kinematic calibration method for the 3-PRS parallel manipulator is presented. For medical application, Deblaise and Maurine, (2005) presented an effective and simple calibration method based on 1D and 3D measurements of a low cost artifact and validated on the Surgiscope, which is a structure based on a Delta robot used in neurosurgery. In addition, Ait-Aider *et al.* (2006) sets out a method to be applied in the dynamic identification. A camera is used to simultaneously

measure the pose of the end-effector of the visual pattern calibrated and its Cartesian speed by using a single view. Chao *et al.*, (2006) presents a calibration strategy according to the IKM method for a 3 dof flexure-based parallel manipulator by means of a camera. The algorithm does not identify directly the errors of geometry parameters, but finds the most appropriate control model taking all the errors into account.

For a Gough-Stewart platform, a technique of indirect calibration by using an omni-directional camera is considered in (Dallej *et al.*, 2006). The tie points of the legs of the robot are considered on the base, which are the kinematic parameters that the control needs. Another form to compensate the low accuracy of the parallel manipulators is the use of a control law that is robust to calibration errors. The former approach is displayed in (Andreff and Martinet, 2006), the kinematic modeling based on vision and projected geometry is made through observation of the legs of a Gough-Stewart platform and is extended to Orthoglide and I4L families. This way of modeling unifies and simplifies the stages of identification and control. The main advantage of this calibration method is the high precision that can be obtained. However, vision-based pose measuring can be considered as highly expensive and some particular knowledge should be taken into account.

Approach of mobility restriction

The second category of calibration with external measuring systems is the approach of mobility restriction. Usually, the number of sensors in a manipulator is equal to the dof. Fixing one or more passive joints, or by partially restricting the dof of the manipulator, the mobility of the resulting system will be under the number of sensors. Consequently, the algorithm of calibration can be made (Khalil and Besnard, 1999). In the previous work the variables of the prismatic joints are used, and only correspond to the configurations where each universal joint or ball joint is fixed by a mechanical key, which fixes the corresponding leg with the fixed base or the moving platform. The simulations show that this calibration method can identify major errors in the kinematic parameters (almost 10% of error on the nominal values).

In (Sung *et al.*, 2006) a method of global and completely observable calibration using a planar table and digital indicators is developed. The planar table is used as a mechanical installation to restrict the movement of the moving platform. The digital indicators are used as a sensor device, detecting if the restricted motion is

satisfied. Consequently, the displacements of the active joints are acquired and applied to the kinematic model to calculate the theoretical motions. A calibration of a 6 dof fully parallel manipulators is presented in (Ryu and Rauf, 2001), the method uses a link of fixed length, having spherical joints at both of their ends, to restrain the motion of the end-effector over spherical surface with arbitrary orientations. With the same method, in (Rauf and Ryu, 2001) the kinematic calibration of parallel Hexa Slide manipulator is presented. Lee *et al.* (2003) developed a calibration algorithm implemented on a parallel manipulator constructed for a machining center tool. A single constraint plane is employed as a mechanical fixture to constrain the motion, and three digital indicators are used as the sensing devices to determine whether the constrained motion is satisfied.

Rauf *et al.* (2004) proposes a device to identify all kinematic parameters of a Hexa Slide manipulator. The device consists of a link with U joints on both sides and is equipped with a rotary sensor and a biaxial inclinometer. Numerical analyses of the Jacobian identification reveal that all parameters are identifiable.

However, intrinsic inaccuracies of the device can significantly deteriorate the calibration results. Consequently, a measurement procedure is proposed and cost functions are discussed to prevent propagation of the inaccuracies to the calibration results. Dayong and Junwei (2005) proposed an algorithm as part of a project aimed at developing a calibration method for a spacecraft docking simulator. To implement this algorithm, a calibration equation is built by generating the constraint conditions of the end-effector motion in the workspace using a three dimensional coordinate measuring machine.

The greater benefit of the mobility restriction approach is that neither require of additional sensors nor of metrology equipment; nevertheless, it is difficult to be implemented since it requires a mechanism to restrict the motions of the system.

This approach also undergoes the limitation of the pose. Thus, the machine tool platform cannot be calibrated, just as in the redundant sensor approach. In addition, some errors of parameters related to the immobilized joints can get to be non-observable to the algorithm of calibration due to the mobility restriction (Rauf *et al.*, 2006). Moreover, such methods reduce the workspace and the efficiency of the identification (Besnard and Khalil, 2001). In order to apply this method, two conditions must be fulfilled: that passive joints are used and the possibility of putting a mechanical key on the robot.

Approach of redundant leg

This approach utilizes a redundant leg as the measurement device, it is a passive and unloaded strut separated from the driving mechanisms. In (Hsu and Chen 2004), the error analysis and calibration methodologies for a PKM called a Cartesian guided tripod (CGT) are proposed. The CGT has two kinds of functionally independent legs, the driving functional leg and the integrated Cartesian guiding/metrology functional leg, linked in-parallel to the platform. The platform displacements are guided and measured directly in a Cartesian coordinate system. Additionally, a calibration method that uses a redundant leg with a displacement sensor is presented in (Chiu and Perng, 2004), an end of the leg is joined to the base of the platform through a ball joint, while the other end is a precision adapter that can be joined to the axis or the clamp of the end-effector.

In summary, the implemented additional mechanical devices for calibration have the disadvantage of being expensive, presenting space of limited work, taking a considerable effort to place the end-effector on the additional installation. Besides, it requires different types of facilities for different types of manipulators; but mainly, it is difficult to collect precise measurement data. Nevertheless, this method gives better accuracy than the redundant sensor methods; little load and heat deformations are present on the passive redundant leg. Another merit is that, by putting the redundant leg on the platform centre, the metrology loop is much closer to the cutting tool position for a PKM.

Approach with adapted devices for measurement

Some adapted devices for measurement have been proposed, for example location systems by laser, (Koseki *et al.*, 1998). In (Wei *et al.*, 2001) during simulation of kinematic calibration of 6-PSS parallel manipulator, indirect method by photoelectric length gauge with a ball is used for pose measuring. Chai *et al.* (2002) proposed using an external laser measuring device to determine the actual accuracy of a Gough-Stewart platform. Daney (2003) presents the modeling and a unified scheme to identify the kinematic parameters of the last platform. The interest of this formulation is that it may be applied whatever information is available on the state of the robot (measurement or constraints) without using the kinematics to obtain the basic system of constraint equations. They experimented and compared three

methods of calibration, using either (or both) external measurement and internal redundant sensors. Additionally, Jeong *et al.* (2002) present simulation and experimental results for kinematic calibration algorithms using a planar seven-bar 2 dof redundantly actuated parallel mechanism. Tool plate information is acquired using a laser ball bar and the parameters are identified using an optimization algorithm. For the constant joint offsets case introduced by internal forces the accuracy of the tool plate after calibration improved by 25%.

Ota *et al.* (2002) described a FKM based calibration method for a parallel-mechanism-based milling machine named HexaM that identifies the kinematic parameters using the positioning data measured by a Double Ball Bar (DBB) system. This work also describes a gravity compensation method, in which the parameters are updated gradually according to the travelling plate position. This provides real-time motion control with compensation. Oiwa and Kataoka, (2003) described a method using a DBB system with fixed ball distance for a coordinate measuring machine (CMM) based on a three dof parallel mechanism. The CMM with a touch trigger probe measures the moving ball of the DBB, and calculates position errors of the ball using kinematic parameters. Others CMM were studied in (Junhong *et al.*, 2007) and (Yu *et al.*, 2006), in last the plane equation was measured to gain the position of a 6 dof parallel robot and its error equations were established. Error parameters for the three planes method were obtained in order to implement error measurement and error compensation.

Takeda *et al.* (2004) proposed the use of a low order Fourier series obtained by transforming the data for circular measurement paths by using a 6 dof in-parallel actuated worktable. The errors of the realized paths were measured using a DBB system. An algorithm for determining adequate measurement paths and an optimal set of a specified number of paths using these indices was also proposed. With the same system, Huang *et al.* (2005) deal with the kinematic calibration of a 3 dof parallel mechanism. It forms the main body of a 5 dof reconfigurable hybrid robot named TriVariant that is a modified version of the Tricept, achieved by integrating one of its three active limbs into the passive one. The first order error mapping function is formulated to link the measured data and the geometric source errors affecting the compensatable pose accuracy.

In (Kim, 2005), a moving platform is connected to a fixed frame by three PRRR limbs to form the called Cartesian Parallel Manipulator which may be suitable for applications requiring high speed and accuracy. A

simple FKM is derived and based on the error model, two calibration methods using full position and length measurements are developed by using a ball-bar. In (Liang Zhi *et al.*, 2005) the calibration of a hybrid 5 dof manipulator based on a 3RPS in-actuated parallel manipulator is studied. A 2 dof serial working table is placed over the moving platform; the proposed method takes this device as a ruler and keeps the remaining end of the static end-effector with respect to the working table at different configurations. Nakagawa *et al.* (2001) described a method to obtain the kinematic parameters for a hexapod machine tool by using a telescope ball bar device. This method deals with length error of struts, position errors of base and platform joints as kinematic parameters.

For a Gantry hybrid machine tool, based on a 3 dof parallel mechanism and a long motion of the working table, the kinematic calibration methods based on estimation error and local measurement information is presented in (Tang *et al.*, 2005). The first type of calibration method can easily improve the PKM accuracy quickly by estimating the errors trends. The second method includes the position errors and does not include the pose errors of the PKM. A micrometer, a leveling bar, and an optical grating ruler were used to measure the real machine tool errors in the Y and Z directions. Rauf *et al.* (2005) discussed the automation of calibration experiments for a parallel manipulator using a partial pose measurement device. A significant time saving was observed with the proposed automation. Furthermore, for Hexa Slide manipulator, the calibration with partial pose measurements, using a device that measures a rotation of the end-effector along with its position is done by Rauf *et al.* (2006). The device contains a Linear Variable Differential Transformer (LVDT), a biaxial inclinometer, and a rotary sensor.

The position of the Tool Center Point (TCP) of a PKM is traditionally being measured indirectly by means of the position measurement of the drives. Cutting- and acceleration forces cause displacements of the TCP, which cannot be detected from the position measurement of the drives. To improve the position accuracy of the TCP a force free add-on position measurement device is suggested in (Verl *et al.*, 2006). Whereas, the interrelationship between optimal tolerance, model, and pose selection for calibration of the parallel manipulators is discussed by Boye *et al.*, (2006).

The kinematics calibration of a planar parallel manipulator of 5-links, whose potential applications include micro-electromechanical systems (MEMS) assembling or bonding is developed in (Ji *et al.*, 2006). A

laser interferometer, whose resolution is about 10 nanometers, is adopted for measuring the kinematics model. In (Yu *et al.*, 2007) a method was presented to calibrate a 2 dof parallel mechanism. Instead of measuring all or partial pose of the end-effector, the kinematic parameters of the mechanism were calibrated by measuring a serial of displacements of its end-effector. The universal tool microscope rather than extra sensors measured those displacements. The optimal kinematic parameters were obtained by minimizing the measurements error of the end-effector. This was done by solving an optimization model via nonlinear programming, using Matlab optimization toolbox.

The option of cable-based measuring systems can be considered as a feasible and cheap alternative for the identification of kinematic parameters on parallel structures. They present a good tradeoff between expected accuracy and low cost. At LARM Laboratory of Robotics and Mechatronics in Cassino, Catrasys has been used for the determination of workspace of robotic systems (Ottaviano *et al.*, 2002). Another cable-based measuring system, called Milli-CaTraSys, has been used for pose measuring of a parallel manipulator (Conghui *et al.*, 2009).

Numerical approaches

In (Hollerbach and Nahvi, 1995) the method of least squares is used to obtain a calibration approach. This method can be applied to handle the input and output noise in the calibration procedure. These methodologies are included into the so-called methods of implicit loop by Wampler *et al.* (1995). Based on the 6-TPS type PKM, a kinematic calibration method was studied by Zhong *et al.* (2005). Each kinematic structure parameter unit error of PKM was assumed, and then the influence coefficient matrix was constructed between the PKM terminal pose errors and structure errors by numerical methods using the measured data by the FKM.

A work to redefine the mathematical tools that helps calibration was developed in (Daney *et al.*, 2004), demonstrating that the methods based on analysis of intervals can be used for the numerical certification of the calibration of parallel mechanisms.

The method gives an approach certified in the stage sensor for a set of measurements given with related uncertainties, providing a list of intervals for the kinematic parameters. Hence, any solution corresponding to an instance of the configuration satisfies the measurement that belongs to those intervals. In (Daney, 2004) methods of algebraic elimination for a general

calibration of Gough-Stewart platform are implemented, emphasizing two approaches: algebraic elimination of variables and monomial linearization, which are compared to the classic technique of numerical optimization. The first one concludes that elimination methods are an important alternative to the established methods, and these methods do not require initial estimation, neither hypothesis on distribution of the noise. Numerical calibration methods are characterized by extremely high instrumentation expenditure and possess only local validity.

Conclusions

Some parallel structured machine tools are known as a new generation of multi-axis machining centre for the 21st Century manufacturing. They are mainly composed by parallel mechanisms. These kinematic structures are often claimed to be highly accurate, rigid machines, due to their closed loop structure and no error accumulation characteristics. Unfortunately, these generic thoughts have been challenged in the past few years, due to the growing need of high accuracy. In addition, because of the complex mechanisms their performance development is limited by the existing mathematical algorithms, measurement technique and calibration methods. For this reason, this paper was focused on the errors' source and calibration methodologies for PKMs. Different reported methods for calibration of parallel manipulators were presented. Moreover, this paper classifies the different robot calibration approaches and compares them to existing strategies. In general, the calibration methods showed the use of measurement devices, which require highly skills operators, are time consuming and expensive by adding redundant sensors, measurement devices or legs. Thus, it is apparent that inexpensive calibration methods are needed for successful applications of parallel mechanisms. Singularity based calibration and cable-based measuring systems promise good beginnings in this direction, taking into count their specific problematic.

Acknowledgements

The work reported was financially supported by CONACyT through a scholarship granted to the first author and the grant No. 51410Y.

References

- Ait-Aider O., Andreff N., Martinet P. and Lavest J. Simultaneous Pose and Velocity Measurement by Vision for High-speed Robots. Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation. Orlando Florida, 2006, pp. 3742- 3747.
- Andreff N., Martinet P. Vision-based Kinematic Modeling of Some Parallel Manipulators for Control Purposes. Proceedings of EuCoMeS, the First European Conference on Mechanism Science. Obergurgl, Austria, 2006.
- Besnard S., Khalil W. Identifiable Parameters for Parallel Robots Kinematic Calibration. International Conference on Robotics and Automation. Seoul, Korea, 2001, pp. 2859-2866.
- Boye T., Verl A., Pott A. Optimal Tolerance, Model and Pose Selection for Calibration of Parallel Manipulators. *VDI Berichte*, 1956:267. 2006.
- Brogardh T. Device for Relative Movement of Two Elements. United States Patent 6425303, July 30. 2002.
- Chai K.S., Young K., Tuerley I. A Practical Calibration Process using Partial Information for a Commercial Stewart Platform. *Robotica*. 20(3):315-322. 2002.
- Chao D., Zong G., Liu R., Yu J. A Novel Kinematic Calibration Method for a 3-dof Flexure-based Parallel Mechanism. IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems. Beijing, 2006, pp. 4660-4665.
- Chiu Y., Perng M. Self-calibration of a General Hexapod Manipulator with Enhanced Precision in 5 dof Motions. *Mechanism and Machine Theory*, 39:1-23. 2004.
- Cui H., Zhu Z., Gan Z., Brogardh T. Kinematics Analysis and Error Modeling of TAU Parallel Robot. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 21:497-505. 2005.
- Conghui L., Hernandez-Martinez E., Carbone G., Ceccarelli M. A Comparison of Simulations and Experimental Tests on Operation Performance of CaPaMan2 bis. IEEE International Conference of Mechatronics and Automation. Changchun, 2009, pp. 430-436.
- Dallej T., Hadj-Abdelkader H., Andreff N., Martinet P. Kinematic Calibration of a Gough-Stewart Platform using an Omnidirectional Camera. Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Beijing China, 2006, pp. 4666-4671.
- Daney D. Self Calibration of Gough Platform Using Leg Mobility Constrains. World Congress on Theory of Machine and Mechanism. Oulu, Finland, 1999, pp. 104-109.
- Daney D. Kinematic Calibration of the Gough Platform. *Robotica*, 21(6):677-690. 2003.
- Daney D. Algebraic Elimination for Parallel Robot Calibration. Proceedings of the 11 World Congress in Mechanism and Machine Science, Tianjin China, 2004.
- Daney D., Papegay Y., Neumaier A. Interval Methods for Certification of the Kinematic Calibration of Parallel Robots. Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation. New Orleans, LA., 2004. Vol. 2, pp. 1913- 1918.
- Daney D., Papegay Y., Madeline B. Choosing Measurement Poses for Robot Calibration with the Local Convergence Method and Tabu Search. *International Journal of Robotics Research*, 24(6):501-518. 2005.
- Daney D., Emiris I.Z., Papegay Y., Tsigaridas E., Merlet J.P. Calibration of Parallel Robots: on the Elimination of Pose-Dependent Parameters. Proceedings of EuCoMeS. The First European Conference on Mechanism Science, Austria, 2006.
- Dayong Y., Junwei H. Kinematic Calibration of Parallel Robots. IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Ontario, 2005. Vol. 1, pp. 521-525.
- Deblaise D., Baradat C., Maurine P., Arekelian V. Improvement of Positioning of Delta Parallel Robot. XXI International Congress of Theoretical and Applied Mechanics, Warsaw, Poland, 2004.
- Deblaise D., Maurine P. Effective Geometrical Calibration of Delta Parallel Robot used in Neurosurgery. Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Edmonton, 2005, pp. 1313-1318.
- Ecorchard G., Maurine P. Self-calibration of Delta Parallel Robots with Elastic Deformation Compensation. Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Edmonton, 2005, pp. 1283-1288.
- Hesselbach J, Bier C., Pietsch I., Plitea N., Buttgenbach S., Wogersien A., Guttler J. Passive joint-Sensors for Parallel Robots. *Mechatronics*, 15:43-65. 2005.
- Hollerbach J.M., Nahvi A., Hayward V. Calibration of a Parallel Robot Using Multiple Kinematics Closed Loops. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. San Diego, CA, 1994, pp. 407-413.
- Hollerbach J., Nahvi A. Total Least Squares in Robot Calibration. Experimental Robotics IV. The Fourth International Symposium. O. Khatib y J. K. Salisbury, eds., Springer, London, 1995, pp. 274-282, Palo Alto, CA.
- Hsu W., Chen J. Error Analysis and Auto-Calibration for a Cartesian-Guided Tripod Machine Tool. *Int. J. Adv. Manufacturing Technology*, 24:899-909. 2004.
- Huang T., Chetwynd D.G., Whitehouse D.J., Wang J. A General and Novel Approach for Parameter Identification of 6 dof Parallel Kinematic Machines. *Mechanism and Machine Theory*, 40(2):219-239. 2005.
- Huang T., Hong Z.Y., Mei J.P., Chetwynd D.G. Kinematic Calibration of the 3 dof Module of a 5 dof Reconfigurable Hybrid Robot using a Double-Ball-Bar System. IEEE/RSJ

- International Conference on Intelligent Robots and Systems, Beijing, 2006, pp. 508 – 512.
- Jeong J., Kang D., Iurascu C.C., Kim J. Kinematic Calibration for Redundantly Actuated Parallel Mechanisms. Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference, 2002, pp. 1211-1217.
- Ji J., Zhu Y., Sun L. The Kinematics Calibration of a Planar Parallel Manipulator. *VDI Berichte*, 1956:295. 2006.
- Junhong J., Lining S., Lingtao Y. A New Pose Measuring and Kinematics Calibrating Method for Manipulators. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Roma, 2007, pp. 4925-4930.
- Khalil W., Besnard S. Self-calibration of Stewart–Gough Parallel Robots Without Extra Sensors. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 15(6):1116–1121. 1999.
- Kim H. S. Kinematic Calibration of a Cartesian Parallel Manipulator. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 3(3):453-460. 2005.
- Koseki Y., Arai T., Sugimoto K., Takatuji T., Goto M. Design and Accuracy Evaluation of high-Speed and High Precision Parallel Mechanism. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Leuven, 1998. Vol. 3, pp. 1340-1345.
- Last P., Hesselbach J., Plitea N. An Extended Inverse Kinematic Model of the HEXA-parallel-Robot for Calibration Purposes. IEEE International Conference Mechatronics and Automation. Ontario, 2005a. Vol. 3, pp. 1294-1299.
- Last P., Budde C., Hesselbach J. Self- Calibration of the HEXA-Parallel-Structure. Proceedings of the IEEE Conference on Automation Science and Engineering, IEEE-CASE. Article number 1506801, 2005b, pp. 393-398.
- Last P., Schutz D., Raatz A., Hesselbach J. Singularity Based Calibration of 3 dof Fully Parallel Planar Manipulators. 12th IFToMM World Congress, Besacon, 2007.
- Lee M.K., Kim T.S., Park K.W., Kwon S.H. Constraint Operator for the Kinematic Calibration of a Parallel Mechanism. *KSME International Journal*, 17(1):23-31. 2003.
- LiangZhi F., Elatta A.Y., Xiaoping L. Kinematic Calibration for a Hybrid 5-D Manipulator Based on 3RPS In-actuated Parallel Manipulator. *Int. J. Adv. Manufacturing Technology*, 25:730-734. 2005.
- Marquardt D. An Algorithm for Least-squares Estimation of Nonlinear Parameters. *SIAM J. Appl. Math.*, 11:431-441. 1963.
- Merlet J.P. *Les Robots Paralleles*. Hermes. Paris. 1997.
- Merlet J.P. Parallel Robots: Open Problems. ASME Conference DECT. Montreal, 2002.
- Nakagawa M., Matsushita T., Nashiki M., Kakino Y., Ihara Y. A Study on the Improvement of Motion Accuracy of Hexapod type Parallel Mechanism Machine tool the Method of Kinematic Calibration without Gravitational Deformation. *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, 67(8):1333-1337. 2001.
- Oiwa T., Tamaki M. Study on Abbe's Principle in Parallel Kinematics. Proceedings of the 2nd Chemnitz Parallel Kinematics Seminar. Chemnitz, Germany, April 2000, pp. 354-352.
- Oiwa T., Kataoka Y. A Calibration Method for Coordinate Measuring Machine using Parallel Mechanism. *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, 69(2):222-226. 2003.
- Oiwa T. Error Compensation System for Joints, Links and Machine Frame of Parallel Kinematics Machines. *The International Journal of Robotics Research*, 24(12):1087-1102. 2005.
- Ota H., Shibukawa T., Tooyama T., Uchiyama M. Forward Kinematic Calibration and Gravity Compensation for Parallel-mechanism-based Machine Tools. *IMechE Journal of Multi-body Dynamics* 216(1):39-49. 2002.
- Ottaviano E., Ceccarelli M., Toti M., Avila-Carrasco C. Catrasys a Wire System for Experimental Evaluation of Workspace. *Journal of Robotics and Mechatronics* 14(1): 78-87. 2002.
- Parenti-Castelli V., Di Gregorio R., Lenarcic J. Sensitivity to Geometric Parameter Variation of a 3 dof Fully-Parallel Manipulator. Proceedings of 3rd International Conference on Advanced Mechatronics (JSME). Okayama, Japan, 1998, pp.364-369.
- Rauf A. and Ryu J. (2001). Fully Autonomous Calibration of Parallel Manipulators by Imposing Position Constraint. IEEE International conference on robotics and automation. Seoul, Vol. 3, pp. 2389-2394.
- Rauf A., Kim S.G., Ryu J. Complete Parameter Identification of Parallel Manipulators with Partial Pose Information using a New Measurement Device. *Robotica*, 22(6):689-695. 2004.
- Rauf A., Pervez A., Kim J.P., Ryu J. Automation of Calibration Experiments for Parallel Manipulators Using a Partial Pose Measurement Device. Proceedings of the SICE Annual Conference. 2005, pp. 3558-3563.
- Rauf A., Pervez A., Ryu J. Experimental Results for Kinematic Calibration of Parallel Manipulators Using a Partial Pose Measurements Device. *IEEE Transactions on Robotics*, 22(2). April 2006.
- Renaud P., Andreff N., Dhome M., Martinet P. Experimental Evaluation of a Vision-Based Measuring Device for Parallel Machine Tool Calibration. Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Lausanne, Switzerland, 2002a. Vol. 2, pp 1868-1873.
- Renaud P., Andreff N., Dhome M., Gogu G. Optimal Pose Selection for Vision-based Kinematic Calibration of

- Parallel Mechanisms. Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Las Vegas Nevada, 2002b. Vol.3, pp. 2223- 2228.
- Renaud P., Andreff N., Martinet P., Gogu G. Kinematic Calibration of Parallel Mechanism: A Novel Approach Using Legs Observation. *IEEE Transactions on Robotics*, 21(4):529-538. 2005.
- Renaud P., Andreff N., Lavest J.M., Dhome M. Simplifying the Kinematic Calibration of Parallel Mechanisms Using Vision-based Metrology. *IEEE Transactions on Robotics*, 22(1):12-22. 2006a.
- Renaud P., Vivas A., Andreff N., Poignet P., Martinet P., Pierrot F., Company O. Kinematic and Dynamic Identification of Parallel Mechanisms. *Control Engineering Practice*, 14:1099-1109. 2006b.
- Rudder F.F. Thermal Expansion of Long Slender Rods with Forced Convection Cooling Along the Rod Length, Report NISTIR 5975, 1997, pp. 46.
- Ryu J., Rauf A. A New Method for Fully Autonomous Calibration of Parallel Manipulators using a Constraint Link. IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 2001. Vol. 1, pp. 141-146.
- Sato O., Shimojima K., Furutani R., Takamasu K. Artefact Calibration of Parallel Mechanism, Kinematic Calibration with Apriori Knowledge. *Measurement Science and Technology*, 15(6):1158-1165. 2004.
- Shaoping B., Ming Y. Kinematic Calibration and Pose Measurement of a Medical Parallel Manipulator by Optical Position Sensors. 7th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, 2002. Vol. 1, pp. 419-424.
- Soons J.A. Error Analysis of a Hexapod Machine Tool. International Conference and Exhibition on Laser Metrology and Machine Performance. Huddersfield. 1997. W. Yorkshire, UK. Pp.12.
- Sung K.T., Park W., Lee K. Study on Observability of Parallel-typed Machining Center Using a Single Planar Table and Digital Indicators. *Mechanism and Machine Theory*, 41:1147-1156. 2006.
- Takeda Y., Shen G., Funabashi H. A DBB-based Kinematic Calibration Method for In-parallel Actuated Mechanisms using a Fourier Series. *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*, 126(5):856-865. 2004.
- Tang X., Wang J., Gao M. Kinematic Calibration of a Gantry Hybrid Machine Tool based on Estimation Error and Local Measurement Information. *Int. J. Adv. Manufacturing Technology*, 26:382-390. 2005.
- Van Driel C.G., Carretero J.A. Calibration of the 3-PRS Parallel Manipulator using a Motion Capture System. *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, 29(4):645-654. 2005.
- Verl A., Croon N., Kramer C., Garber T. Force Free add-on Position Measurement Device for the TCP of Parallel Kinematic Manipulators. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 55(1):407-410. 2006.
- Wang J., Masory O. On the Accuracy of a Stewart Platform-Part I: The Effect of Manufacturing Tolerances. Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation. Atlanta, 1993, pp. 725-731.
- Wampler C.W., Hollerbach J., Arai T. An Implicit Loop Method for Kinematic Calibration and its Application to Closed-Chain Mechanism. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 11:710-724. 1995.
- Wei S., Liao Q., Huang J. Simulation on the Kinematic Calibration of 6-pss form Parallel Manipulator. *Machine Design and Research*, 17(4):51-53. 2001.
- Yang G., Chen I.M., Lim K., Huat-Yeo S. Simultaneous Base and Tool Calibration of a Self-calibrated Modular Parallel Robot. *Robotica*, 20(4):367-374. 2002.
- Yiu Y., Meng J., Li Z. Auto-calibration for a Parallel Manipulator with Sensor Redundancy. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Taipei, 2003. Vol. 3, pp. 3660-3665.
- Yu L.T., Sun L.N., Du Z.J., Cai H.G. Three Planes Method on Measuring and Compensation of Parallel Robot. *Journal of Harbin Engineering University*, 27(5):671-675. 2006.
- Yu X., Chu L., Cen Y. Kinematics Calibration of a 2 dof Parallel Planar Mechanism. *China Mechanical Engineering*, 18(6):634-638. 2007.
- Zhang Y., Cong S., Li Z., Jiang S. Auto-Calibration of a Redundant Parallel Manipulator Based on the Projected Tracking Error. 12th IFToMM World Congress, Besacon, 2007.
- Zhong S.S., Yang X.J., Wang Z.X. Research on Calibration Method based on 6-TPS type Parallel Machine Tool. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 10:1469-1474. 2005.
- Zhuang H., Roth Z. Method for Kinematic Calibration of Stewart Platforms. *Journal of Robotic Systems*, 10(3):391-405. 1993.
- Zhuang H., Liu L. Self-calibration of a Class of Parallel Manipulators. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Minneapolis, 1996, pp. 994-999.
- Ziegert J.C. Volumetric Performance of Hexapod Machine Tools. Hexapod Machine Tool Users Group Report, 1996, pp.13.

About the authors

Eusebio E. Hernández-Martínez. Was born in Querétaro in 1978. He received his bachelor degree in electronic engineering from Instituto Tecnológico de Celaya in 2002. In 2004, he received his master degree in instrumentation and automatic control at Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ). Currently he is a PhD candidate in the same university. He was a visiting PhD student at University of Cassino, Italy in the years 2008 and 2009. His research interests include kinematics, calibration and error modeling of parallel robots. He is author of 7 papers that have been published in proceedings of national and international conferences or in international journals. He is a member of SOMIM (Mexican Society of Mechanical Engineering).

Carlos S. López-Cajún. Received his BSME and MSME from Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) in 1969, 1977 and his PhD from Case Western Reserve University in 1982. He was professor at the UNAM, a visiting researcher at McGill University, and researcher at the Mexican Transportation Research Institute. Currently he is professor at UAQ. His research focuses on simulation, robotics, and mechanisms. He has published 20 journal papers, 30 conference extended publications, and 2 textbooks on kinematics. He is a Member of the Mexican Academy of Engineering and Member of the IFToMM Executive Council, and has been elected as secretary general, for the period 2008-2011.

Juan Carlos Jáuregui-Correa. Is director of CIATEQ, a research center in Queretaro. He obtained his bachelor and master's degree in mechanical engineering (ME) from UNAM and his PhD degree in ME from Wisconsin-Milwaukee University, USA, in 1986. He was assistant researcher at the same University and associate professor at the School of Engineering, UNAM. Currently, he is a top level member (III) of the National Researchers System in Mexico. He has been associated member of The American Society of Mechanical Engineers (ASME), Society of Automotive Engineers (SAE) and The Gear Research Institute. In recent years, more than forty papers have been published in scientific journals and/or scientific national and international conferences, and five Mexican patents have been conferred to him. In 1991 he won the Industrial Building award in Queretaro. He was distinguished as Honorary Research Associate, at Leicester University, England. He is currently interested in research topics such as, mechanical vibrations, mechanical design of machinery, parallel manipulators, and their applications.

Diseño teórico y simulación de un relevador de sobrecorriente con capacidades dinámicas de ajuste

Theoretical Design and Simulation of an Overcurrent Relay with Dynamic Setting

Conde-Enriquez A.

*Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Universidad Autónoma de Nuevo León.
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México.
E-mail: con_de@yahoo.com*

Vázquez-Martínez E.

*Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Universidad Autónoma de Nuevo León.
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México.
E-mail: evazquez@gama.fime.uanl.mx*

Cantú-Gutiérrez V.P.

*Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Universidad Autónoma de Nuevo León.
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México.
E-mail: vcantugt@yahoo.com*

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

Resumen

En este artículo recomendamos una nueva lógica funcional para un relevador de sobrecorriente de tiempo inverso. Este relevador tiene mayor sensibilidad y tiempos de operación de respaldo reducidos, comparados con relevadores convencionales; la información requerida por el relevador propuesto es determinada únicamente en la localidad del relevador. Se presenta el diagrama funcional del relevador, describiendo cada uno de sus bloques funcionales. El desempeño del relevador propuesto es comparado con relevadores de sobrecorriente convencionales y relevadores de sobrecorriente de secuencia negativa.

Descriptores: relevador de sobrecorriente, relevador adaptivo, corriente de arranque, sensibilidad, curva de tiempo, coordinación.

Abstract

This paper presents a new logic of operation for time overcurrent relays. With the application of the proposed technique, the sensitivity of time overcurrent relays is increased. We recommend a new coordination system for time overcurrent relays too. The purpose of the coordination process is to find a time element function that allows it to operate using a constant back-up time delay, for any fault current. The results obtained from time overcurrent adaptive relays are collated, and the results from analysis of negative sequence relays and conventional time overcurrent relays are also presented.

Keywords: Overcurrent relay, adaptive relay, pick-up current, sensitivity, time curve, coordination.

Introducción

La aplicación de relevadores de sobrecorriente de tiempo inverso en redes eléctricas presenta serias limitaciones de sensibilidad y tiempos elevados de operación para corrientes mínimas de fallas. El incremento desproporcionado de la densidad de carga y la escasa construcción de líneas de sub-transmisión y distribución, provoca que los sistemas eléctricos sean sometidos a condiciones más severas de carga. El ajuste de un relevador de sobrecorriente es mayormente comprometido, debido a que los valores mínimos de corriente de falla y ajuste del relevador son comparables, dificultando la correcta detección de la falla. Una falla en condiciones de mínima demanda representa una aportación menor de corriente; es precisamente en esta condición cuando se requiere mayor sensibilidad en la protección. Sin embargo, el ajuste de la corriente de arranque del relevador es efectuado usando los valores máximos de corriente de carga (pocos minutos por día) y en las configuraciones críticas de la red en donde el relevador pueda disparar por carga, como en operaciones de transferencia de potencia (esquemas de emergencia). Entonces, el ajuste de la corriente de arranque es establecido durante escenarios poco frecuentes o de corta duración, teniendo como resultado una insensibilización mayor de la protección.

Otra limitación de la protección de sobrecorriente son los elevados tiempos de respaldo para fallas no máximas. El criterio de coordinación se determina para los valores máximos de corriente de falla (3–5% del total de fallas) y durante condiciones máximas de demanda (solo unos cuantos minutos al día), esto debido a la convergencia de las curvas de tiempo para valores mayores de corriente.

Para las fallas restantes, que son las más frecuentes, el tiempo de operación del relevador es mayor. Este comportamiento es propio de los relevadores de sobrecorriente y se ha comprobado que es muy adecuado para la protección de sistemas eléctricos en donde es frecuente y temporal su operación sobre los valores nominales. Esta situación no es tan conveniente cuando se presenta en la protección de respaldo; por la naturaleza misma del relevador de sobrecorriente resultan elevados tiempos de operación, sometiendo al sistema a tolerar corrientes que provocan esfuerzos térmicos y mecánicos que pudieran evitarse. La limitación de tiempo es acentuada cuando el dispositivo primario tiene una curva de tiempo con diferente grado de inversión que la del relevador de respaldo.

En trabajos recientes (Askarian *et al.*, 2003), (Urdaneta *et al.*, 1988) y (Abdelaziz *et al.*, 2002), se proponen

diferentes métodos de coordinación; todos son dependientes de canales de comunicación para actualizar los ajustes, por lo que es necesario considerar los factores económicos involucrados.

En redes aisladas (rurales) o en redes altamente interconectadas en donde no es viable implementar una estrategia mediante canales de comunicación, es posible realizar el ajuste automático del relevador utilizando la corriente local e información fuera de línea del dispositivo de protección primario.

El relevador propuesto no requiere de algún medio físico de comunicación. El proceso de coordinación es automático e independiente de futuros cambios en el sistema (tales como cambios topológicos, de generación y carga).

En este trabajo se propone un relevador adaptivo de sobrecorriente de tiempo inverso. Este criterio de protección de fase puede ser aplicado tanto en sistemas de potencia como en sistemas industriales. Los objetivos principales del relevador adaptivo son: incrementar la sensibilidad del relevador para corrientes mínimas de falla durante condiciones de baja demanda. El segundo es determinar una función de tiempo que asegure la operación de respaldo con un retardo constante de tiempo relativo al dispositivo primario para cualquier valor de corriente de falla.

Los beneficios del relevador propuesto son:

- La corriente de arranque depende de la magnitud de la corriente de carga, resultando en mayor sensibilidad de la protección cuando más lo requiere.
- El tiempo de respaldo es independiente de la magnitud de la corriente de falla, resultando en menor tiempo de respaldo que en relevadores convencionales.

El proceso de diseño de un equipo o sistema digital destinado a operar en tiempo real, consta de dos etapas básicas. La primera incluye la investigación y desarrollo de los algoritmos y su evaluación por simulación digital. La segunda consiste en el desarrollo de un prototipo del equipo o sistema y su prueba en condiciones de laboratorio, posteriormente, en condiciones reales de operación. La única infraestructura requerida para la primera etapa es el equipo de cómputo, dotado del “software” apropiado para la aplicación.

En la segunda etapa se requiere contar con un laboratorio que permita simular físicamente el sistema real al que está destinado el equipo, y tener facilidades para el diseño y construcción del prototipo. El simulador

físico puede ser sustituido o complementado por un simulador digital en algunas aplicaciones, pero la construcción del prototipo es inevitable. Cuando el equipo a diseñar es un relevador digital de protección de sistemas eléctricos de potencia, la construcción del prototipo es una labor muy especializada, que no siempre está al alcance de las instituciones de investigación.

En este trabajo se presenta el desarrollo de un algoritmo de protección que permita mejorar el funcionamiento de un relevador de sobrecorriente realizando modificaciones a nivel de "firmware" del relevador, entonces es asumido que la adecuación del hardware necesario y del conjunto de pruebas es un problema resuelto por los fabricantes de equipo de protección.

Los resultados presentados fueron obtenidos mediante la simulación de los algoritmos de diseño del relevador, programados en paquetes profesionales, sin realizar la construcción de un prototipo físico. Sin embargo, los resultados obtenidos respaldan los fundamentos teóricos planteados y, cumpliéndose las condiciones establecidas, las futuras pruebas en condiciones reales de operación.

Limitaciones del relevador de sobrecorriente

La protección de sobrecorriente usa la corriente como único indicador de la ubicación de la falla. Sin embargo, la corriente de falla depende del voltaje de pre-falla y la impedancia de Thevenin en el punto de falla. Esto provoca que el relevador de sobrecorriente tenga un alcance dinámico, dependiente de la magnitud de la corriente de falla, presentando menor sensibilidad durante mínima demanda y en fallas bifásicas. Por otra parte, la corriente máxima de carga puede ser similar en magnitud a la corriente mínima de falla; esto dificulta la correcta discriminación entre el estado normal de operación y la condición de falla.

Otro problema en la protección de sobrecorriente son los elevados tiempos de respaldo para corrientes mínimas de falla; esta limitación es originada por la corriente de carga (altos valores de arranque) y la divergencia natural de las características de operación de los relevadores. También, cuando las protecciones primaria y de respaldo tienen tipos de curvas diferentes, es difícil conseguir una coordinación adecuada.

Una solución para las limitaciones de relevadores de sobrecorriente es usar criterios adaptivos. En este artículo, se propone una estructura de un relevador adaptivo de sobrecorriente. Este relevador adaptivo es compuesto de dos elementos adaptivos: corriente adaptiva de arranque y tiempo adaptivo de operación.

Corriente adaptiva de arranque

Se propone un ajuste dinámico de la corriente de arranque en función de la demanda de corriente:

$$I_a = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (I_k)_j + \Delta I, \quad (1)$$

donde I_k es la corriente en estado estable del sistema eléctrico, ΔI representa un margen de seguridad con un valor propuesto de 15% del valor máximo de la corriente de carga, y N debe ser seleccionado de tal manera que el intervalo $N \times \Delta t$ (periodo de muestreo) tenga una duración de entre uno y varios minutos, similar a los integradores de demanda usados en medidores eléctricos.

La ecuación (1) asegura que el relevador tenga en todo momento la corriente de arranque mínima necesaria para evitar una operación incorrecta debido al efecto de la carga. Esto provee mayor sensibilidad, porque el valor de I_a es también pequeño durante condiciones mínimas de carga.

La lógica de control de la corriente de arranque tiene la tarea de mantener constante I_a durante una falla. Si la línea es desenergizada, la lógica de control asigna un valor máximo I_a^{\max} , el cual puede ser similar al ajuste de un relevador convencional en la misma ubicación del adaptivo. Durante un intervalo completo de demanda, el valor I_a es dado en el relevador al final del intervalo previo de demanda. La acción de filtrado pasa-bajos inherente en el concepto de demanda simplifica la lógica del relevador adaptivo.

Durante incrementos súbitos de la corriente de carga (transferencia de potencia o conexión de carga), el relevador tiene una lógica de detección de falla en orden de supervisar I_a . Esta lógica incluye una verificación de la corriente de secuencia negativa y secuencia positiva, ambos combinados en una lógica OR. El detector de secuencia negativa es propuesto para detectar fallas bifásicas (Elneweishi *et al.*, 1992). En redes de bajo voltaje, la corriente de secuencia negativa originada por fallas bifásicas es mayor que la corriente de secuencia negativa originada por desbalances, permitiendo un buen ajuste. El detector de secuencia positiva es propuesto para detectar fallas trifásicas, este tiene el mismo ajuste que un relevador convencional de fase. Por tanto, esta lógica discrimina entre incrementos súbitos de carga y fallas (simétricas o asimétricas).

El desempeño de la lógica de detección de falla es analizada en la red eléctrica de la figura 1a. La secuencia de operación simulada consiste en tres escenarios: desbalance en estado estable, cortocircuito bifásico en la

línea adyacente al *Rele A* y disparo de la línea fallada (transferencia de potencia). Se analiza el desempeño del *Rele A*; este relevador debe tolerar la condición de desbalance, respaldar la falla en la línea adyacente, y no disparar para transferencia de potencia. Durante el desbalance severo en estado estable (25% según ANSI/IEEE Std 141-1986, 1986) el algoritmo no emite salida, tolerando esta condición; para esta simulación se ajustó el detector a 80 A (Elnewehi *et al.*, 1992). Durante la falla, se tiene un valor apreciable de corriente de secuencia negativa I_2 vista por el *Rele A*, permitiendo una detección y respaldo efectivo. En la última secuencia, el disparo de la línea 1 provocará una transferencia de potencia I_1 en el *Rele A*. Esta condición debe ser tolerada por el

relevador, permitiendo la alimentación a la carga. El ajuste del detector de fallas simétricas fue similar al de un relevador de sobrecorriente convencional (ANSI/IEEE Std 141-1986, 1986). Durante esta condición, la salida del detector de falla propuesto no está presente, tendiendo un desempeño satisfactorio.

Con el incremento de sensibilidad (reducción de la corriente de arranque), el tiempo de operación del relevador de sobrecorriente se reduce. El efecto se ilustra en la figura 2.

Este comportamiento es benéfico especialmente en el tiempo de operación de la protección de respaldo, pero existe un riesgo de pérdida de coordinación. Una solución es la adaptación del tiempo de operación.

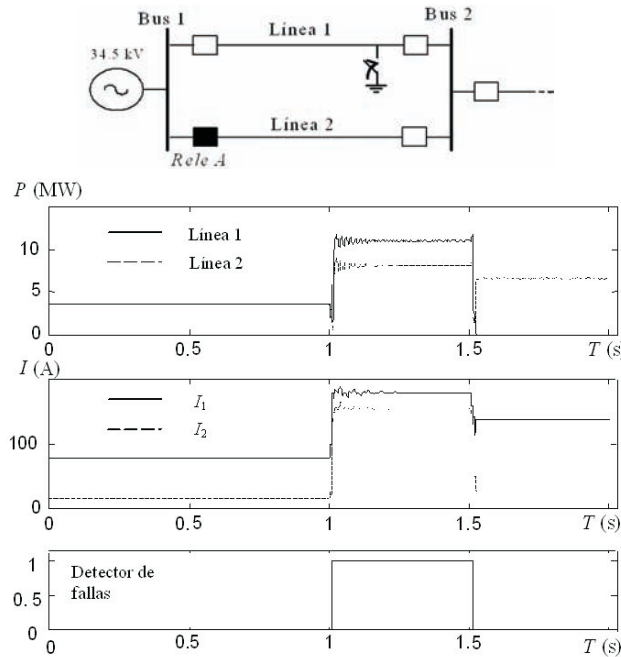


Figura 1. Evaluación de la lógica de detección de falla propuesta

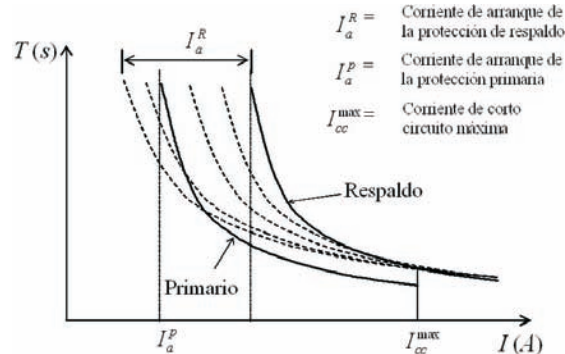


Figura 2. Efecto de la corriente adaptiva de arranque en el tiempo de operación

Tiempo adaptivo de operación

El criterio de coordinación para relevadores de sobrecorriente es establecer una secuencia de operación, de tal forma que el tiempo de operación del relevador de respaldo T_R sea mayor por un tiempo predefinido, que el tiempo de operación del relevador primario T_P ; este intervalo de tiempo de coordinación (CTI) tiene un valor entre 0.2 a 0.4s.

$$T_R = T_P + CTI. \quad (2)$$

El propósito del proceso de adaptación es determinar una función de tiempo adaptiva, la cual defina el tiempo de operación del relevador de respaldo con un retardo de tiempo constante, relativo a la protección primaria para cualquier valor de corriente de falla.

Debido a la corriente de carga, el tiempo de respaldo es incrementado para valores mínimos de corriente de falla, aunque ambos relevadores tengan la misma curva. Para obtener el mismo retardo (CTI) para cualquier valor de corriente de falla hay dos mecanismos: el primero, modificar la palanca de tiempo para cada valor de corriente de falla (curvas 1, 2 y 3 en figura 3). Segundo, en la figura 3 se observa que la curva 4 es similar a la curva de la protección primaria ($Rele_p$). Debido a la diferencia

en el ajuste de la corriente de arranque entre $Rele_p$ y $Rele_R$, la curva de $Rele_R$ no puede ser obtenida por medio del ajuste de la palanca de tiempo de $Rele_p$; sin embargo, esta curva es asintótica a la corriente de arranque de $Rele_p$. Por tanto, si la función de tiempo T_R se determina en base a la expresión analítica de la curva de tiempo de la protección primaria evaluada con la corriente de arranque de la misma protección más el intervalo de coordinación (figura 4), se tiene el cumplimiento de (2) para valores de falla constante y variable. El modelo de la curva de tiempo usado en la figura 4 es IEC Standard 255-4 (1976). Las expresiones analíticas ilustradas en la misma figura corresponden a la curva de tiempo establecida en los relevadores de sobrecorriente de tiempo inverso, bajo esta relación tiempo y corriente se establece la operación del relevador. Las curvas son el tipo *my inversa*, y los parámetros A y n son presentados en IEC Standard 255-4 (1976).

La expresión adaptativa del relevador es obtenida de (2). La corriente de operación (I^p) es determinada como la razón de la corriente de cortocircuito del sistema eléctrico (I_{cc}) y la corriente de arranque de la protección primaria ($I^p = I_{cc} / I_a^p$). La función de tiempo adaptiva es:

$$H(I^p) = \frac{1}{T_p(I^p) + CTI}. \quad (3)$$

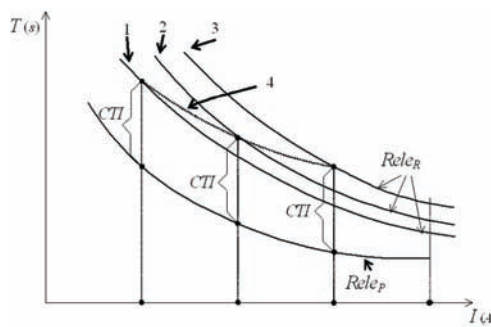


Figura 3. Característica de operación adaptativa

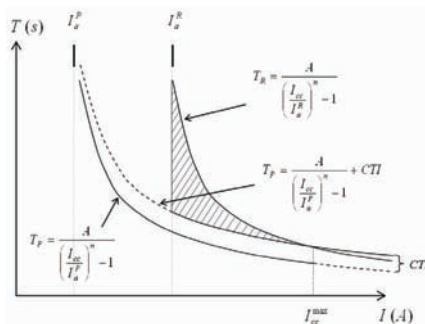


Figura 4. Curva de tiempo propuesta

Cuando la característica de la protección primaria es conocida, $T_p(I^P)$ puede ser sustituida directamente en (3). Cuando la ecuación de tiempo es desconocida, pero la gráfica está disponible, es posible obtener pares de valores (I, T) y usar un programa de ajuste de curvas fuera de línea para obtener $T_p(I^P)$ (Sachdev, 1978; Hieber, 1965; IEEE Standard C37.112-1996, 1996). Si la protección primaria es un fusible, únicamente es necesaria la curva de tiempo máximo de liberación; si la protección primaria es un restaurador, es necesaria la curva de tiempo y el ajuste de arranque.

La representación del estado dinámico del relevador de sobrecorriente utilizando la función adaptiva de tiempo es:

$$\Delta t \sum_{k=1} H(I^P) = 1, \quad (4)$$

donde Δt es el periodo de muestreo, la condición de operación se cumple cuando el resultado de la integración de la función adaptiva $H(I^P)$ es igual la unidad (IEEE Standard C37.112-1996). El tiempo en el cual el relevador operó es determinado como el producto de la muestra que dio cumplimiento de la Ec. 4 y el periodo de muestreo.

Para condiciones de protección de líneas multi-terminales (Rele A en la figura 1a), la característica de

operación del relevador es definida por la protección primaria más lenta.

Estructura funcional

El diagrama funcional del relevador adaptivo de sobrecorriente propuesto es mostrado en la figura 5. El relevador adaptivo está compuesto básicamente de dos elementos adaptivos: corriente adaptiva de arranque para incrementar la sensibilidad del relevador; y tiempo adaptivo de operación para garantizar un retardo constante en la operación del relevador, independientemente de la magnitud de corriente de falla. La función principal del bloque de corriente adaptiva de arranque es la detección de falla. La corriente de arranque es determinada de (1) y restringida por el ajuste de un relevador convencional I_a^{\max} y por la salida del relevador auxiliar 52a (ANSI/IEEE Std 141-1986), su salida es coherente con el estado del interruptor de potencia, de tal forma que al tener una salida 0 es indicativo que la línea está puesta fuera de servicio y el ajuste del relevador adaptivo es I_a^{\max} . La señal (T/F) es formada en la salida; si la falla ha sido detectada ($I_k > I_a$) se emite la señal T y la condición de arranque es declarada; se inicia entonces, el proceso de integración en el elemento de tiempo (4).

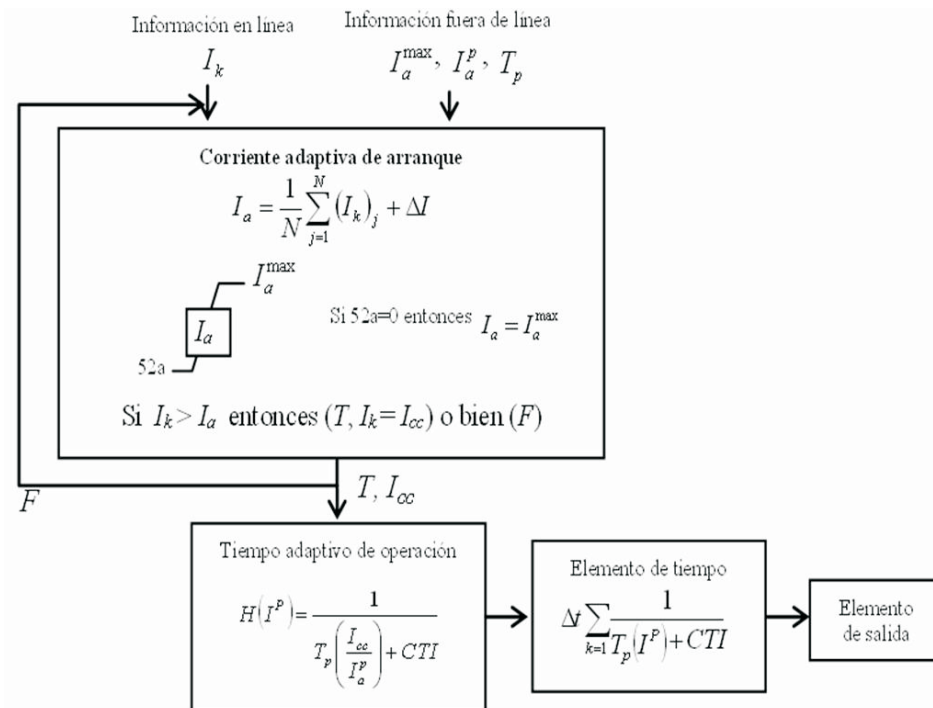


Figura 5. Diagrama funcional del relevador adaptivo de tiempo inverso

La señal F es una condición de bloqueo para la operación del relevador.

El bloque de tiempo adaptivo de operación calcula el valor de la función $H(I^p)$ presentada en (4). La integración de T_p emula la dinámica de operación de la protección primaria. El intervalo de tiempo de coordinación CTI (0.3 s) es adicionado para asegurar la coordinación entre el relevador adaptivo y el dispositivo primario. Si el elemento de corriente emite la señal permisiva T ; la señal de salida del bloque de tiempo adaptivo es integrada por el elemento de tiempo. Este proceso de integración establece la dinámica de operación del relevador en presencia de corrientes de falla variables. Finalmente, en el elemento de salida, la condición de disparo es verificada y la señal de salida es enviada al circuito de disparo del interruptor.

El tiempo de operación del relevador adaptivo debe ser establecido como una función de la curva de tiempo del dispositivo primario. Existe, entonces, una independencia entre el tiempo de operación del relevador adaptivo (dependiente del tiempo de operación de la protección primaria), y la corriente de arranque (determinada según (1) y actuando únicamente como detector de falla). La corriente de arranque es dependiente de la condición de carga, permitiendo un incremento en la sensibilidad. Mediante el proceso de adaptación del tiempo de operación se obtiene una coordinación automática del relevador adaptivo con el dispositivo de protección primario; no es necesario realizar ningún procedimiento para su coordinación, aun cuando se presenten cambios en las condiciones de operación del sistema eléctrico, tales como: cambios topológicos, de generación y carga; que modifiquen la magnitud de la corriente de cortocircuito. Esto se observa en la figura 4 en donde al incrementarse el valor de corriente de cortocircuito el intervalo de coordinación según el criterio propuesto (4) se mantiene.

Durante una falla (trifásica o bifásica); la corriente de arranque del relevador adaptivo vigente es determinada en el periodo anterior del cálculo de demanda, por tanto, la condición de falla es declarada y la función de tiempo es activada (figura 5).

Se presentan dos alternativas de operación en dependencia si la corriente de arranque del relevador adaptivo es menor a la corriente de arranque del relevador primario. En la primera alternativa, la corriente de arranque del relevador adaptivo tendrá un límite mínimo, la corriente de arranque del dispositivo primario; entonces, aun cuando el relevador adaptivo detecte la falla, el múltiplo de la corriente de arranque será menor que 1.0 y la operación no se efectuará. En la segunda

alternativa, la corriente de arranque del relevador adaptivo no tendrá límite inferior, por tanto, será factible la operación del relevador adaptivo en condiciones en donde el dispositivo primario no tenga sensibilidad, esta condición no representa una pérdida de coordinación; la falla entonces, sería liberada por el relevador adaptivo.

Para efectuar el proceso de coordinación, es necesario obtener la expresión analítica de la curva de tiempo de la protección primaria, ya sea fusible, relevador electromecánico o restaurador, incluyéndola en la expresión dinámica del relevador adaptivo. No es necesario remover los dispositivos de protección existentes. La presencia del relevador adaptivo propuesto ofrece mayores posibilidades de solucionar problemas de sensibilidad y coordinación entre dispositivos de protección.

La coordinación entre una serie de relevadores de sobrecorriente (relevador adaptivo entre relevadores convencionales) se presenta en Conde (2003). La coordinación entre una serie de relevadores adaptivos es efectuada respetando el principio descrito, cada relevador tendrá la expresión analítica del relevador primario más CTI . Este proceso no implica tiempos elevados de operación para la serie de relevadores, porque el efecto de la corriente de carga es minimizado. La I_a^{\max} para cada relevador es determinada en forma similar que en relevadores convencionales.

Comparación entre relevadores de sobrecorriente

En esta sección se presenta un estudio comparativo de sensibilidad y tiempo de operación entre tres tipos de relevadores de sobrecorriente: convencional, secuencia negativa y adaptivo.

Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad fue realizado en el sistema radial mostrado en la figura 6a. La corriente de falla mínima es simulada en el Bus 4. La variación de las impedancias Z_3 y Z_4 , simulan una configuración multi-terminal y una variación de la corriente de carga, respectivamente. Para este análisis, los relevadores de sobrecorriente de fase fueron ubicados en el Bus 2 (*Rele B*). La sensibilidad es ponderada de acuerdo a la siguiente relación:

$$Sensibilidad = \frac{I_{cc}^{\min}}{I_a}$$

Los métodos para determinar los valores de sensibilidad para el relevador convencional y el de secuencia negativa son descritos en Elneweihy *et al.* (1992) y

ANSI/IEEE Std 141-1986 (1986), respectivamente. Para el relevador adaptivo, se asume que su corriente de arranque (1) no está limitada por el ajuste de arranque del dispositivo primario. Este es un estudio basado en un sistema en particular, las condiciones del estudio pueden cambiar, debido a la dependencia topológica, estados operativos y esquemas de protección; pero es posible obtener un estudio cualitativo de sensibilidad de los tres tipos de relevadores de sobrecorriente.

La corriente de falla mínima es determinada como una falla bifásica en condiciones de generación mínima y ubicada en el Bus 4. El valor aceptado de sensibilidad es 1.5 (ANSI/IEEE Std 141-1986,1986). En la figura 6b se muestran los valores de sensibilidad de los relevadores para diferentes valores de corriente de carga (I_k) y contribuciones de la fuente de generación (P_{Gen}). Se observa que los relevadores convencional (plano 1) y de secuencia negativa (plano 2) son insensibles al cambio de demanda y mantienen la misma sensibilidad, debido a que su corriente de arranque es independiente de la dinámica de la carga.

En cambio, el relevador adaptivo tiene un ajuste que es dependiente de la dinámica de la carga, esto resulta

en un incremento de la sensibilidad del relevador durante condiciones de demanda mínima comparado con los otros relevadores (ver plano 3 en figura 6b).

Durante condiciones de mayor contribución de potencia (P_{Gen}) en la red, la sensibilidad de los tres tipos de relevadores analizados se incrementa (mayor corriente de falla). En el relevador adaptivo se presenta un incremento mayor de sensibilidad comparada con los otros relevadores.

Es posible concluir, que el relevador adaptivo presenta mayor sensibilidad que los relevadores convencionales y de secuencia negativa durante condiciones de demanda mínima y durante estados operativos de mayor contribución de potencia, debido a su mayor dependencia a la dinámica de la corriente de carga y a la variación del estado operativo (contribución de potencia).

La sensibilidad del relevador de secuencia negativa es similar al del relevador adaptivo, únicamente en demanda máxima y sólo para fallas bifásicas. La sensibilidad del relevador adaptivo siempre es mayor que la del relevador convencional.

En líneas multi-terminales (figura 6c), el relevador de secuencia negativa tiene mayor sensibilidad que el

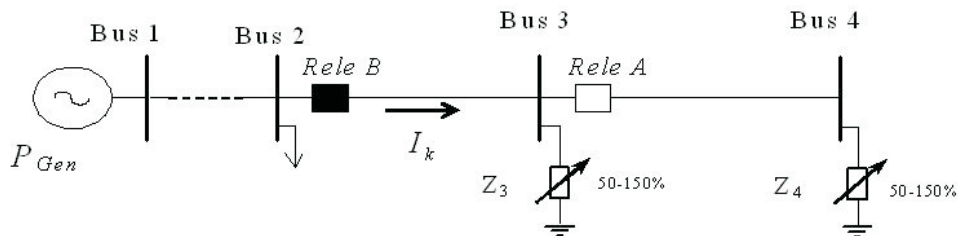


Figura 6a. Sensibilidad de relevadores de sobrecorriente de fase

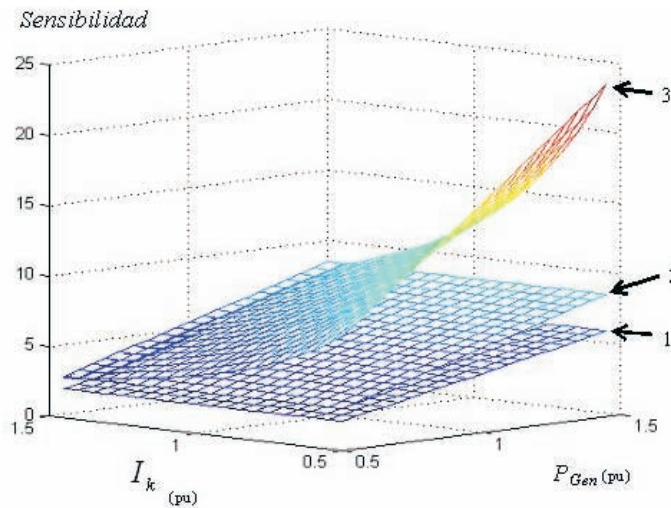


Figura 6b. Sensibilidad de relevadores de sobrecorriente de fase

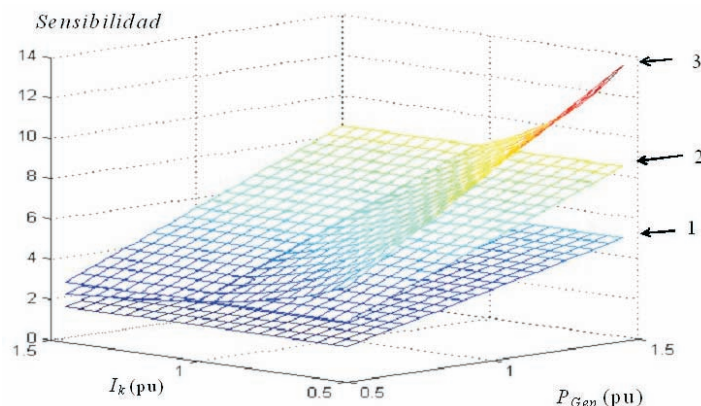


Figura 6c. Sensibilidad de relevadores de sobrecorriente de fase

relevador convencional, debido a que no es afectado por la corriente de carga, permitiendo definir su corriente de arranque un tanto mayor que la protección más lenta de los alimentadores de la configuración multi-terminal. Durante condiciones de máxima demanda, la sensibilidad de los relevadores de secuencia negativa es mayor que la de los relevadores restantes; sin embargo, bajo condiciones de demanda mínima, la sensibilidad del relevador adaptivo es la mayor.

De los resultados obtenidos podemos concluir que el relevador convencional es el que presenta menor sensibilidad, el relevador de secuencia negativa es más sensible en líneas multi-terminales (pero sólo para fallas bifásicas). El relevador adaptivo en cambio, tiene una mayor sensibilidad en redes radiales; y en redes multi-terminal, tiene mayor sensibilidad que el relevador de secuencia negativa en demanda mínima, cuando el relevador más lo necesita.

Análisis de tiempo de operación

El análisis de tiempo de operación fue efectuado en el sistema radial de la figura 6a. La corriente de arranque fue determinada por Z_3 y Z_4 , ambos ajustados al 100%. La figura 7 muestra el resultado del análisis de tiempo de los relevadores de sobrecorriente de fase. Se observa que el tiempo de respaldo del relevador de secuencia negativa es menor que el del similar convencional. El relevador adaptivo presenta un retardo constante (*CTI*), independientemente de la magnitud de la falla, esto resulta en tiempos menores de respaldo que los relevadores restantes.

Si la corriente de falla es menor que la corriente de arranque de la protección primaria, el relevador adaptivo podrá detectar la falla (lógica de detección de falla), por tanto, la corriente de arranque del relevador

adaptivo que realiza funciones únicamente de detección de falla, puede ser activada y definir, como en los relevadores convencionales, el tiempo de operación. Este criterio puede ser opcional al usuario. La activación de este criterio ofrece una solución a la pérdida de sensibilidad de la protección primaria, sobre todo, en condiciones de demanda mínima. La curva de tiempo del relevador adaptivo será la misma que la de la protección primaria sin el *CTI*. Para la activación de esta lógica se tendrán que cumplir las condiciones de detección de falla (señal *T* en figura 5) y el cumplimiento de la condición $I_{cc} < I_a^p$. Para el ejemplo mostrado en la figura 7, el relevador primario tiene 300 A como ajuste de I_a^p , y el relevador adaptivo tiene 220 A como el mínimo ajuste para condiciones de demanda mínima.

Para cualquier falla entre 220-300A, el relevador adaptivo tendrá mayor sensibilidad que el relevador primario, por lo tanto, la falla a través de alta impedancia será detectada.

En la figura 8, el efecto combinado del relevador propuesto es mostrado. El relevador modifica su corriente de arranque según (1), este valor limita la longitud de la curva de tiempo; se tendrá entonces un comportamiento dinámico de la curva de tiempo dependiendo del valor vigente de la corriente de arranque.

Durante la demanda máxima el relevador adaptivo será aun más sensible que el relevador convencional, debido a que su ajuste será 15% mayor que la corriente de carga comparado con el 1.5 o 2.0 veces, de un relevador convencional.

El tiempo de respaldo (4) será sólo el *CTI* mayor que el tiempo de operación del primario para cualquier valor de corriente de falla. Por tanto, la sensibilidad y el tiempo de operación del relevador de sobrecorriente son mejorados mediante cambios dinámicos de ajuste.

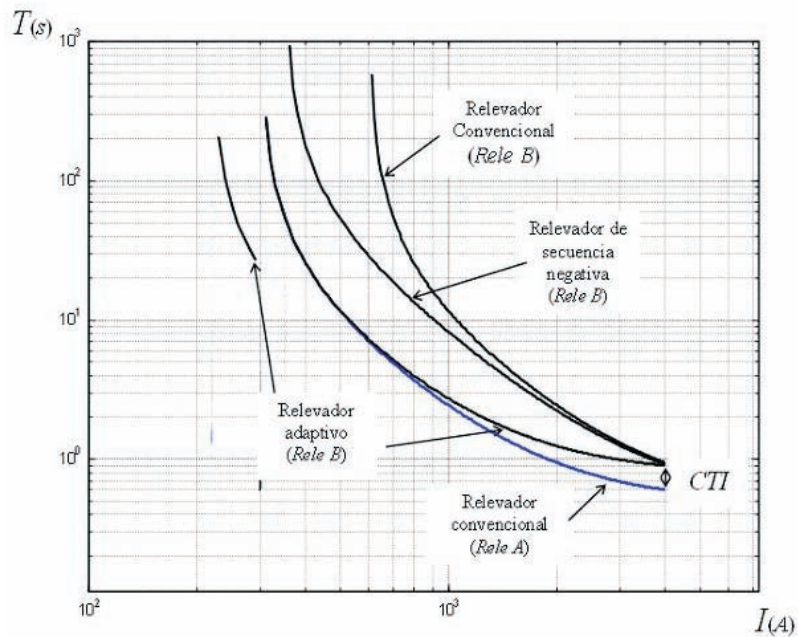


Figura 7. Comparación de curvas de tiempo de relevadores de sobrecorriente

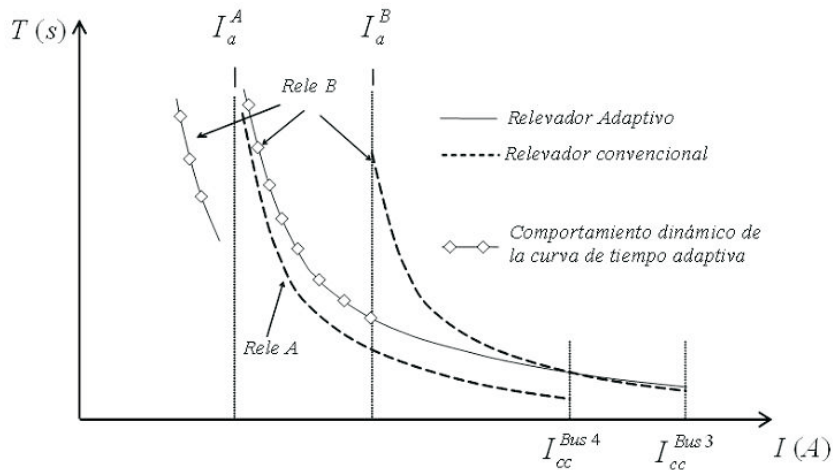


Figura 8. Comportamiento resultante del relevador adaptivo

Conclusiones

Los criterios adaptivos propuestos, incrementan la sensibilidad y reducen los tiempos de respaldo en los relevadores de sobrecorriente de tiempo inverso, principalmente durante escenarios de poca demanda.

Los parámetros de corriente de arranque y tiempo de operación son parámetros independientes en el relevador adaptivo. La corriente de arranque propuesta, incrementa la sensibilidad del relevador de sobrecorriente al ser dependiente de la corriente de carga vigente; esta

corriente de arranque adaptiva funciona como un detector de falla, dando la señal permisiva para el inicio del proceso de integración de tiempo de operación del relevador adaptivo. El tiempo de operación del relevador adaptivo es determinado emulando la dinámica de operación del dispositivo primario (corriente de arranque y curva de tiempo del dispositivo primario) y adicionando el intervalo de coordinación, garantizando una óptima coordinación.

Para incrementos apreciables de la corriente de carga, el relevador adaptivo tiene una lógica de detección

de fallas para supervisar la corriente de arranque. Esta lógica incluye una verificación de secuencia negativa y secuencia positiva. Esta lógica discrimina entre incrementos de carga y fallas (simétricas o asimétricas). Con la adaptación del tiempo de operación en el relevador de sobrecorriente, además de reducir los tiempos de respaldo, se obtiene una coordinación automática e independiente de cambios futuros en el sistema (tales como topología, generación y carga). El desempeño de la lógica de detección de falla fue satisfactorio, debido a que logra discriminar e identificar escenarios operativos tales como desbalance en estado estable, cortocircuito bifásico y disparo de la línea fallada (transferencia de potencia).

El relevador propuesto no requiere información de la red eléctrica adicional al de un relevador convencional, la rutina adaptiva es ejecutada únicamente con los fasores de corriente, esto exige de un incremento en la capacidad de hardware del relevador. Las funciones adaptivas propuestas son implementadas únicamente en el software del relevador. La simplificación algorítmica es obtenida con el uso del concepto de demanda en la definición de la corriente de arranque, requiriendo actualización cada 5 minutos; también el proceso de ajuste de curvas es fuera de línea, sin carga computacional al relevador. Entonces, el proceso adicional para el relevador adaptivo es mínimo. De las observaciones anteriores el relevador propuesto es obtenido con únicamente un ligero cambio en el "firmware" del relevador sin costo adicional.

Referencias

Abdelaziz A.Y., Talaat H.E.A., Nosseir A.I., Ammar A.H. An Adaptive Protection Scheme for Optimal Coordination of

- Overcurrent Relays. *Electric Power Systems Research*, 61(1): 1-9, 28 February 2002.
- ANSI/IEEE Std 141-1986. IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants.
- Askarian H. *et al.* A New Optimal Approach for Coordination of Overcurrent Relays in Interconnected Power Systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 18(2), April 2003.
- Conde A., Vázquez E., Altuve H.J. Time Overcurrent Adaptive Relay. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 25(10):841-847. 2003.
- Elnewehi A.F., Schweitzer E.O.III, Feltis M.W. Negative-Sequence Overcurrent Element Application and Coordination in Distribution Protection. *IEEE Power Engineering Society*. PES Summer Meeting, Seattle, WA, (July):12-16. 1992.
- Hieber J.E. Empirical Equations of Overcurrent Relay Curves for Computer Application. *IEEE Winter Power Meeting*. New York, N.Y., January/February 1965, Paper No. 31 CP 65-91, pp. 1-11.
- IEC Standard 255-4, *Single Input Energizing Measuring Relays with Dependent Specified Time*. IEC Publication 255-4. First Edition. 1976.
- IEEE Standard C37.112-1996. IEEE Standard Inverse-time Characteristic Equations for Overcurrent Relays.
- Sachdev M.S., Singh J., Fleming R.J. Mathematical Models Representing Time-Current Characteristics of Overcurrent Relays for Computer Application. *IEEE Paper A78:131-5*, January 1978.
- Urdaneta A.J. *et al.* Optimal Coordination for Directional Overcurrent Relays in Interconnected Power Systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 3(3):903-911, July 1988.

Semblanza de los autores

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

Ernesto Vázquez-Martínez. Se graduó como ingeniero en electrónica y comunicaciones en 1988, recibió su grado de maestro en ciencias de ingeniería eléctrica y su doctorado en ingeniería eléctrica por la Universidad Autónoma de Nuevo León, México, en 1991 y 1994, respectivamente. Desde 1996 trabaja como profesor investigador en el programa doctoral de ingeniería eléctrica de la UANL. Es miembro del IEEE y del sistema nacional de investigadores.

Vicente Paz Cantú-Gutiérrez. Se graduó de ingeniero electricista en 1977 y obtuvo su maestría en ciencias de la ingeniería eléctrica con especialidad en potencia en 1993 en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León, México, donde es profesor desde 1974. Actualmente desempeña el cargo de Coordinador del Departamento de Potencia Eléctrica. Sus áreas de investigación son la protección de sistemas eléctricos de potencia, y calidad de la energía.

La dureza del agua como indicador básico de la presencia de incrustaciones en instalaciones domésticas sanitarias

Water Hardness as Basic Indicator the Presence Fouling in Domestic Sanitary Facilities

Julián-Soto F.

Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional.
Unidad-Oaxaca.

CIIDIR-Instituto Politécnico Nacional-Oaxaca.

E-mail: julian_oaxmx@hotmail.com

(Recibido: octubre de 2007; reevaluado: abril de 2009; aceptado: septiembre de 2009)

Resumen

Se hizo el monitoreo de la calidad de agua en los valles centrales del estado de Oaxaca encontrando concentraciones muy elevadas de calcio, magnesio y carbonatos en las aguas provenientes de pozos profundos que se ubican en la periferia del río Atoyac, a diferencia del agua que proviene de las partes altas del valle de ETLA, donde se tienen durezas máximas de 140 ppm, por lo que para la distribución de ambos efluentes a la ciudad de Oaxaca y Municipios conurbados, se propone hacer una dilución en la planta potabilizadora del Fortín, en la misma ciudad de Oaxaca; ya que después de determinar los índices de Langelier y otros, en cada una de las fuentes de abastecimiento con software localizados en la bibliografía universal, encontramos que la corriente proveniente de las riveras del río Atoyac, tiene propiedades incrustantes y corrosivas. Haciendo las pruebas de laboratorio para encontrar la mejor dilución que fue de 60 a 40 % en volumen del gasto proveniente del Valle de ETLA y de la periferia del río respectivamente, el índice de Langelier se transformó a un valor negativo, indicando que está subsaturada con respecto al carbonato de calcio (CaCO_3) y que tenderá a disolverse, evitando con estas acciones las incrustaciones que deterioran las unidades sanitarias.

Descriptores: agua, dilución, incrustante, dureza.

Abstract

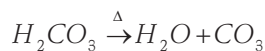
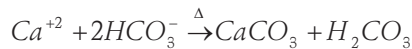
The monitoring of the water quality was done in the central valleys of Oaxaca state, finding very high concentrations of calcium, magnesium and carbonate in the waters from of deep wells that are located in the periphery of the river Atoyac, unlike the water that comes from the high parts of ETLA valley, where there are maximum hardnesses of 140ppm, so for the distribution of both effluent to the city of Oaxaca and neighboring municipalities, suggesting a further dilution of the water treatment plant in "Fortin" in the city of Oaxaca, that after determining the Langelier index and other, with software found in the universal bibliography. The results indicate that water from the river Atoyac, have corrosive properties. In laboratory doing tests, the best dilution was 60 to 40% by volume, of water from

Etla Valley and the periphery of the river respectively. Langelier index was converted to a negative, indicating saturation with respect to calcium carbonate (CaCO₃) and will tend to dissolve, avoiding the deterioration of the sanitary units.

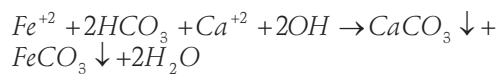
Keywords: Water, dilution, incrusting, hardness.

Introducción

Las aguas naturales contienen diversas cantidades de sales de composición variada y tienen la particularidad que al utilizarlas para el lavado con jabones de elevado peso molecular se forman precipitados en forma de grumos ésto se debe más que nada a sales solubles de calcio y magnesio. La dureza puede ser temporal o permanente, en el primer caso, el agua puede contener bicarbonato de calcio y de magnesio, hierro o magnesio. Se caracteriza por que su ablandamiento se logra con la ebullición, que consiste en que el bicarbonato se precipita desprendiendo dióxido de carbono y disminuyendo el valor del pH por las formaciones de ácido carbónico como se indica en las siguientes ecuaciones (Babor, 1996):



Sin embargo, resulta más práctico y económico agregar cal apagada Ca(OH)₂ en cantidades elevadas para reaccionar con los bicarbonatos, precipitándose los carbonatos correspondientes (Jairo, 2002) como indican la ecuaciones siguientes:



La dureza permanente es producida por sales más fijas como los cloruros (Cl⁻), sulfatos (SO₄²⁻), encontrando que la dureza total es la suma con la dureza temporal y que se acostumbra representarla en función de los bicarbonatos de calcio y de magnesio (Babor, 1996).

Como se mencionó anteriormente, la dureza es causada por iones metálicos divalentes que bien pueden ser calcio (Ca²⁺), magnesio (Mg²⁺), estroncio (Sr²⁺), fierro (Fe²⁺) y aniones como bicarbonato (HCO₃⁻), sulfatos (SO₄²⁻), cloruros (Cl⁻), nitratos (NO₃⁻) y silicatos (Jairo, 2002).

Las aguas que contienen mayor cantidad de bicarbonatos de calcio y de magnesio, representa la principal

forma de alcalinidad, y en algunos casos, es equivalente a la dureza carbonatada o total, que es igual a la temporal, o que produce incrustaciones o almacenamientos leves que se pueden remover mediante inyecciones de aire o agua a presión (Gomella, 1999).

También se tiene la dureza no carbonatada que se define como la diferencia entre la dureza total y la alcalinidad; que son compuestos carbonatados que se transforman a cristales del elemento correspondiente por la elevación de la temperatura, es un material duro y resistente que se almacena en las paredes internas de las tuberías y accesorios de calentadores y calderas, habiendo una pérdida en la transferencia de calor (Vernon, 2002).

Durante las diversas reacciones químicas, que se forman durante las incrustaciones, es importante analizar la aplicación de los principios de la termodinámica en equilibrio con la química del agua para estimar la tendencia del bicarbonato de calcio a precipitarse o a disolverse, considerando siempre un sistema cerrado, donde no se podrá adicionar ni eliminar materia con la fluidez de la energía, operando bajo condiciones de presión y temperatura constantes, como se indica en las ecuaciones (1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11).

$$G = H - TS \quad (1)$$

La expresión matemática anterior (1) representa la manera de evaluar la energía libre de Gibbs (G) kcal, en función de la entalpía (H) kcal, que es el contenido total de energía de un elemento o compuesto, (T) es la temperatura a la cual se realiza el proceso y (S) es la entropía que de alguna manera es la energía molecular interna, siendo el producto (TS) la parte de la energía total que no está disponible para realizar trabajo útil.

Para el caso de una reacción en equilibrio, la energía libre del sistema será mínima y se tiene.



Lo cual indica que al agregar la sustancia A y B a un recipiente la energía libre total (GT) será igual a la suma de las energías libres de cada componente en la reacción química, entonces:

$$GT = nA\bar{G}_A + nB\bar{G}_B + nC\bar{G}_C + nD\bar{G}_D \quad (3)$$

Esto significa que a medida de cualquier reacción se realiza en un tiempo cualquiera la condición de equilibrio de una reacción, ya que tiene su mínimo valor de energía libre y es proporcional a ΔG , que se define:

$$\Delta G = (\sum \gamma_i \bar{G}_i)_{\text{productos}} - (\sum \gamma_i \bar{G}_i)_{\text{reactantes}} \quad (4)$$

Considerando (γ_i) el coeficiente estequiométrico que indica la cantidad de energía necesaria, para el desarrollo del procesos y (G_i) en la energía libre (moles) (Vernon, 2002); siendo la expresión matemática para calcular (ΔG) en cualquier proceso químico:

$$\Delta G = \Delta G^0 + RT \ln \frac{(C)^c (D)^d}{(A)^a (B)^b} \quad (5)$$

$$\text{pero } \Delta G^0 = (\sum \gamma_i \bar{G}_0)_{\text{productos}} - (\sum \gamma_i \bar{G}_0)_{\text{reactantes}} \quad (6)$$

Que para el caso del carbonato de calcio, se tendrá:



$$\Delta G = \Delta G^0 + RT \ln Q \quad (8)$$

$$\Delta G^0 = -RT \ln K \quad (9)$$

$$Q = \frac{\{Ca^{+2}\} \{HCO_3^{-}\}}{\{H^+\}} \quad (10)$$

$$pH = -\log[H^+] \quad (11)$$

En el caso de tener $\Delta G > 0$, se tendrá precipitación de $CaCO_3$. Otra forma de evaluar las características incrustantes o corrosivas es por medio del índice de Langelier que se define como la diferencia entre el pH real del agua y el pH hipotético, si ésta estuviera en equilibrio con $CaCO_3$ (Vernon, 2002)

$$I.L = pH_a - pH_s \quad (12)$$

Que indica que si ($IL=0$) el agua estará en equilibrio con $CaCO_3$, si ($IL=+$) el agua estará sobre saturada con respecto a $CaCO_3$ y tenderá a precipitarse; finalmente, si ($IL=-$), el agua estará subsaturada con respecto a $CaCO_3$ y el contaminante tenderá a disolverse (Vernon, 2002).

Metodología

Metcalf y Eddy (1996) realizaron trabajos de dilución de corrientes para remover y disminuir la concentración de

contaminantes; para este trabajo se instalaron dos recipientes de 19 litros, de donde se extrajo agua de diferentes concentraciones en cuanto a la composición química, usando para este fin 2 bombas masterflex, de tal manera que con las válvulas de control instaladas en las salidas fue posible medir los gastos de cada una de las corrientes.

Posteriormente, se tomaron muestras de agua del depósito de almacenamiento hasta encontrar la mezcla óptima en cuanto a la menor dureza total del agua, se hicieron 16 corridas formando igual número de mezclas y midiendo la dureza total de dos maneras, con un kit Hach y con el método volumétrico E.D.T.A. los cuales son exclusivos para este fin.

Finalmente, se hicieron las interpretaciones adecuadas para el procesamiento de datos, considerando los resultados de laboratorio, tanto fisicoquímicos como de metales pesados.

Ubicación del área de estudio

El Río Atoyac brota de las partes altas del Valle de ETLA, en un lugar denominado las Sodas, perteneciente al Municipio de San Francisco Telixtlahuaca, desciende por las poblaciones de San Pablo Huitzo y Villa de ETLA, atravesando la ciudad de Oaxaca, llegando a Cuilápam de Guerrero, (lugar donde fue encarcelado y fusilado uno de los héroes de nuestra Independencia, Gral. Vicente Guerrero), continua su trayecto hasta desembocar en la Costa Oaxaqueña.

Desde el tramo de la Villa de ETLA, hasta Cuilápam de Guerrero, se han realizado una serie de perforaciones de pozos profundos que abastecen de agua a las poblaciones aledañas, no siendo la excepción el Municipio de Oaxaca de Juárez y 18 municipios conurbados, que reciben el agua de abastecimiento público de la planta potabilizadora denominada El Fortín, la cual se alimenta de más de 20 pozos que se tienen en la periferia del río Atoyac en la ciudad de Oaxaca y que en el mapa (figura 1) se indica con la letra (A) ó número 67.

Por otro lado, la misma planta potabilizadora recibe otro afluente de un manantial que brota en el Cerro de la Guacamaya, pasando por los pueblos de San Agustín y San José ETLA, llegando a la ciudad de Oaxaca como se aprecia en la misma representación esquemática.



Figura 1. Mapa del área de estudio en el Valle de Oaxaca

Parte experimental

El presente trabajo de investigación tuvo como principal objetivo representar los porcentajes en volumen de los fluidos procedentes de la zona alta del valle de Etla y de los pozos que se ubican en la zona aledaña a la rivera del río Atoyac. Durante el experimento, se utilizaron dos bombas Masterflex que extraen el agua de dos garrafones que contienen agua de las fuentes mencionadas, controladas por una válvula en la salida con el fin de variar los gastos que llegaban a un depósito mezclador; de este último recipiente se tomaron las muestras de agua a diferentes volúmenes y se medía la dureza total con un kit, marca Hach, cuyos valores fueron confirmados en el laboratorio de CIIDIR-OAXACA por medio de la aplicación del método volumétrico E.D.T.A, hasta encontrar la mejor proporción. Con los resultados obtenidos de la caracterización completa del agua se ingresaron al software y se encontraron los resultados de los índices medidos de la mezcla óptima.

Diseño del prototipo

Se trató entonces de encontrar la mejor mezcla óptima de 2 corrientes de agua, la primera proveniente de la zona alta del Valle de Etla y que aproximadamente representa el 30% del gasto total de agua en los Valles Centrales; y la otra corriente proveniente de los pozos profundos y que se estima de un gasto de 70 % de un consumo total de $360,796 \text{ m}^3 / \text{día}$ para evitar la corrosión en tuberías y accesorios sanitarios de uso en casas habitación y otras; para tal fin, se pensó en utilizar como materiales: dos garrafones de 19 litros, dos bombas masterflex, cables de corriente eléctrica, recipiente de plástico, válvulas de control, tuberías, kit para dureza total, potenciómetro, bidones de (19 l) de PET para el muestreo y caracterización del agua.

En la figura 1 se tiene la ubicación de la zona alta de Etla, que por su topografía, llega a la Planta potabilizadora del Fortín, sin recibir ninguna energía más que la de la fuerza de gravedad, del mismo modo, se observa la

zona baja de la periferia del río Atoyac, donde se utilizan sistemas de bombeo para enviar el preciado líquido al mismo sistema purificador.

Una vez armado el prototipo, se procedió a su operación, muestreo y caracterización del agua.

Operación

Las bombas masterflex succionan el agua de cada uno de los recipientes (1,2), en las proporciones dosificadas por las válvulas (4,7), tomando soluciones de diversa composición en (8); de este último recipiente se tomaron las diversas muestras en volúmenes diferentes, lo

que se observaba en cada uno de los recipientes utilizados (figura 2), tomando las mezclas que se dan en la tabla 1.

Procedimiento de operación

Los depósitos (1) y (2) de la figura (2) se llenaron con las aguas provenientes de Etna y Río Atoyac, respectivamente, se regularon las salidas del agua con las válvulas (3) y (4), recibiendo la mezcla en el recipiente (8), midiendo los gastos con los recipientes originales, y haciendo un volumen de 3 L en cada una de las pruebas.

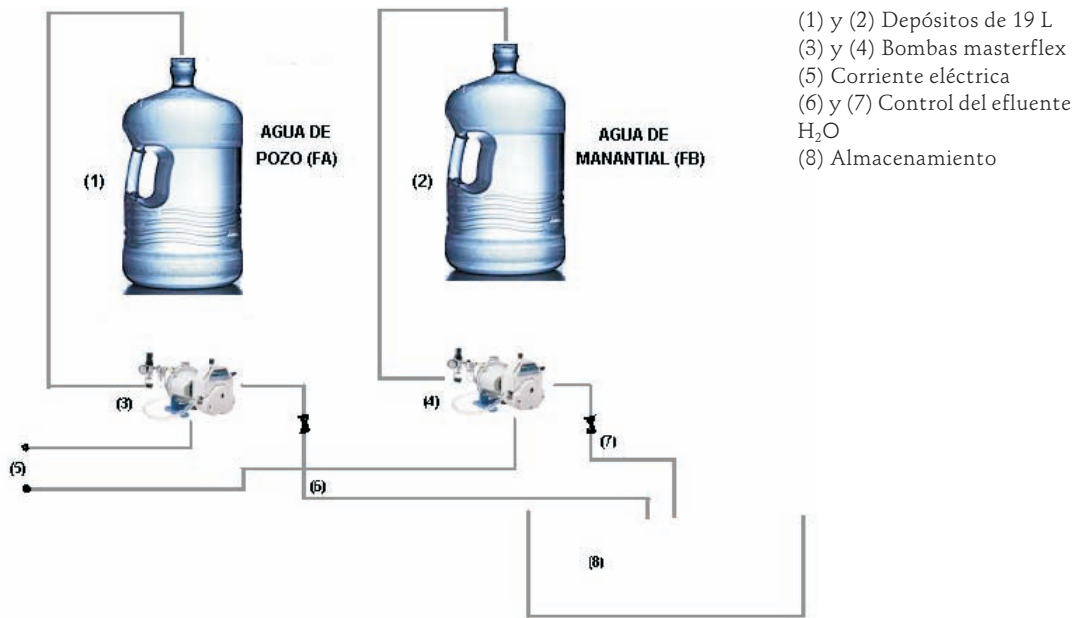


Figura 2. Esquema del prototipo para la realización de la mezcla óptima

Tabla 1. Volúmenes utilizados en la formación de la mezcla óptima

Experiencia	Parámetro	% 1 vol.	% 2 vol.	vol. total	Resultado
1	Dureza total	60(1.8) L	40(1.2) L	3L	320 mg/L CaCO ₃
2	Dureza total	50(1.5) L	50(1.5) L	3L	280 mg/L CaCO ₃
3	Dureza total	40(1.2) L	60(1.8) L	3L	220 mg/L CaCO ₃
4	Dureza total	30(0.9) L	70(2.1) L	3L	180 mg/L CaCO ₃

Tabla 2. Composición química del agua proveniente de pozos profundos

Parámetros	Unidades	Resultado influente
Dureza total	mg/L (CaCO ₃)	473.19
Dureza al calcio	mg/L (CaCO ₃)	222.81
Dureza al magnesio	mg/L (CaCO ₃)	247.64
Magnesio libre	mg/L	60,31
Calcio libre	mg/L	88.85
Fierro	mg/L	1.16
Manganeso	mg/L	2.09
pH		7.6
Turbiedad	NTU	12.86
Dureza de CO ₃ (mg/L)	mg/L (CaCO ₃)	242.95

Tabla 3. Composición química del agua proveniente de manantiales de los Valles altos de Etlá, Oax. (manantial)

Parámetros	Unidades	Resultado efluente
Dureza total	mg/L (CaCO ₃)	140
Dureza al calcio	mg/L (CaCO ₃)	80
Dureza al magnesio	mg/L (CaCO ₃)	60
Magnesio libre	mg/L	27
Calcio libre	mg/L	39
Fierro	mg/L	0.86
Manganeso	mg/L	1.7
pH		7.4
Turbiedad	NTU	10.3
Dureza de CO ₃ (mg/L)	mg/L (CaCO ₃)	136.0

En estudios realizados se hace una clasificación del agua conforme la dureza total, como se muestra en la tabla (4) (Jairo, 2002).

La composición química del agua de pozos profundos (tabla 2) es muy dura, por lo que se tiene un índice de Langelier positivo, como se indica en la tabla 5.

Tabla 4. Concentraciones estandar para definir las características del agua

Concentración (Ca+Mg)	Características
0 – 75 mg/L	Blanda
75 – 200 mg/L	Moderadamente dura
200 – 300 mg/L	Dura
> 300 mg/L	Muy dura

Tabla 5. Software de cálculo de Índice de Langelier y otros

Parámetro	Unidades	Valor
pH		7.6
C.E	μS/cm	880
TDS	mg/L	563
Ca ⁺²	mg/L	88.85
Ca ⁺²	mg/L CaCO ₃	222.81
HCO ₃ ⁻	mg/L	178.1
CO ₃ ²⁻	mg/L	0
* Alcalinidad	mg/L CaCO ₃	146.0
A		0.18
B		1.97
C		1.95
D		2.16
phsaturación		7.33
pHeq		7.84
T ^a	°C	21
Langelier (LSI)		0.3
Ryznar (RSI)		7.1
Puckorius (PSI)		6.8

Sin embargo, con la caracterización realizada al agua de manantial el I.L. (Índice de Langelier) es negativo, por lo cual el CaCO₃ tiende a disolverse. Estas características

nos permiten proponer una dilución de los influentes a la planta potabilizadora, que abastece de agua a la ciudad de Oaxaca (tabla 6).

Tabla 6. Software de cálculo de Índice de Langelier y otros (continúa ...)

Parametro	Unidades	Valor
pH		7.4
C.E	μS/cm	880
TDS	mg/L	563
Ca ⁺²	mg/L	39
Ca ⁺²	mg/L CaCO ₃	80.00
HCO ₃ ⁻	mg/L	178.1
CO ₃ ²⁻	mg/L	0
* Alcalinidad	mg/L CaCO ₃	146.0
A		0.18
B		1.97
C		1.50
D		2.16

Tabla 6. Software de cálculo de Índice de Langelier y otros (... continuación)

Parametro	Unidades	Valor
phsaturación		7.78
pHeq		7.84
T ^a	°C	21
Langelier (LSI)		-0.4
Ryznar (RSI)		8.2
Puckorius (PSI)		7.7

Resultados

La medición de dureza total como CaCO₃ (mg/L), en la mezcla óptima encontrada se muestra en la tabla 7.

En la gráfica de la figura 3 se indica, la concentración de la dureza total del agua, con respecto a la mezcla óptima encontrada.

Tabla 7. Concentraciones de dureza total preliminar a la caracterización final del agua

FA (%)	FB(%)	Concentración ppm
20	80	80
30	70	120
40	60	140
50	50	190
60	40	240
70	30	260
80	20	330

Experiencia (1) muestra de 1L (FA = muestra manantial, FB = muestra pozos)

FA (%)	FB(%)	VT (ml)
20	80	1000
30	70	1000
40	60	1000
50	50	1000
60	40	1000
70	30	1000
80	20	1000

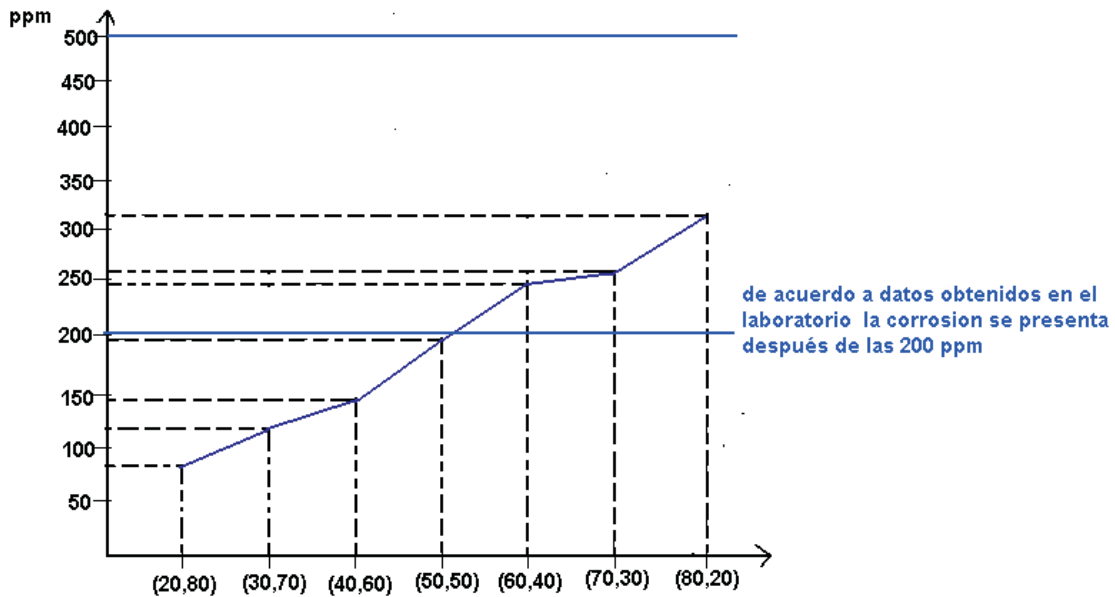


Figura 3. Representación de la mezcla óptima con las propiedades corrosivas o incrustantes del agua

De esta manera encontramos que la mejor proporción es la 60 y 40% de agua, que de un volumen de 1L, 400 mL correspondieron al agua de pozo y 600 mL de agua de manantial para formar una mezcla óptima, con una dureza total de 140 a 160 ppm, cuyos parámetros finales se resumen en la tabla 8.

En la tabla 9 se marca la determinación del índice de Langelier, con un valor de (-0.2), que corresponde a la composición química del agua mezclada con las 2 corrientes manejadas.

Tabla 8. Composición química del agua mezclada en una relación 60 y 40%

Parámetro	Unidades	Resultado	NOM-127-SSA-1996
Dureza total	mg/L (CaCO ₃)	160	500
Dureza Ca ⁺²	mg/L (CaCO ₃)	90	300
Dureza al Mg ⁺²	mg/L (CaCO ₃)	70	200
Magnesio libre	mg/L	42	-
Calcio libre	mg/L	38	-
Fierro	mg/L	0.05	0.30
Manganeso	mg/L	1.9	0.15
pH		7.5	6.5 – 8.5
Turbiedad	NTU	5.5	5 (NTU)
Dureza de CO ₃	mg/L (CaCO ₃)	120	300

Tabla 9. Software de cálculo de Índice de Langelier y otros

Parámetro	Unidades	Valor
pH	$\mu\text{S}/\text{cm}$	7.5
C.E	mg/L	880
TDS	mg/L	563
Ca^{+2}	mg/L	38
Ca^{+2}	mg/L CaCO_3	90.00
HCO_3^-	mg/L	178.1
CO_3^{2-}	mg/L	0
* Alcalinidad	mg/L CaCO_3	146.0
A		0.18
B		1.97
C		1.55
D		2.16
phsaturación		7.72
pHeq		7.84
T^a	$^{\circ}\text{C}$	21
Langelier (LSI)		-0.2
Ryznar (RSI)		7.9
Puckorius (PSI)		7.6

Análisis de resultados

Los efectos de las sales que contiene el agua proveniente de los pozos profundos en los valles centrales de Oaxaca, son adversos en las instalaciones sanitarias, que se manifiestan por el almacenamiento de incrustaciones. Esta observación se confirma con el índice de Langelier que tuvo un valor de 0.3; a diferencia del agua que proviene de manantiales donde se tienen durezas bajas y cuyo índice de Langelier es de -0.4 , indicando con este valor la disociación de las sales, y por tanto, evitando con esto la corrosión en instalaciones domésticas, que solamente tienen un periodo de vida menor a 12 meses.

El fenómeno de dilución, tal y como lo proponen Metcalf (1996) en el tema de dotación de agua, ayuda a resolver problemas en comunidades con escasos

recursos requeridos para el tratamiento y purificación del agua.

Después de haber realizado las diluciones, se encontró una combinación óptima de 40% del volumen de agua de pozos y 60% del volumen de agua de manantial; con una dureza de 160 mg/L como Carbonato de Calcio (tabla 8), disminuyendo todas las concentraciones de otros componentes y disminuyendo el Índice de Langelier a (-0.2) , lo que garantiza una disociación de sales para evitar la destrucción de llaves hidráulicas, depósitos de agua en las tasas de baños, regaderas, válvulas de control, de agua, etc. Otros parámetros como Hierro (Fe), Manganeseo (Mn), Turbiedad, tienen valores que rebasan los límites máximos permisibles que se encuentran en la NOM-127-SSA-1996, pero que no tienen efectos en las unidades sanitarias.

La metodología de evaluación aplicada es bastante práctica utilizando el Software que recomienda la Secretaría Mundial de la Salud (2002) y que para la industria pudiera ser muy importante.

Conclusiones

La propuesta del método de dilución resulta viable y económica si se considera que las dos corrientes de agua están llegando a la planta potabilizadora denominada el fortín; por lo cual, solamente se requiere instalar válvula de control para la dosificación de los gastos de agua, formando la mezcla recomendada (con una relación de 40 a 60 % en volumen).

Esta actividad permitirá dar un período de vida más largo en las unidades sanitarias que para el caso de las regaderas. En la actualidad, se deben cambiar por lo menos 3 veces por año, a diferencia de lo acostumbrado en el Distrito Federal, donde casi no se cambian.

Este estudio pretende ser una herramienta para apoyar a las autoridades de nuestro país en la evaluación de las características, corrosión o incrustantes del agua que se utilizan para el abastecimiento público, ya que afortunadamente en la actualidad los propietarios que pagan por un servicio de abastecimiento del agua, todavía no cobran el deterioro que reciben las unidades sanitarias y aceptan pasivamente cualquier calidad de agua.

Es importante comentar que el diseño del experimento es muy elemental, ya que en la actualidad no se tienen recursos económicos para el desarrollo de grandes proyectos; por lo que se busca una inversión de bajo costo para resolver grandes problemas de índole social y económico.

Agradecimientos

Reconozco sinceramente al Instituto Politécnico Nacional de nuestro país los apoyos recibidos, donde se

incluyen los salarios percibidos y que entendemos debe ser un enorme sacrificio para el sostenimiento de una institución tan importante como es el CIIDIR-OAXACA. Asimismo, agradezco a los alumnos del Instituto Tecnológico de Oaxaca (ITO) su decidido apoyo, para el intercambio de opiniones y la captura del presente trabajo.

Referencias

- Babor. *Química general*. Editorial Limusa. 1996.
 Jairo A. *Calidad del agua*. Editorial Alfa Omega. 2ª edición. 2002.
 Gomella H. *Tratamiento de aguas para abastecimiento público*. Editores técnicos asociados, S.A. 1999.
 Metcalf y Eddy. *Ingeniería sanitaria, tratamiento, evacuación y reutilización de aguas residuales*. Ed. Porrúa. 1996.
 Vernon J. *Química del agua*. Editorial Limusa. 2002.

Bibliografía sugerida

- APHA,AWWA,WPCF. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 2002.
 Departamento de Sanidad del Estado de Nueva York. *Manual de Tratamiento de Aguas de abastecimiento*. Ed. Limusa. 1998.
 Jairo A. *Potabilización del agua*. Ed. Alfa Omega. 3ª. Edición. 2001.
 Linvil G.R. *Operaciones unitarias de ingeniería sanitaria*. Ed. Continental. 1998.
 Norma Oficial Mexicana, NOM-127-SSA₁1994.
 Soto J. *Manejo de las aguas residuales*. Ed. Kalpulli. México. 2001.

Semblanza del autor

Félix Julián-Soto. Es ingeniero químico industrial egresado de la ESIQIE del Instituto Politécnico Nacional. Es profesor de matemáticas en la Escuela Normal Superior de México y maestro en ciencias en ingeniería química del Instituto Tecnológico de Oaxaca. Laboró en las Escuelas Secundarias Técnicas y Diurnas de DF. Actualmente se encuentra en el Centro de Investigación, denominado (CIIDIR-OAXACA), perteneciente al mismo Politécnico Nacional de México, ha participado y dirigido proyectos de investigación relacionados con la calidad y tratamiento del agua potable y residuales.

Intensidades máximas de lluvia para diseño hidrológico urbano en la república mexicana

Rainfall Maximum Intensities for Urban Hydrological Design in Mexican Republic

Campos-Aranda D.F.
Facultad de Ingeniería
Universidad Autónoma de San Luis Potosí
E-mail: campos_aranda@hotmail.com

(Recibido: agosto de 2008; aceptado: abril de 2009)

Resumen

Inicialmente, con base en el concepto del hidrosistema urbano y la urbanización, se establecen las dificultades y el enfoque de la estimación de las crecientes urbanas, basado en las curvas Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF). En seguida se contrasta en 10 estaciones pluviográficas ubicadas en zonas geográficas disímiles, un procedimiento para estimar curvas IDF, el cual utiliza la fórmula de Chen y la información disponible en la República Mexicana sobre isoyetas de intensidades y la lluvia máxima diaria anual. Posteriormente, habiendo verificado su capacidad y aproximación para reproducir las curvas IDF, el procedimiento utilizado se aplicó en 45 localidades importantes del país, presentándose los resultados. Por último, se formulan las conclusiones, las cuales destacan la aproximación y sencillez del procedimiento propuesto.

Descriptor: curvas Intensidad–Duración–Frecuencia, precipitación máxima diaria anual, fórmula de Chen, distribución GVE.

Abstract

Firstly, through the urban hydrosystem concept and through urbanization, the difficulties and approach of the urban flood estimation are established, based in the Intensity–Duration–Frequency curves (IDF). Next, in 10 recording gages located in very different geographic zones, a procedure is contrasted for IDF estimation curves, which utilized the Chen formula and the available information in the Mexican Republic for isohyet intensities and annual daily maximum rainfall. Late, having verified their capacity and approximation to reproduce the IDF curves, the utilized procedure was applied in 45 important locations of the country, showing the results. Lastly, the conclusions are formulated, which point out the approximation and simplicity of the proposal procedure.

Keywords: Intensity–Duration–Frequency curves, annual daily maximum precipitation, Chen formula, GEV distribution.

Introducción

Con el término *hidrosistemas* se describen conjuntamente los aspectos técnicos de la hidrología, la hidráulica y los recursos hidráulicos, incluyendo la aplicación de la economía, optimización, probabilidad y administración. Por ello, en tal designación se incluyen a los proyectos de infraestructura hidráulica que comprenden los sistemas de aprovechamiento de aguas superficiales, los de aguas subterráneas, los de distribución, los de control de crecientes y los de drenaje urbano. Éste último es el menor de los hidrosistemas citados; sin embargo, es bastante complejo, ya que incluye como componentes principales el abastecimiento de agua, la descarga de aguas residuales, el drenaje pluvial, el control de crecientes dentro de la propia zona urbana y el manejo de áreas inundables con influencia en las zonas suburbanas (Campos, 1999).

En los hidrosistemas urbanos, la *urbanización* altera la fase terrestre del ciclo hidrológico, incrementando el volumen y la velocidad del escurrimiento superficial, debido a la reducción de la infiltración en los suelos y a la mayor eficiencia hidráulica de los elementos del drenaje para conducir las aguas de tormenta. Entonces, la estimación de las crecientes en áreas y cuencas urbanas depende enormemente del estado de desarrollo que lleguen a alcanzar éstas, el cual generalmente va a diferir de sus condiciones actuales. Esto implica que el análisis probabilístico de los registros de crecientes, si los hubiera, es irrelevante, ya que éstos no corresponden a las condiciones de desarrollo futuras. Se requiere además, la consideración simultánea de las medidas de abatimiento y control de crecientes, ya que éstas modifican la respuesta hidrológica de las áreas o cuencas urbanizadas (Campos, 1999).

Por lo anterior, el enfoque más confiable y eficiente para la estimación de crecientes en zonas urbanas, las cuales sirven de base al diseño hidrológico de la infraestructura necesaria en los sistemas de drenaje menor o de aguas pluviales y mayor o de evacuación y protección contra crecientes, es la aplicación de los métodos hidrológicos que transforman lluvias de diseño en escurrimiento, al tomar en cuenta las condiciones físicas actuales y/o futuras de las áreas o cuencas urbanas. La aplicación de estos métodos comienza con el establecimiento de las curvas Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF), las cuales representan las características relevantes de las tormentas que ocurren en la zona.

Este trabajo tiene dos objetivos fundamentales, el primero consiste en contrastar en 10 pluviógrafos de la República Mexicana, un procedimiento propuesto

recientemente para construir curvas IDF, basado en la fórmula de Chen, el cual utiliza la información sobre isoyetas de intensidades y pluviométrica disponible en la República Mexicana. Habiendo verificado la capacidad reproductiva y la aproximación de tal enfoque para representar curvas IDF, el segundo objetivo se desarrolló aplicando tal procedimiento en más de 50 localidades del país, las capitales de los estados y algunas de sus ciudades más importantes para presentar los parámetros de la fórmula de Chen que definen en cada sitio sus curvas IDF, con duraciones que varían de 5 minutos a 24 horas y periodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años.

Desarrollo

Información pluviográfica utilizada

Procede de los Boletines Climatológicos números 3, 4, 5 y 6 publicados a comienzos de la década de los años ochenta (SARH, 1980a, 1980b, 1982 y 1983). En la tabla 1 se presentan las características generales de los 10 pluviógrafos utilizados, cuya selección de cada uno de ellos obedeció a la disponibilidad por Región Hidrológica y a su mayor amplitud de registro. Toda la información sobre intensidades máximas de lluvia (i , mm/h) y precipitación máxima diaria anual (PMD , mm) resumida en el tabla 1, procede de los Boletines Climatológicos citados. Se observa que las amplitudes de registro de i varían de 14 años en Tula, Tamaulipas (SARH, 1980a) a 38 años en la Presa El Palmito, Durango (SARH, 1980b); en cambio, los registros de PMD fluctúan de 19 a 59 años, en Vigas y Tampico, respectivamente.

La fórmula climática según Sistema de Köppen modificado (García, 1981) tomada de los Boletines respectivos, indica que en las estaciones pluviográficas utilizadas los climas varían del desértico en Ciudad Lerdo a los cálidos en Tansabaca y Tampico, pasado por los templados en Chicontepec y esteparios o semiáridos en el resto.

Procesamiento probabilístico de la información

Toda la información disponible (tabla 1), tanto de intensidades máximas (i) en las diez duraciones estándar de 5, 10, 15, 20, 30, 45, 60, 80, 100 y 120 minutos, como de precipitación máxima diaria anual (PMD), fue procesada con base en series anuales de máximos (SAM), esto es, únicamente se seleccionó el valor más grande de cada año en cada una de las diez duraciones estándar para

Tabla 1. Características generales e intensidades (mm/h) mínimas y máximas observadas en los pluviógrafos indicados

No.	Pluviógrafo Pluviómetro	Edo.	Coordenadas, clima y referencia			Periodo de registro (años)	Duraciones en minutos									
			Latitud	Longitud	Altitud		5	10	15	20	30	45	60	80	100	120
1	Tula Tula	TAM	23°00'04"	99°42'45"	1,140	1965–1978 (14)	54.0	36.0	30.0	23.0	16.0	16.5	13.8	10.5	8.4	7.0
						1952–1978 (27)	156.0	120.0	86.0	75.0	62.5	48.7	40.0	34.5	33.6	30.3
2	Tampico Tampico	TAM	22°14'19"	97°52'44"	12	1965–1979 (15)	114.0	93.6	76.4	63.6	51.9	40.3	32.5	25.0	20.0	16.7
						1921–1979 (59)	240.0	165.0	127.2	117.3	97.4	88.5	72.1	62.2	52.7	45.0
3	Cazadero Cazadero	ZAC	23°42'19"	103°05'55"	1,890	1963–1978 (16)	72.0	57.0	49.2	39.8	28.4	19.0	15.3	13.6	10.3	8.9
						1958–1978 (21)	162.0	117.0	84.0	79.8	63.4	49.6	43.1	36.8	32.8	29.2
4	Tansabaca Tansabaca	SLP	21°39'50"	99°12'48"	196	1961–1979 (18)	81.6	71.4	66.0	54.5	46.2	34.8	29.6	25.9	21.5	18.1
						1958–1979 (22)	240.0	174.6	159.2	151.5	124.4	108.3	101.1	91.5	81.8	75.3
5	Chicontepec Chicontepec	VER	20°59'36"	96°09'50"	595	1961–1979 (18)	108.0	79.2	70.0	60.0	47.2	38.7	32.9	24.8	19.8	16.5
						1923–1979 (43) ¹	228.0	151.8	132.0	123.0	118.	108.0	98.5	81.8	68.3	59.8
6	Tula Tula	HGO	20°03'22"	99°20'52"	2,060	1962–1979 (18)	49.2	34.8	30.0	25.5	19.3	14.1	12.2	9.4	7.8	6.6
						1931–1979 (47) ²	186.0	120.0	92.0	81.0	65.0	55.5	43.5	33.2	27.3	23.0
7	Vigas Vigas	SLP	21°48'34"	99°51'16"	900	1961–1979 (18)	48.0	36.0	31.0	28.2	18.8	12.5	9.4	7.1	5.6	4.7
						1961–1979 (19)	254.4	181.2	136.8	123.6	99.2	70.5	54.2	41.3	34.0	28.6
8	Saltillo Saltillo	COA	25°26'32"	100°59'34"	1,530	1939–1979 (21) ³	36.0	23.3	19.0	14.7	10.0	6.7	5.0	3.8	3.0	2.5
						1940–1980 (40) ⁴	198.0	147.0	122.0	104.3	84.0	63.5	49.7	38.1	30.6	25.5
9	Ciudad Lerdo Ciudad Lerdo	DGO	25°32'00"	103°31'18"	1,135	1947–1978 (32)	42.0	27.0	22.0	16.8	11.6	8.1	6.3	4.9	3.9	3.3
						1921–1978 (56) ⁵	240.0	165.0	140.0	105.0	76.9	61.5	50.9	41.0	34.9	29.9
10	Presa El Palmito Presa El Palmito	DGO	25°36'08"	105°01'21"	1,633	1941–1978 (38)	64.8	36.6	26.8	21.0	15.4	11.2	10.1	9.7	8.0	6.7
						1939–1978 (40)	246.0	139.5	108.0	111.0	104.0	76.0	57.6	43.5	34.8	29.0

¹ faltantes 1942 y 1943

² faltantes 1939 y 1945

³ faltantes: 1950–57, 1961–71 y 1977

⁴ falta 1957

⁵ faltantes 1930 y 1931

las intensidades y en cada año del registro para las precipitaciones diarias. Las SAM fueron analizadas probabilísticamente con dos técnicas disímiles para verificar la similitud de resultados en los cinco periodos de retorno adoptados de 5, 10, 25, 50 y 100 años, la primera corresponde a un enfoque de transformación de datos propuesta por Chander *et al.* (1978) y la segunda al ajuste de la distribución General de Valores Extremos (GVE), a través de los métodos de momentos, sextiles, máxima verosimilitud y momentos L (Campos, 2001), para seleccionar el que condujo al menor error estándar de ajuste (Kite, 1977).

La verificación de la calidad estadística de las SAM, no se realizó explícitamente, pero se verificó con base en la similitud de sus dos predicciones obtenidas con cada método probabilístico utilizado.

En la tabla 2 se han concentrado los resultados precedentes del mejor ajuste GVE, para las intensidades de únicamente 5, 20, 60 y 120 minutos de duración y periodos de retorno de 5, 25 y 100 años, designadas por i_{observ} es decir, son las intensidades máximas observadas. Esta selección de duraciones y periodos de retorno obedece a razones de ahorro de espacio para su presentación integral.

Isoyetas de intensidad en la República Mexicana

El cuaderno de curvas isoyetas (SCT, 1990) presenta a éstas por estados para las cinco duraciones siguientes: 10, 30, 60, 120 y 240 minutos, cada una con periodos de retorno de 10, 25 y 50 años. Esta cartografía fue elaborada procesando un total de 382 pluviógrafos, los cuales variaron de un mínimo de 2 en los estados de Aguascalientes, Campeche, Morelos y Quintana Roo a un máximo de 31, 32 y 34 en los estados de Chiapas, Oaxaca y Estado de México, respectivamente.

Tabla 2. Contraste y error relativo (E.R.) entre intensidades (i , mm/h) observadas y estimadas en los periodos de retorno (Tr) y las estaciones pluviográficas indicadas

	Tr (años)	Duraciones (minutos)				Tr (años)	5	20	60	120	
		5	20	60	120						
1. Tula (Tamaulipas)					6. Tula (Hidalgo)						
i_{obser}	5	115.5	66.0	31.6	20.1	i_{obser}	5	139.9	69.4	34.0	20.0
i_{estim}	5	102.7	58.6	29.6	17.5	i_{estim}	5	111.7	63.8	31.6	18.8
E.R.	5	-11.1	-11.2	-6.3	-12.9	E.R.	5	-20.2	-8.1	-7.1	-6.0
i_{obser}	25	173.6	78.9	42.0	29.9	i_{obser}	25	176.0	83.8	44.0	24.5
i_{estim}	25	177.2	101.1	50.4	30.2	i_{estim}	25	139.7	79.9	39.6	23.5
E.R.	25	2.1	28.1	20.0	1.0	E.R.	25	-20.6	-4.7	-10.0	-4.1
i_{obser}	100	231.2	84.7	49.5	38.8	i_{obser}	100	198.2	90.8	50.0	26.7
i_{estim}	100	241.4	137.7	68.7	41.2	i_{estim}	100	163.9	93.7	46.4	27.6
E.R.	100	4.4	62.6	38.8	6.2	E.R.	100	-17.3	3.2	-7.2	3.4
2. Tampico (Tamaulipas)					7. Vigas (San Luis Potosí)						
i_{obser}	5	222.5	101.6	56.0	36.2	i_{obser}	5	129.7	77.7	38.7	22.1
i_{estim}	5	213.8	117.7	61.8	39.5	i_{estim}	5	123.8	70.4	35.3	21.4
E.R.	5	-3.9	15.8	10.4	9.1	E.R.	5	-4.5	-9.4	-8.8	-3.2
i_{obser}	25	253.3	125.9	69.3	47.7	i_{obser}	25	198.1	115.0	50.1	28.9
i_{estim}	25	328.0	180.6	94.8	60.6	i_{estim}	25	207.7	118.1	59.3	35.8
E.R.	25	29.5	43.4	36.8	27.0	E.R.	25	4.8	2.7	18.4	23.9
i_{obser}	100	267.8	144.6	78.4	56.1	i_{obser}	100	273.4	147.5	57.0	33.0
i_{estim}	100	426.3	234.8	123.2	78.8	i_{estim}	100	279.9	159.2	79.9	48.3
E.R.	100	59.2	62.4	57.1	40.5	E.R.	100	2.4	7.9	40.2	46.4
3. Cazadero (Zacatecas)					8. Saltillo (Coahuila)						
i_{obser}	5	126.0	66.7	33.2	18.0	i_{obser}	5	133.1	74.5	33.5	18.7
i_{estim}	5	138.4	79.2	38.4	22.3	i_{estim}	5	113.6	65.0	32.0	18.9
E.R.	5	9.8	18.7	15.7	23.9	E.R.	5	-14.7	-12.8	-4.5	1.1
i_{obser}	25	165.5	83.1	44.6	28.0	i_{obser}	25	187.3	112.1	53.8	27.3
i_{estim}	25	215.8	123.4	59.9	34.8	i_{estim}	25	161.0	92.1	45.3	26.8
E.R.	25	30.4	48.5	34.3	24.3	E.R.	25	-14.0	-17.8	-15.8	-1.8
i_{obser}	100	199.5	96.4	54.2	40.6	i_{obser}	100	227.1	141.2	67.5	33.0
i_{estim}	100	282.5	161.6	78.4	45.6	i_{estim}	100	201.8	115.4	56.8	33.6
E.R.	100	41.6	67.6	44.6	12.3	E.R.	100	-11.1	-18.3	-15.9	1.8
4. Tansabaca (San Luis Potosí)					9. Ciudad Lerdo (Durango)						
i_{obser}	5	182.3	106.5	65.6	45.7	i_{obser}	5	134.8	63.8	30.4	18.3
i_{estim}	5	283.4	154.3	82.4	53.7	i_{estim}	5	132.3	75.2	36.7	21.6
E.R.	5	55.5	44.9	25.6	17.5	E.R.	5	-1.9	17.9	20.7	18.0
i_{obser}	25	236.3	146.2	101.6	73.3	i_{obser}	25	188.1	96.8	44.6	25.9
i_{estim}	25	419.1	228.1	121.8	79.4	i_{estim}	25	180.9	102.8	50.2	29.5
E.R.	25	77.4	56.0	19.9	8.3	E.R.	25	-3.8	6.2	12.6	13.9
i_{obser}	100	278.8	183.1	140.9	103.4	i_{obser}	100	230.0	128.5	56.8	31.5
i_{estim}	100	536.0	291.8	155.8	101.5	i_{estim}	100	222.7	126.6	61.9	36.3
E.R.	100	92.3	59.4	10.6	-1.8	E.R.	100	-3.2	-1.5	9.0	15.2
5. Chicontepec (Veracruz)					10. Presa El Palmito (Durango)						
i_{obser}	5	178.3	107.7	63.9	39.5	i_{obser}	5	147.8	67.0	33.6	20.0
i_{estim}	5	160.3	85.3	48.3	33.3	i_{estim}	5	117.8	67.2	33.0	19.4
E.R.	5	-10.1	-20.8	-24.4	-15.7	E.R.	5	-20.3	0.3	-1.8	-3.0
i_{obser}	25	225.2	130.0	106.6	56.6	i_{obser}	25	201.8	89.2	50.9	28.6
i_{estim}	25	281.2	149.6	84.7	58.4	i_{estim}	25	178.3	101.7	49.9	29.3
E.R.	25	24.9	15.1	-20.5	3.2	E.R.	25	-11.6	14.0	-2.0	2.4
i_{obser}	100	266.2	143.8	166.3	72.4	i_{obser}	100	250.7	106.8	67.7	35.9
i_{estim}	100	385.4	205.0	116.1	80.1	i_{estim}	100	230.3	131.4	64.4	37.9
E.R.	100	44.8	42.6	-30.2	10.6	E.R.	100	-8.1	23.0	-4.9	5.6

Procedimiento utilizado para construir las curvas IDF

Orientado a utilizar la información pluviográfica citada, permite complementar sus duraciones desde 5 minutos hasta 24 horas y ampliar sus periodos de retorno de 5 a 100 años; lo anterior, a través de utilizar la fórmula de Cheng-lung Chen, la cual ya ha sido probada en otros países y en México (Genovez y Fugagnolli, 2001; Chin, 2006 y Campos *et al.*, 2007). Tal procedimiento emplea además la información pluviométrica disponible en la forma de *PMD*, también conocida en la Comisión Nacional del Agua como precipitación máxima en 24 horas (P_{24}).

El procedimiento a utilizar fue sugerido recientemente por Campos (2007), se puede consultar en Campos (2008) y consiste en combinar la información de isoyetas de intensidad (SCT, 1990) con la disponible de *PMD*, para estimar los cocientes lluvia–duración (R) y lluvia–frecuencia (F) necesarios para aplicar la fórmula de Chen (Chen, 1983), que es la siguiente:

$$i_t^{Tr} = \frac{aP_1^{10} \log(10^{2-F} Tr^{F-1})}{(t+b)^c} = \frac{\alpha_{Tr}}{(t+b)^c} \quad (1)$$

donde a , b y c son parámetros función de R , i_t^{Tr} está mm/h, P_1^{10} en mm, t en minutos ($5 \leq t \leq 1,440$) y Tr ($5 \leq Tr \leq 100$) en años. Los valores calculados de i_t^{Tr} permiten dibujar las curvas IDF. Los valores de los cocientes R y F definen, respectivamente, la forma de las curvas IDF

y su separación entre ellas; en cambio, la lluvia P_1^{10} establece el escalamiento. Por ello, cuando se disponga de información pluviográfica se deberá de intentar estimar su valor, en lugar de leerlo en las cartas isoyetas.

En la tabla 3 se han concentrado los datos y parámetros obtenidos con el procedimiento empleado para los diez pluviógrafos de contraste de la tabla 1.

Los resultados que aporta la ecuación 1 en cada uno de tales pluviógrafos se han vaciado en la tabla 2, como valores i_{estim}^{Tr} , es decir, son las intensidades máximas estimadas.

Contraste y análisis de resultados

Para tener una medida numérica de las discrepancias entre las intensidades observadas y las estimadas con la fórmula de Chen según el procedimiento empleado, se utilizó el error relativo (E.R.), con la expresión siguiente:

$$E.R. = \frac{I_{est}^{Tr} - i_{obs}^{Tr}}{i_{obs}^{Tr}} 100 \quad (2)$$

en donde el error relativo se expresa en porcentaje y presenta un valor negativo cuando la intensidad estimada (i_{est}^{Tr}) resultó menor que la intensidad observada (i_{obs}^{Tr}); en cambio, cuando conduzca a un valor positivo indica que la intensidad estimada resultó superior a la observada. En la tabla 2 se han concentrado los E.R. calculados para cada una de las cuatro duraciones contrastadas, en los tres periodos de retorno indicados.

Tabla 3. Datos y resultados del procedimiento propuesto para encontrar la fórmula de Chen en los diez pluviógrafos indicados

Núm. Pluviógrafo	Intensidades (mm/h)			Precipitaciones máximas (mm)				Parámetros de la ec. 1			
	i_1^{10}	i_1^{25}	i_1^{50}	P_{24}^{10}	P_{24}^{25}	P_{24}^{50}	P_{24}^{100}	R_{prom}	a	b	c
1 Tula (Tam.)	41.0	50.5	58.0	79.6	101.5	120.7	142.6	0.498	32.117	10.538	0.834
2 Tampico (Tam.)	74.0	86.0	97.0	199.1	246.0	283.4	322.8	0.355	18.566	5.941	0.691
3 Cazadero (Zac.)	46.0	58.0	66.0	66.2	81.4	94.4	108.9	0.702	48.910	12.433	0.900
4 Tansabaca (S.L.P.)	96.0	118.0	135.0	301.8	370.0	421.4	473.2	0.319	15.724	4.739	0.652
5 Chicontepec (Ver.)	60.0	65.0	70.0	227.2	290.4	346.7	412.2	0.230	10.235	1.937	0.548
6 Tula (Hgo.)	38.0	43.0	48.0	73.1	83.1	90.1	96.8	0.523	34.440	11.093	0.849
7 Vigas (S.L.P.)	48.0	59.0	66.0	97.0	123.1	145.2	168.8	0.476	29.981	9.945	0.812
8 Saltillo (Coa.)	41.0	48.0	53.0	72.2	86.9	97.7	108.7	0.554	37.048	11.514	0.865
9 Ciudad Lerdo (Dgo)	44.0	53.5	60.0	73.6	87.5	97.4	107.0	0.608	40.605	11.552	0.875
10 Presa El Palmito (Dgo)	42.6	50.0	57.0	70.7	86.3	99.2	113.2	0.586	39.253	11.630	0.873

El análisis acucioso de los resultados numéricos del E.R. (tabla 2), indica que las diferencias máximas por defecto no rebasan el 30%, y en algunos casos, son menores del 10% como en los pluviógrafos de Ciudad Lerdo, Tampico y Vigas. Las discrepancias por defecto se consideran más peligrosas, pues conducirían a diseños hidrológicos insuficientes. Las diferencias máximas por exceso son del orden el 60%, en los pluviógrafos de Tula (Tamaulipas), Tampico y Cazadero, con máximo de 92.3% en Tansabaca y mínimo de 1.1% en Saltillo.

Se concluye que el procedimiento utilizado estima con bastante aproximación las curvas IDF, según se observa en la tabla 2 de manera general, y en particular, en Vigas y Ciudad Lerdo. Las mayores discrepancias ocurren por exceso en Cazadero y Tansabaca, en ambos casos pueden estar ligadas a una escasez de ocurrencia y registro de valores máximos, pues como se puede observar en la tabla 1, Cazadero presenta, en las duraciones menores, los valores máximos más bajos en comparación con estaciones de condiciones climáticas similares, por ejemplo Tula (Hidalgo) y Saltillo.

Aplicación en 45 localidades de la República Mexicana

Habiendo verificado que el procedimiento empleado tiene una capacidad reproductiva aceptable para construir curvas IDF, se realizó una aplicación extensiva buscando incluir a las capitales de los estados y sus ciudades más importantes, las cuales contarán en el sistema ERIC II (IMTA, 2000) con una estación pluviométrica cuyo registro fuera mayor de 20 años. Con tal

restricción se seleccionaron inicialmente 50 localidades, pero existen 341 sitios (Araiza y Campos, 2000). Como el procedimiento utilizado está limitado a valores menores de 0.70 del cociente R , se tuvieron que eliminar las estaciones de Tapachula (Chiapas), Celaya (Guanajuato), Toluca (Edo. de México), Hermosillo (Sonora) y Fresnillo (Zacatecas), por conducir a valores que fluctuaron de 0.725 a 0.923.

En las primeras ocho columnas de la tabla 4 se presentan las características generales y estadísticas de los 45 pluviómetros procesados, en el resto de las columnas se presentan los resultados del procedimiento propuesto, es decir, los parámetros de la fórmula de Chen (ecuación 1). Para mostrar en la tabla 4 los valores característicos de la precipitación máxima diaria (PMD) y sus predicciones extremas, se eliminó la presentación de las curvas IDF en cada localidad, a través del parámetro α_{T_r} , el cual toma un valor para cada uno de los cinco periodos de retorno procesados. Por ejemplo, para la estación Aguascalientes sus valores son:

$$\alpha_5 = 1,091.593, \quad \alpha_{10} = 1,228.012, \quad \alpha_{25} = 1,408.347, \\ \alpha_{50} = 1,544.766 \text{ y } \alpha_{100} = 1,681.185.$$

Por otra parte, en las figuras 1 y 2 se presentan las curvas IDF de las estaciones Acapulco y Tacubaya, por presentar éstas condiciones disímiles en cuanto a forma y magnitud, según se observa en sus parámetros R y P_1^{10} . La similitud numérica entre las intensidades de la figura 2 y las obtenidas por Cervantes *et al.* (2004), al procesar el registro de 74 años (1930–2003) del observatorio de Tacubaya, es bastante aproximada.

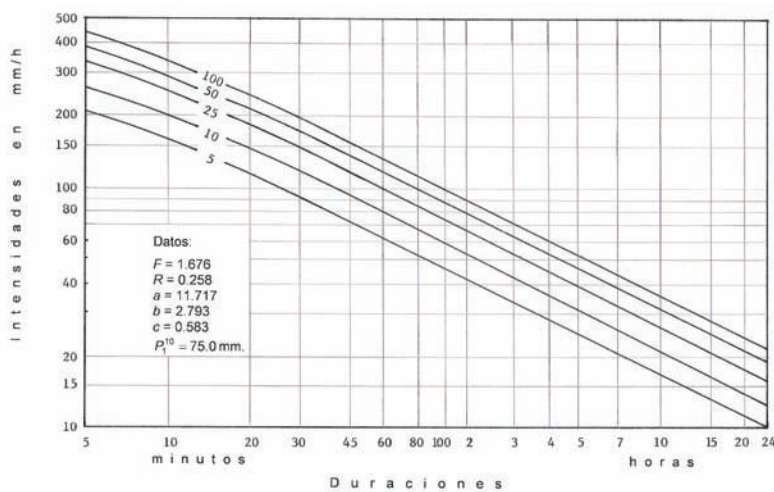


Figura 1. Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia estimadas con la fórmula de Chen en la estación pluviométrica Acapulco, Gro

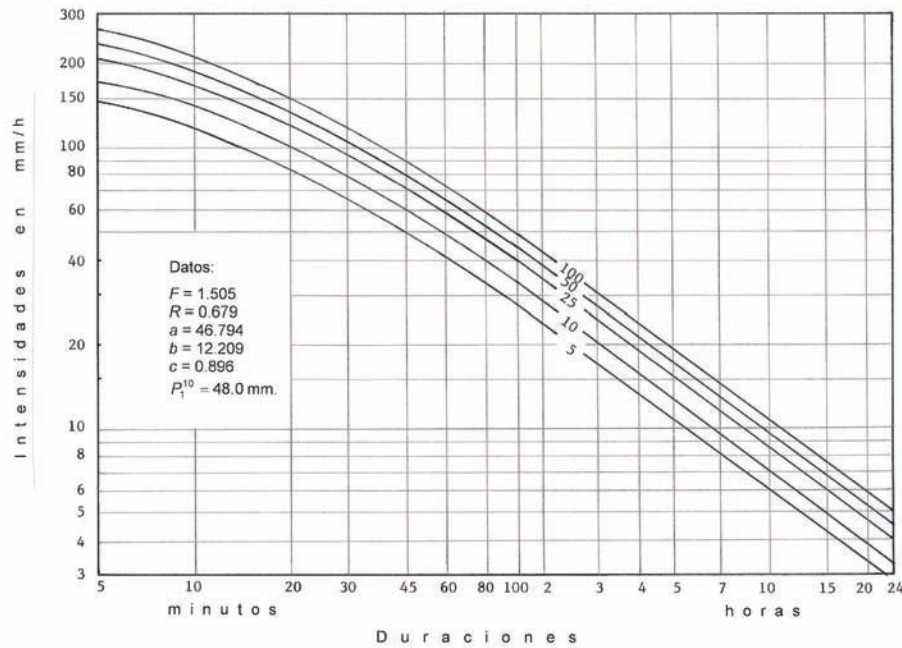


Figura 2. Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia estimadas con la fórmula de Chen en la estación pluviométrica Tacubaya, DF

Conclusiones

El procedimiento utilizado emplea la información de isoyetas de intensidades, disponible en la República Mexicana (SCT, 1990), haciendo uso de los registros pluviométricos para estimar las predicciones necesarias de precipitación máxima en 24 horas. Por lo tanto, puede ser aplicado en cualquier sitio o localidad de la República Mexicana que cuente con una estación pluviométrica, la cual permita obtener con cierta confiabilidad los valores citados.

Aunque los periodos de registro de la información pluviográfica y pluviométrica utilizada en el contraste (tabla 1), no son simultáneos, sus resultados son bastante aproximados, con diferencias por defecto no superiores al 30 % entre las intensidades observadas y las estimadas, medidas a través del error relativo. Las diferencias máximas por exceso se presentan en las duraciones menores y tiene un error relativo máximo del orden del 60% (tabla 2).

Los resultados numéricos concentrados en la tabla 2, destacan la aproximación del procedimiento empleado para estimar curvas IDF. Conviene destacar que las 10 estaciones pluviográficas utilizadas en el contraste, están localizadas en condiciones geográficas muy diferentes y abarcan desde los climas cálidos hasta los desérticos, pasando por los templados y los semiáridos.

Una contribución práctica importante de este trabajo la constituye la presentación condensada de las curvas IDF en 45 ciudades importantes de la República Mexicana, según resultados expuestos en la tabla 4.

Tomando en cuenta que el procedimiento propuesto es únicamente una aproximación, cuyo error por defecto o exceso es aún significativo, se recomienda continuar con su contraste, principalmente utilizando información pluviográfica actualizada.

Además, se sugiere verificar sus resultados con la información histórica disponible sobre tormentas máximas ocurridas en la zona, antes de proceder a su aplicación en los diseños hidrológicos urbanos.

Agradecimientos

Al M. en I. Juan Antonio Araiza Rodríguez (jarai@uaslp.mx), profesor del Área de Computación Aplicada de la Facultad de Ingeniería de la UASLP, se agradece el haber proporcionado la información pluviométrica procesada de precipitación máxima diaria anual.

A los tres revisores anónimos de este trabajo se agradecen sus observaciones críticas y recomendaciones, las cuales permitieron mejorar sustancialmente su descripción y alcances.

Tabla 4. Características generales, predicciones extremas y parámetros de la fórmula de Chen (a, b, c) estimados con el procedimiento propuesto en las 45 localidades indicadas de la República Mexicana

Núm.	Localidad o pluviómetro	Clave (ERIC II)	Periodo de registro (Número de años real)	PMD_{min}^{est} (mm)	PMD_{max}^{est} (mm)	PMD_{10}^{est} (mm)	PMD_{600}^{est} (mm)	R_{precip}	i_1^{10} (mm/h)	a	b	c
1	Aguascalientes (Ags.)	01030	1947-1998 (51)	20.0	91.3	69.1	94.6	0.500	38.0	32.316	10.590	0.833
2	Mexicali (B.C.N.)	02084	1948-1985 (32)	5.5	78.0	54.4	95.4	0.405	27.0	23.062	7.662	0.744
3	Tijuana (B.C.N.)	02068	1949-1984 (36)	16.1	80.0	52.6	81.7	0.441	37.0	26.526	8.864	0.780
4	La Paz (B.C.S.)	03074	1961-1997 (37)	13.0	137.0	75.3	193.1	0.350	37.0	18.174	5.781	0.686
5	San José del Cabo (B.C.S.)	03056	1933-1997 (60)	2.1	316.0	143.8	371.5	0.232	48.0	10.312	1.983	0.550
6	Campeche (Cam.)	04038	1954-1997 (38)	32.0	254.3	125.6	245.4	0.455	70.0	27.912	9.313	0.793
7	Saltillo (Coa.)	05048	1947-1998 (43)	16.5	160.0	64.2	135.1	0.495	41.0	31.809	10.457	0.828
8	Monclova (Coa.)	05047	1951-1985 (22)	22.7	119.0	95.2	170.9	0.401	46.0	22.668	7.519	0.739
9	Colima (Col.)	06040	1951-1997 (37)	33.4	255.0	129.6	246.4	0.432	72.0	25.655	8.572	0.771
10	Manzanillo (Col.)	06036	1969-1997 (22)	44.0	273.0	160.5	438.5	0.323	68.0	16.056	4.886	0.657
11	Tuxtla Gutiérrez (Chia.)	07202	1951-1997 (46)	24.5	148.1	89.4	133.9	0.634	65.0	42.834	11.804	0.884
12	Chihuahua (Chih.)	08109	1965-1987 (21)	27.5	89.0	78.9	99.7	0.396	31.0	22.157	7.331	0.734
13	Tacubaya (D.F.)	09039	1954-1987 (34)	27.2	79.1	62.4	93.9	0.679	48.0	46.794	12.209	0.896
14	Durango (Dgo.)	10017-092	1941-1998 (37)	24.5	108.5	96.8	122.6	0.370	38.0	19.814	6.438	0.707
15	Guajuato (Gto.)	11094	1969-1997 (25)	36.0	97.0	88.6	126.1	0.350	33.0	18.169	5.779	0.686
16	Irapuato (Gto.)	11028	1922-1998 (70)	12.5	137.8	76.7	103.8	0.557	46.0	37.308	11.571	0.867
17	León (Gto.)	11095	1947-1997 (45)	26.5	97.8	74.1	101.9	0.651	52.0	44.310	11.957	0.889
18	Chilpancingo (Gro.)	12134	1954-1997 (36)	36.5	212.5	122.4	275.3	0.232	40.0	10.330	1.994	0.551
19	Acapulco (Gro.)	12142	1972-1998 (27)	55.0	360.0	248.5	416.6	0.258	75.0	11.717	2.793	0.583
20	Pachuca (Hgo.)	13056	1972-1988 (17)	14.1	114.0	63.2	144.2	0.468	35.0	29.159	9.700	0.805
21	Guadalajara (Jal.)	14066	1961-1991 (27)	35.2	114.8	91.2	123.4	0.637	64.0	43.093	11.831	0.885
22	Lagos de Moreno (Jal.)	14084	1961-1991 (28)	28.2	91.0	69.0	101.5	0.502	39.0	32.462	10.627	0.834
23	Morelia (Mich.)	16081	1947-1986 (35)	21.2	85.3	61.7	88.4	0.485	31.0	25.987	8.668	0.774
24	Cuernavaca (Mor.)	17004	1955-1998 (42)	46.0	129.0	92.4	159.2	0.562	63.0	37.673	11.605	0.868
25	Tepec (Nay.)	18038	1950-1990 (37)	38.0	146.5	116.3	158.0	0.555	68.0	37.149	11.553	0.866
26	Monterrey (N.L.)	19049	1929-1986 (46)	27.0	180.0	132.4	205.2	0.390	58.0	21.653	7.143	0.728
27	Linares (N.L.)	19085	1948-1986 (39)	42.5	190.0	141.4	212.3	0.565	88.0	37.842	11.618	0.869
28	Oaxaca (Oax.)	20079	1953-1998 (34)	35.7	91.3	79.8	101.4	0.516	44.0	33.848	10.963	0.845
29	Puebla (Pue.)	21035	1953-1997 (45)	39.4	87.6	72.5	94.1	0.653	51.0	44.485	11.975	0.889
30	Querétaro (Qro.)	22006	1961-1995 (31)	29.3	84.0	71.3	92.7	0.372	31.0	19.997	6.509	0.709
31	San Juan del Río (Qro.)	22015	1922-1974 (26)	33.2	86.5	69.8	106.2	0.691	54.0	47.887	12.323	0.898
32	Chetumal (Q.R.)	23032	1952-1995 (39)	55.9	360.0	204.0	524.2	0.290	77.0	13.666	3.789	0.620
33	San Luis Potosí (S.L.P.)	24069	1950-1997 (48)	20.6	66.5	59.8	79.0	0.659	42.0	45.012	12.029	0.891
34	Matheuala (S.L.P.)	24040	1925-1997 (68)	17.5	122.0	83.6	139.2	0.448	44.0	27.198	9.084	0.786
35	Río Verde (S.L.P.)	24114	1961-1997 (37)	27.0	117.5	87.9	138.2	0.605	60.0	40.348	11.521	0.874
36	Culiacán (Sin.)	25015	1961-1997 (35)	47.0	175.1	131.1	211.0	0.501	80.0	32.403	10.612	0.883
37	Guasave (Sin.)	25038	1969-1996 (23)	34.0	229.8	142.3	255.1	0.382	72.0	20.888	6.854	0.719
38	Los Mochis (Sin.)	25116	1961-1985 (23)	20.0	133.3	115.6	188.1	0.505	76.0	32.758	10.702	0.836
39	Villahermosa (Tab.)	27054	1973-1985 (24)	63.9	340.0	196.6	400.1	0.313	81.0	15.303	4.552	0.646
40	Ciudad Victoria (Tam.)	28116	1962-1998 (34)	57.9	288.5	206.0	354.2	0.313	77.0	15.315	4.557	0.646
41	Nuevo Laredo (Tam.)	28065	1961-1988 (27)	35.0	227.0	150.4	276.2	0.381	64.0	20.861	6.843	0.719
42	Tlaxcala (Tlax.)	29030	1961-1990 (26)	26.6	74.0	64.4	81.3	0.653	42.0	44.485	11.975	0.889
43	Poza Rica (Ver.)	30132	1961-1996 (35)	41.2	278.7	176.5	286.2	0.337	70.0	17.107	5.337	0.672
44	Mérida (Yuc.)	31044	1961-1985 (25)	50.0	153.5	122.7	162.9	0.633	85.0	42.748	11.795	0.884
45	Zacatecas (Zac.)	32036	1961-1998 (35)	16.3	125.5	73.0	111.9	0.482	35.0	30.581	10.118	0.818

Simbología de la Tabla 4:

PMD_{min}	valor mínimo observado de la precipitación máxima diaria.
PMD_{max}	valor máximo observado de la precipitación máxima diaria.
PMD_{10}	precipitación máxima diaria de periodo de retorno 10 años.
PMD_{100}	precipitación máxima diaria de periodo de retorno 100 años.
R_{prom}	cociente lluvia–duración promedio.
i_1^{10}	intensidad de duración una hora y periodo de retorno 10 años.

Referencias

- Araiza–Rodríguez J.A. y Campos–Aranda D.F. Evaluación de los cocientes lluvia duración (R) y lluvia–frecuencia (F) en 341 sitios de la República Mexicana. XVI Congreso Nacional de Hidráulica, Morelia, Michoacán, 2000, pp. 743–748.
- Campos–Aranda D.F. Hidrosistemas Urbanos. Conceptos básicos, crecientes y planicies de inundación. *Ciencia y Desarrollo*, (145):49–57. 1999.
- Campos–Aranda D.F. Contraste de cinco métodos de ajuste de la distribución GVE en 31 registros históricos de eventos máximos anuales. *Ingeniería Hidráulica en México*, XVI(2):77–92. 2001.
- Campos–Aranda D.F. *Estimación y Aprovechamiento del Escurrimiento*. Anexo 6: Aspectos de seguridad hidrológica en embalses. Edición del autor. San Luis Potosí, S.L.P. 2007. Pp. 411–429.
- Campos–Aranda D.F. Calibración del método racional en ocho cuencas rurales menores de 1,650 km² de la Región Hidrológica No. 10 (Sinaloa), México. *Agrociencia*, 42(6):615–627. 2008.
- Campos–Campos E., Quiroga L.A. y Hernández–Vargas J. Contraste y análisis espacial de parámetros de un modelo intensidad–duración–frecuencia. *Ingeniería Hidráulica en México*, XXII(3):149–154, 2007.
- Cervantes–Sánchez O. y Landeros–Ortiz J.J. Curvas intensidad–duración–periodo de retorno de las tormentas máximas registradas en Tacubaya, DF. XVIII Congreso Nacional de Hidráulica, San Luis Potosí, SLP, 2004, pp. 479–486.
- Chander S., Spolia S.K., Kumar A. Flood Frequency Analysis by Power Transformation. *Journal of the Hydraulics Division*, 104(HY11):1495–1504, 1978.
- Chen C–I. Rainfall Intensity–Duration–Frequency formulas *Journal of the Hydraulics Engineering*, 109(12):1603–1621, 1983.
- Chin D.A. *Water–Resources Engineering*. Chapter 5: Surface–Water Hydrology. New Jersey, USA. Pearson Prentice Hall. 2006. Pp. 334–606.
- ERIC II: Extractor Rápido de *Información Climatológica 1920–1998*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua SEMARNAT–CNA. Jiutepec, Morelos. 2000.
- ERIC II: Extractor Rápido de *Información Climatológica 1920–1998*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua SEMARNAT–CNA. Jiutepec, Morelos. 2000.
- García E. *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. Instituto de Geografía de la UNAM. Ciudad Universitaria, México, DF. 3ª. Edición. 1981. 252 páginas. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA).
- Genovez A.M. y Fugagnolli R. de C.. Análisis y evaluación de las ecuaciones de lluvias intensas generalizadas. *Ingeniería Hidráulica en México*, XVI(3):15–23, 2001.
- Kite G.W. *Frequency and Risk Analyses in Hydrology*. Chapter 12: Comparison of frequency distributions. Colorado, USA. Water Resources Publications. Fort Collins. 1977. Pp. 156–168.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT). Isoyetas de Intensidad–Duración Frecuencia. República Mexicana. Subsecretaría de Infraestructura. México, DF. 1990. 495 p.
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). *Boletín Climatológico No. 3*. Región Hidrológica No. 37. El Salado, Subsecretaría de Planeación. México, DF. 1980a.
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). *Boletín Climatológico No. 4*. Región Hidrológica No. 36. Nazas–Aguanaval, Subsecretaría de Planeación. México, DF. 1980b.
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). *Boletín Climatológico No. 5*. Región Hidrológica No. 26. Pánuco, Tomos I y II, Subsecretaría de Planeación. México, DF. 1982.
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). *Boletín Climatológico No. 6*. Regiones Hidrológicas No. 24 Oriente (Bajo Río Bravo) y No. 25 Golfo Norte (San Fernando–Soto La Marina), Subsecretaría de Planeación. México, DF. 1983.

Semblanza del autor

Daniel Francisco Campos-Aranda. Obtuvo el título de ingeniero civil en diciembre de 1972, en la entonces Escuela de Ingeniería de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP). Durante el primer semestre de 1977, realizó en Madrid, España un diplomado en hidrología general y aplicada. Posteriormente, durante 1980–1981 llevó a cabo estudios de maestría en ingeniería con la especialidad de hidráulica en la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la UNAM. En la misma institución, inició (1984) y concluyó (1987) el doctorado en ingeniería con especialidad en aprovechamientos hidráulicos. Ha publicado artículos principalmente en revistas mexicanas de excelencia: 33 en *Ingeniería Hidráulica en México*, 10 en *Agrociencia* y 4 en *Ingeniería. Investigación y Tecnología*. Fue investigador nacional (nivel I: expediente 7273) del 1° de julio de 1991 hasta el 31 de diciembre del 2007. Actualmente es profesor jubilado de la UASLP, desde el 1° de febrero del 2003. En 2008 la AMH le otorgó el Premio Nacional "Francisco Torres H", a la práctica profesional de la hidráulica.

Contaminación armónica producida por cargas no lineales de baja potencia: modelo matemático y casos prácticos

Harmonic Pollution Produced by Low Power Nonlinear Loads: Mathematical Model and Practical Cases

Mora-Barajas M.A.

*Departamento de Computación, Electrónica, y Mecatrónica.
Escuela de Ingeniería.
Universidad de las Américas Puebla.
E-mail: marco.morabs@udlap.mx*

Bañuelos-Sánchez P.

*Departamento de Computación, Electrónica, y Mecatrónica.
Escuela de Ingeniería.
Universidad de las Américas Puebla.
E-mail: pedro.banuelos@udlap.mx*

(Recibido: septiembre de 2006; reevaluado: enero de 2009; aceptado octubre de 2009)

Resumen

Muchos de los aparatos eléctricos que tenemos en casa como televisores, videograbadoras y computadoras, generan armónicos de voltaje y de corriente que incrementan las pérdidas de potencia y contaminan las líneas de suministro eléctrico, pudiendo ocasionar severos daños tanto a las redes de energía como a los equipos que de ellas se alimentan. En este artículo se muestra un análisis matemático del contenido armónico en la corriente de un circuito que representa a una carga residencial no lineal. Además, a partir de mediciones eléctricas realizadas de manera experimental, se presenta un estudio comparativo de la contaminación armónica que este tipo de cargas introduce a las líneas de suministro eléctrico.

Descriptores: factor de potencia, pérdidas de potencia, cargas no lineales, distorsión armónica, calidad de la energía eléctrica.

Abstract

Many household electrical appliances like televisions, video recorders and computers are sources of voltage and current harmonics, which increase power losses and contaminate the AC power line. These harmonics can cause serious problems in both, utilities and electrical equipments connected to the same AC line. This paper shows a mathematical analysis of harmonics content on the electrical current for a circuit representing a non linear residential load. A comparative harmonic distortion study produced by the residential loads on the electrical power lines, measured experimentally, is also shown.

Keywords: Power factor, power losses, non-linear loads, low power, harmonic distortion, electrical energy quality.

Introducción

En los últimos años se ha incrementado la preocupación por un mejor aprovechamiento de la energía eléctrica, tanto por parte de los productores como de los usuarios. Si bien, los avances en áreas como la electrónica de potencia han permitido aumentar la eficiencia de los equipos eléctricos, éstos representan cargas no lineales que pueden deteriorar la calidad de la energía entregada por las compañías generadoras de electricidad. A pesar de que también distorsionan la onda fundamental de voltaje de 60Hz, la principal característica por la cual se les denomina cargas no lineales, es la gran distorsión que producen sobre la corriente que le demandan a la línea de alimentación alterna, debido a la generación inherente de armónicos. En este sentido, las cargas resistivas, inductivas y capacitivas se consideran cargas lineales, ya que demandan una corriente prácticamente sinusoidal (Abad, 1998).

Un armónico, según la norma IEEE-519, está definido como el contenido de la señal, cuya frecuencia es un múltiplo entero de la frecuencia de repetición base o frecuencia fundamental (Hibbard, 1995). Su presencia puede ocasionar una gran variedad de problemas, tanto al suministro eléctrico como a los usuarios; por ejemplo: calentamiento excesivo de los transformadores y de cables conductores (principalmente del neutro), mal funcionamiento de las plantas eléctricas así como en sistemas circundantes a los que producen la contaminación armónica, resonancias, interferencia electromagnética con equipos de comunicación, etc. (Brugnoni, 2003; Jiménez *et al.*, 2005; Eguíluz *et al.*, 2001).

A través de normas y estándares como la mencionada IEEE-519, se han marcado tolerancias permisibles para los niveles de contaminación armónica producida por cargas no lineales, a fin de mantener la calidad en la energía eléctrica. En la norma internacional IEC 1000-3-2, por ejemplo, se establecen los límites para los armónicos de

corriente en aquellos aparatos que consumen menos de 16A por fase. En este trabajo, se presenta un estudio de la contaminación armónica producida por diversas cargas residenciales, que caen precisamente dentro de esta categoría de la norma IEC 1000-3-2.

En la siguiente sección, se realiza el análisis de un circuito eléctrico empleado para modelar una carga residencial no lineal y se muestran los resultados obtenidos en simulación del contenido armónico en la corriente que se suministra al circuito. Posteriormente, se presenta un estudio de la contaminación armónica producida por diversas cargas residenciales, medida experimentalmente conforme lo establece la norma internacional (IEC 1000-3-2). Finalmente, en la última sección se dan las conclusiones.

Un modelo de carga no lineal de baja potencia

Muchos de los aparatos que tenemos en casa como televisores, consolas de video juegos, videograbadoras, y computadoras producen distorsión, tanto al voltaje como a la corriente del suministro eléctrico, pues poseen fuentes de alimentación que utilizan rectificadores de onda completa para la conversión de corriente alterna (CA) a corriente directa (Suárez *et al.*, 2005).

De manera general, es posible representar una carga residencial no lineal a través del circuito mostrado en la figura 1. R_s y L_s representan la impedancia de la línea de CA, o bien, dado que algunos aparatos emplean un transformador para reducir el voltaje de la línea, R_s y L_s podrían ser parámetros de dicho transformador. L_o y C constituyen el filtro para obtener un voltaje y una corriente continuos (Arrillaga *et al.*, 1985), y R_o representa al elemento que consume la potencia entregada a la carga no lineal. v_s representa la línea de alimentación alterna para uso residencial ($v_s = \sqrt{2} V_{rms} \sin(\omega t)$; donde V_{rms} es el voltaje eficaz y $\omega = 2\pi f$, siendo f la frecuencia de la línea).

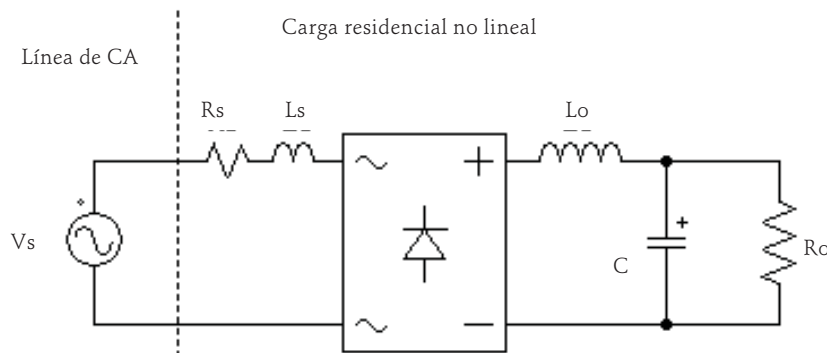


Figura 1. Modelo de una carga residencial, cuya fuente utiliza un puente rectificador

Considerando como ideales los componentes del circuito, durante el semiciclo positivo del voltaje de entrada, v_s , conducirán un par de diodos del puente rectificador, el segundo par de diodos entrará en conducción durante el semiciclo negativo. Este comportamiento del puente rectificador, permite representar el circuito de la figura 1 como se muestra en la figura 2, mientras exista un par de diodos conduciendo. Dado que L_s queda en serie con L_o , podemos considerar un inductor equivalente, de valor $L = L_s + L_o$.

Aplicando las leyes de Kirchhoff es posible obtener que:

$$v_o = v_s - R_s i_s - L \frac{di_s}{dt} \quad (1)$$

$$i_s = C \frac{dv_o}{dt} + \frac{1}{R_o} v_o \quad (2)$$

Sustituyendo (1) en (2), se tiene que:

$$\frac{di_s^2}{dt^2} + 2\alpha \frac{di_s}{dt} + \omega_n^2 i_s = \frac{1}{L} \left(\frac{dv_s}{dt} + \frac{1}{R_o C} v_s \right) \quad (3)$$

siendo

$$\alpha = \frac{1}{2} \left(\frac{R_s}{L} + \frac{1}{R_o C} \right); \quad \omega_n = \sqrt{\frac{R_s + R_o}{R_o LC}} \quad (4)$$

La solución completa de la ecuación (3) tiene dos partes, una componente natural y una forzada. La respuesta forzada está dada por:

$$i_f(t) = \frac{V_m}{Z_i} \text{sen}(\omega t - \theta_i) \quad (5)$$

donde,

$$Z_i = \frac{z}{\sqrt{1 + (\omega R_o C)^2}} \quad (6a)$$

$$z = \left\{ \left[R_s + R_o (1 - \omega^2 LC) \right]^2 + \left[\omega (R_s R_o C + L) \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (6b)$$

$$\theta_i = \theta_v - \tan^{-1}(\omega R_o C) \quad (6c)$$

$$\theta_v = \tan^{-1} \left(\frac{\omega (R_s R_o C + L)}{R_s + R_o (1 - \omega^2 LC)} \right) \quad (6d)$$

La respuesta natural de i_s tendrá un par de polos complejos conjugados, es decir, $i_n(t)$ es de la forma:

$$i_n(t) = e^{-\alpha(t-t_\beta)} \{ A_1 \cos[\omega_a(t-t_\beta)] + A_2 \text{sen}[\omega_a(t-t_\beta)] \} \quad (7)$$

con,

$$\omega_a = \sqrt{\omega_n^2 - \alpha^2} \quad (8)$$

t_β es el instante donde los diodos comienzan a conducir y se determinará posteriormente. Los coeficientes A_1 y A_2 están dados por:

$$A_1 = -V_a \text{sen}(\omega t_\beta - \theta_i) \quad (9a)$$

$$A_2 = \frac{1}{\omega_a} [A_1 \alpha - V_a \omega \cos(\omega t_\beta - \theta_i)] \quad (9b)$$

siendo $V_a = V_m / Z_i$. Así, mientras conducen los diodos, la corriente que suministra la fuente es:

$$i_s(t) = i_f(t) + i_n(t) \quad (10)$$

con $i_f(t)$ e $i_n(t)$ dadas en (5) y (7), respectivamente.

De manera análoga, durante la conducción de los diodos del puente rectificador, el voltaje en R_o será:

$$v_o(t) = v_f(t) + v_n(t) \quad (11)$$

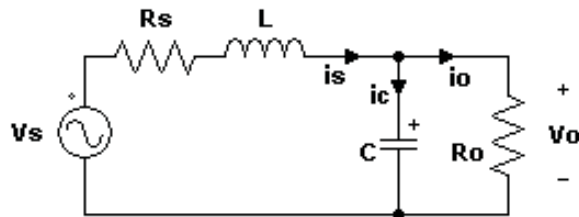


Figura 2. Circuito equivalente cuando los diodos conducen ($L = L_s + L_o$)

donde, las respuestas forzada y natural son:

$$v_f(t) = \frac{R_o}{z} V_m \text{sen}(\omega t - \theta_v) \quad (12a)$$

$$v_n(t) = e^{-\alpha(t-t_\beta)} \{B_1 \cos[\omega_a(t-t_\beta)] + B_2 \text{sen}[\omega_a(t-t_\beta)]\} \quad (12b)$$

Los coeficientes B_1 y B_2 están dados por:

$$B_1 = -A_1(R_s - \alpha L) - A_2 \omega_a L \quad (13a)$$

$$B_2 = A_1 \omega_a L - A_2(R_s - \alpha L) \quad (13b)$$

Cuando los diodos salen de conducción, la etapa de entrada del circuito de la figura 1 se desconecta, el capacitor se descarga a través de R_o y el voltaje de salida decrece en forma exponencial según la constante de tiempo $R_o C$, hasta que comienza a conducir el segundo par de diodos del rectificador, en el semiciclo negativo del voltaje de entrada (Hart, 2001; Mohan *et al.*, 2003). Así, mientras los diodos no conducen, el voltaje en R_o es:

$$v_o(t) = v_{o\delta} e^{-(t-t_\delta)/\omega R_o C} \quad (14)$$

t_δ es el instante en que se extingue la corriente de entrada y, $v_{o\delta}$ es el valor del voltaje de salida en dicho instante; es decir,

$$v_{o\delta} = v_f(t_\delta) + v_n(t_\delta) \quad (15)$$

Por lo tanto, la ecuación (11) es válida en el intervalo $[t_\beta, t_\delta]$, mientras que (14) funge para $[t_\delta, t_\beta + T/2]$, donde $T = 2\pi/\omega$.

Finalmente, puesto que en el instante $t = t_\delta$ la corriente del suministro se hace cero, y tomando en cuenta que después de $t = t_\beta + T/2$ el valor del voltaje rectificado (a la salida de puente de diodos) supera al voltaje v_o (que decae exponencialmente), t_β y t_δ se pueden determinar al resolver el siguiente sistema de ecuaciones:

$$v_{o\delta} e^{-[(t_\beta + T/2) - t_\delta]/\omega R_o C} - |V_m \text{sen}(\omega(t_\beta + T/2))| = 0 \quad (16)$$

$$i_f(t_\delta) + i_n(t_\delta) = 0 \quad (17)$$

Simulación del comportamiento de la carga no lineal

Para llevar a cabo la simulación del circuito de la figura 1, se ha considerado la impedancia en una línea de

alimentación residencial de 120V para obtener los valores de R_s y L_s (McInnis, 1997). A fin de conseguir un rizado pequeño en el voltaje y en la corriente de salida del rectificador, se han seleccionado valores apropiados para L_o y C . Por último, R_o se ha elegido en función de un determinado consumo de potencia. Así, se obtuvo en MATLAB la descomposición por serie de Fourier para $i_s(t)$ a partir de la expresión dada en (10) - tomando en cuenta también el semiciclo negativo del voltaje de entrada - con los siguientes componentes del circuito de la figura 1:

$$R_s = 0.2\Omega, \quad L_o = 1\text{mH}, \quad R_o = 160\Omega,$$

$$C = 560 \mu\text{F}, \quad L_s = 160\mu\text{H},$$

$$V_{rms} = 120\text{V}, \quad f = 60\text{Hz}$$

La suma de los primeros 30 componentes armónicos de la serie de Fourier resultante se muestra en la figura 3. En ella se observa que la corriente de entrada deja de ser senoidal ante una carga no lineal y muestra en este caso un comportamiento pulsante. Evidentemente, esta señal genera armónicos que se propagan a través de las líneas de suministro eléctrico, provocando problemas como calentamiento en los cables de alimentación, interferencia electromagnética, mayores demandas de potencia reactiva, etc.

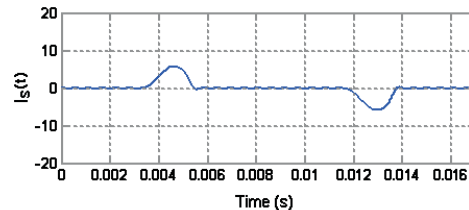


Figura 3. Aproximación de $i_s(t)$, por serie de Fourier

En la figura 4, se muestra la descomposición espectral, obtenida en MATLAB para la corriente suministrada a la carga no lineal. Como puede observarse, los armónicos de $i_s(t)$ son impares y la magnitud de los primeros es considerable en comparación con la frecuencia fundamental de 60Hz (el tercer armónico, por ejemplo, es apenas un 10% más pequeño).

La figura 5 muestra las formas de onda del voltaje rectificado y filtrado, v_o , y de la corriente de suministro, i_s , obtenidas a través del simulador PSIM, considerando los mismos valores de los componentes dados arriba. La señal $|v_s|$, representa el valor absoluto del voltaje de entrada, v_s .

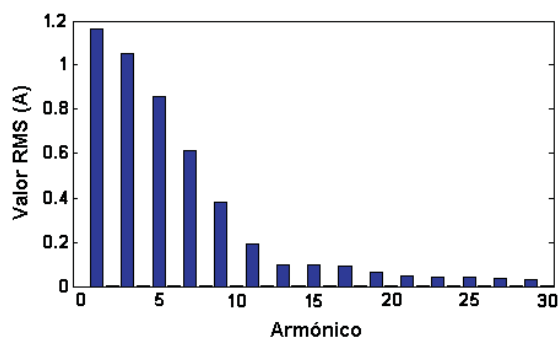
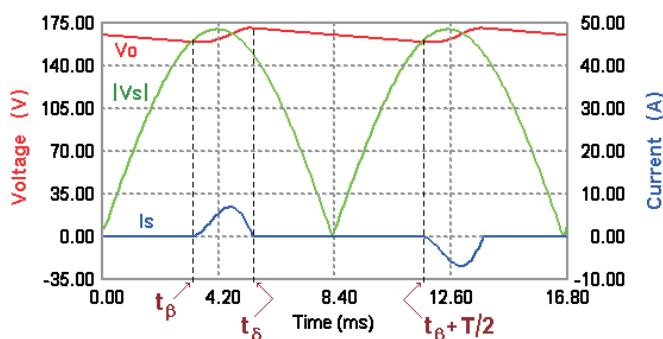
Figura 4. Descomposición espectral de $i_s(t)$ 

Figura 5. Voltaje en la carga y corriente de suministro en el circuito de la figura 1

Armónicos medidos en cargas residenciales

Se realizó la medición de los armónicos de una variedad de cargas residenciales de diferentes marcas, modelos y tecnologías, todas ellas con una antigüedad menor a cinco años. Dichas mediciones, se realizaron conforme lo establece la norma IEC 1000-3-2 (referente a los límites permisibles para armónicos de corriente en aquellos aparatos que consumen menos de 16A por fase), utilizando el analizador de armónicos Fluke 41. En los resultados que a continuación se presentan, se muestra el efecto de más de una carga conectada, aún cuando se hicieron también las mediciones individuales para la mayoría de los aparatos, pues el efecto de la contaminación armónica en las líneas de alimentación alterna se hace importante no por una carga individual, sino por la combinación simultánea de varias de ellas.

La figura 6 muestra la corriente de alimentación medida al estar encendidos simultáneamente 4 televisores a color, de 14", 20", 20" y 21". Su forma de onda es muy similar a la mostrada en la figura 3. En las tablas de la figura 6 se puede observar, por ejemplo, que la magnitud RMS del tercer armónico es de 1.23A. Tomando en cuenta que la corriente total RMS suministrada es de

2.26A, la amplitud de este armónico es tan grande como un 54.68% de la corriente RMS total. La distorsión armónica total (THD) es del 70.38% en la corriente y 1.81% en el voltaje. El factor de potencia $PF=0.7$, tienen en conjunto un consumo de potencia de 200W. Si la corriente fuese una senoidal pura tendría un $THD=0$ y si estuviese en fase con el voltaje de línea, su factor de potencia debería ser unitario ($PF=1$). Un $PF<1$ incrementa los requerimientos de potencia reactiva del equipo, elevando los costos tanto para el consumidor como para el proveedor del servicio (Chen, 1990).

Al conectar un televisor junto con un reproductor de DVD o una videograbadora, se modifican ligeramente las intensidades de los armónicos, pero la corriente conserva una forma de onda similar a la que se presenta en la figura 6.

Los equipos modulares o mini-componentes, al igual que los televisores y demás equipos ya mencionados, cuentan con un rectificador de entrada; sin embargo, en la forma de onda de la corriente de varios mini-componentes se encontró un menor contenido armónico, en comparación con la figura 6, la fundamental tiene mayor amplitud, y por tanto, los armónicos son de menor intensidad.

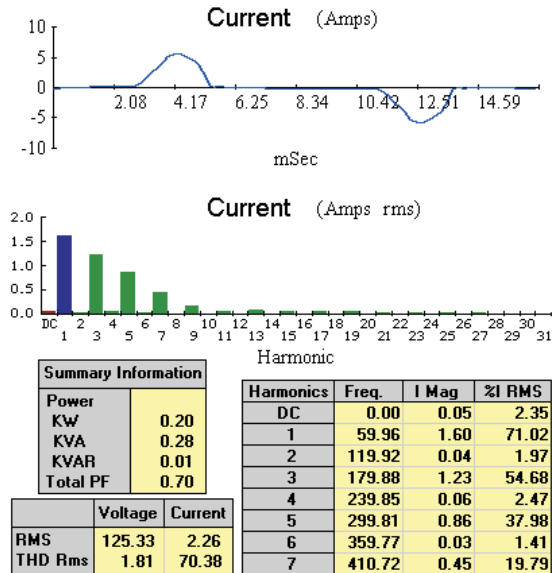


Figura 6. Corriente consumida por 4 televisores operando simultáneamente

La figura 7 muestra las características en la corriente que demanda una computadora personal (PC), que cuenta con un monitor LCD de 17", conectada directamente a la línea alterna. La forma de onda es pulsante, al igual que en el caso de los televisores. De acuerdo con la adaptación que la Asociación Canadiense para la Estandarización, CSA, realizó a la norma IEC 1000-3-2, para el caso de las líneas de 120Vrms/60Hz (McInnis, 1997), el valor máximo para el tercer armónico de la corriente en un aparato que consume menos de 600W,

debe ser de 5.54mA/W. Tomando en cuenta que esta PC consume 100W, el tercer armónico debería ser menor a 0.554A; sin embargo, de acuerdo con las mediciones mostradas en las tablas de la figura 7, el valor rms de este armónico es de 0.71A. Los armónicos 5 y 7, cuyos valores respectivos son 0.51 y 0.3A (según los datos de la figura 7), respectivamente, deberían ser menores a 3.51 y 1.95mA/W (lo que resulta en 0.351 y 0.195A) de acuerdo con la CSA.

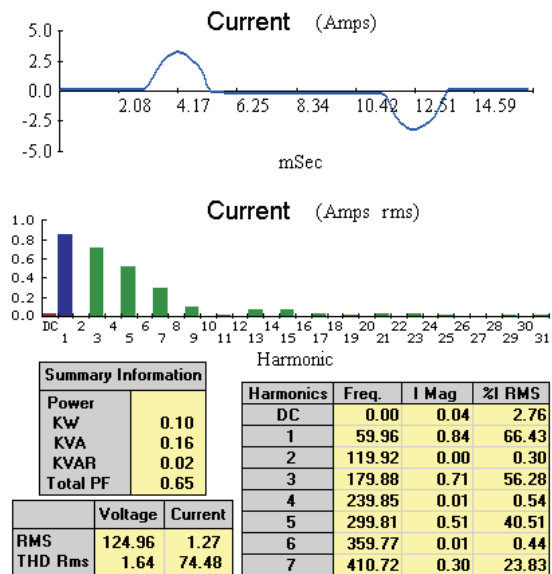


Figura 7. Corriente demandada por una PC

Resultados similares a los mostrados en la figura 7 se obtuvieron con computadoras personales conectadas a la línea, a través de fuentes reguladoras de voltaje, tanto con monitores de CRT como de LCD.

Uno más de los elementos considerados en este trabajo, son las lámparas fluorescentes. Estas lámparas dan mayor luminosidad con un menor consumo de potencia eléctrica, pero tienen un aporte importante en la contaminación armónica. En la figura 8 se muestra la corriente que demandan al estar encendidas simultáneamente tres lámparas fluorescentes de balastro electrónico, del mismo modelo y marca, cuya especificación individual de consumo de potencia es de 20W.

La forma de onda de la corriente es completamente diferente al resto de los equipos ya mencionados y tiene una nueva característica, la aparición del segundo armónico, que en la medición individual de algunas lámparas llega a tener una magnitud similar a la de sus armónicos 5 o 7.

Las lámparas fluorescentes que cuentan con un balastro electromagnético, tienen un muy bajo factor de potencia, pero su contenido armónico es mínimo, en comparación con las de balastro electrónico, ya que representan más bien una carga del tipo inductivo.

En las figuras 9 y 10 se muestra el efecto combinado de varias cargas operando de manera simultánea en un hogar. La figura 9 corresponde a un televisor a color de 14" y un equipo modular estéreo de 60W de potencia especificada. En tanto que la figura 10 muestra la corriente que demandan conjuntamente un televisor a color de

20", una PC, tres lámparas fluorescentes (con una potencia nominal de 22W cada una) y un mini-componente, cuya potencia nominal máxima es de 190W. En ambos casos, los mini-componentes reproducían la música de un CD a un volumen moderado.

La distorsión armónica total en la corriente es del 37.01% en el caso de la figura 9, y del 55.54% en el caso de la figura 10. Como se aprecia en ambos casos, al conectar conjuntamente varias cargas combinadas se producen niveles de contaminación armónica más bajos que el que genera cada carga individualmente.

Esto es debido a que el ángulo de fase es diferente para un mismo armónico en cada carga y el contenido de armónicos resultante es la suma de las corrientes armónicas individuales.

Las cargas residenciales como refrigeradores y lavadoras que poseen algún tipo de motor, producen también contaminación armónica pero, puesto que la corriente que demandan sus motores es mucho mayor que la de sus partes electrónicas, su comportamiento es más bien relacionado al de una carga inductiva.

De manera similar ocurrió al medir cargas como las impresoras láser, que presentan un comportamiento de tipo resistivo cuando están imprimiendo.

Por otro lado, cabe resaltar que dentro de las mediciones realizadas, además de un bajo factor de potencia se encontró también que algunas cargas residenciales tienen una importante demanda de potencia reactiva; por ejemplo, las cargas combinadas del caso de la figura 10 tienen un consumo de potencia activa de 280W y

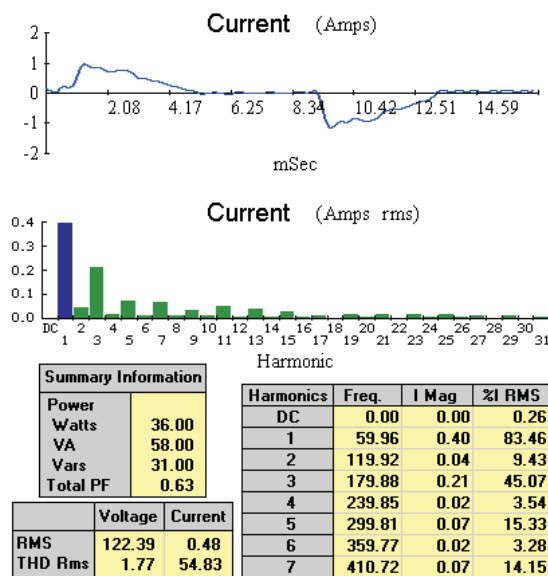


Figura 8. Corriente consumida por 3 lámparas fluorescentes con balastro electrónico

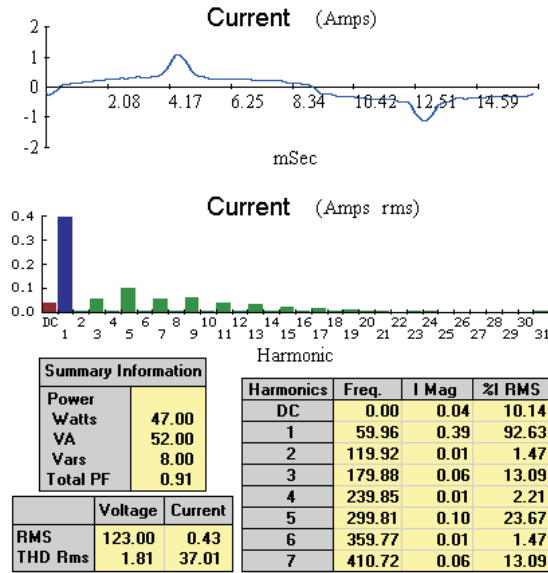


Figura 9. Corriente consumida por una TV de 14" (a color) junto con un mini-componente

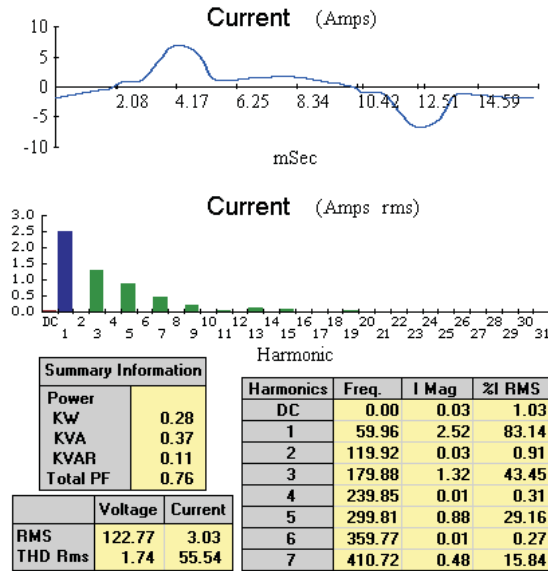


Figura 10. Corriente que demandan varias cargas residenciales, simultáneamente

demandan una potencia reactiva de 110VAR. Si bien, la potencia reactiva no es consumida por los equipos eléctricos, si es necesario suministrarla para que funcionen. Entre mayor sea la demanda de potencia reactiva, se requerirá una mayor generación de energía eléctrica y conductores de mayor calibre para su distribución, haciendo que los costos de producción, distribución y consumo sean más altos.

Es importante destacar que, de acuerdo con la información de las tablas en las figuras 6–10, la distorsión

armónica total en el voltaje del suministro eléctrico es menor al 2%, lo que significa que la forma de onda de la línea de CA es prácticamente senoidal, por lo que los armónicos medidos en la corriente de los diferentes equipos probados, son generados por los equipos mismos.

Finalmente, cabe mencionar que con el simple hecho de estar conectados (sin estar encendidos), los electrodomésticos consumen energía. Por ejemplo, las 4 televisiones del caso de la figura 6 consumen en conjunto 19W, en tanto que cada mini-componente consume

más de 15W, es como tener “una lámpara eternamente encendida”, que impacta directamente sobre la economía familiar y representa un gasto infructuoso de energía.

Conclusiones

Hasta hoy, la mayor parte de los esfuerzos por regular los límites de contaminación armónica se han llevado a cabo para las cargas industriales; sin embargo, el problema también existe en las líneas de distribución residencial, aunque quizás, aún no se ha medido el efecto perjudicial del fenómeno.

Muy a pesar de la existencia de normas que establecen límites para el contenido armónico en la corriente demandada por las cargas eléctricas, el estudio realizado en este trabajo demostró que los aparatos electrónicos más utilizados en los hogares, generan altos niveles de contaminación armónica sobre las líneas de distribución eléctrica.

Una gran preocupación de las compañías generadoras de electricidad (específicamente la CFE en México) sigue siendo reducir el consumo de energía en los hogares. Si las fuentes internas de los aparatos electrónicos se diseñan empleando convertidores que demanden corrientes de tipo senoidal, con un alto factor de potencia (algunas veces también llamados convertidores limpios), se lograría no solo reducir la contaminación armónica introducida hacia las líneas de suministro eléctrico, sino que también permitiría reducir el consumo de potencia, que se traduce en un beneficio, tanto para los productores de electricidad como para los usuarios.

Por último, es muy importante atender la recomendación de mantener desconectado todo electrodoméstico cuando no está siendo utilizado. Sin importar que estén apagados, la potencia que estos equipos consumen al estar conectados de ninguna manera puede considerarse una cantidad despreciable, pues representa un importante gasto energético infructuoso. Su impacto no solo es económico sino también ambiental, pues la mayoría de los procesos utilizados actualmente para generar energía eléctrica, contribuyen de manera importante a la contaminación del medio ambiente.

Referencias

- Abad-San Martín V., González de la Viuda J., Sagredo-González J. Influencia de cargas no lineales en transformadores de distribución. 8º Reunión Nacional de Grupos de Investigación en Ingeniería Eléctrica. Cádiz, Andalucía, España. Enero, 1998.
- Arrillaga J., Bradley D.A., Bodger P.S. *Power System Harmonics*. John Wiley & Sons. Norwich. U.K. 1985. Pp. 71–75.
- Brugnoni M. Los componentes armónicos de la demanda y sus efectos sobre las redes de distribución eléctricas [en línea]. 2003. Disponible en: www.fi.uba.ar/materias/6509/Art%EDculos%20Arm%F3nicos/Paper%20GEA%20Arm%F3nicos%20en%20redes.doc
- Chen K. *Industrial Power Distribution and Illuminating Systems*. Marcel Dekker, Inc. USA. 1990. Pp. 199-208.
- Eguíluz L., Lavandero J., Mañana M., Sánchez P. Eficiencia energética y calidad de suministro eléctrico. *Revista: ENERGÍA*. Madrid, Marzo, 2001.
- Hart D. *Electrónica de potencia*. Pearson Education. Madrid. 2001. Pp. 88-94.
- Hibbard J.F., Lowenstein M. *Meeting IEEE 519-1992 Harmonic limits*. Technical papers, Trans-coil, Inc. [en línea]. 1995. Disponible en: <http://www.transcoil.com/meetieee.pdf>
- IEC 1000-3-2. Límites para la emisión de corrientes armónicas en los aparatos que consumen menos de 16A por fase. 1995.
- Jiménez R., Cerero J. Perspectiva de calidad de la energía eléctrica y su importancia en México. Encuentro Nacional de Metrología Eléctrica, Querétaro, México, junio, 2005.
- Mohan N., Undeland T., Robbins W. *Power Electronics. Converters, applications and design*. John Wiley & Sons. Third edition. USA. 2003. Pp. 95-98.
- McInnis M. Low Voltage, Low Frequency Harmonic Emission Limits [en línea]. 1997. Disponible en: <http://grouper.ieee.org/groups/harmonic/single/docs/canada.doc>
- Suárez J., Mauro G., Anault D., Agüero C. Análisis de la distorsión armónica y los efectos de atenuación y diversidad en áreas residenciales. *Revista del IEEE América Latina*, 3(5):71–77, diciembre, 2005.

Semblanzas de los autores

Marco Antonio Mora-Barajas. Realizó su licenciatura en electrónica en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP). En 2008, concluyó sus estudios de maestría en ciencias con especialidad en ingeniería electrónica en la Universidad de las Américas Puebla. Su área de interés es la electrónica de potencia con especial atención en el diseño de correctores de factor de potencia monofásicos y trifásicos. Publicó un artículo en el Congreso Internacional en Electrónica, Comunicaciones y Computadoras (CONIELECOMP).

Pedro Bañuelos-Sánchez. Obtuvo su doctorado en ingeniería eléctrica con especialidad en electrónica de potencia por la Universidad Paris VI-Escuela Superior de Electricidad (SUPELEC) en Francia. Su área de especialidad se encuentra enfocada en el diseño y aplicación de convertidores estáticos de potencia, como los convertidores CD/CD, CD/CA y CA/CA. Fue investigador visitante en la Universidad Picardie Jules Verne, en Amiens Francia en 2003. También trabajó como investigador asociado por parte del CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique) en el Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble, en Grenoble Francia en 2006. Trabajó como instructor del curso Principios de Diseño en Ingeniería para Johns Hopkins University Center for Talented Youth en 2008. Ha participado como sinodal externo en tesis de doctorado en universidades del extranjero, tales como la Universidad Politécnica de Cataluña (marzo de 2007) y la Universidad Paris XI (septiembre de 2007); así también en universidades nacionales tales como el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) y el Instituto Politécnico Nacional (IPN). Actualmente trabaja en la Universidad de las Américas Puebla, donde ha sido galardonado con el premio a la docencia en 2003 y 2004. Ha sido revisor técnico en diversos congresos internacionales y nacionales, así como en revistas en el área de electrónica de potencia. También fue presidente del comité organizador del Congreso Internacional de Electrónica de Potencia (CIEP). Es miembro del IEEE Power Electronics Society y de la Sociedad Mexicana en Electrónica de Potencia (SOMEPE).

Metodología para el modelado del comportamiento mecánico de hueso esponjoso a partir de sus microestructuras

Mechanical Modelling of Cancellous Bone from their Microstructure

Ramírez-Díaz E.I.

*Unidad de Investigación y Asistencia Técnica en Materiales (UDIATEM).
Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
E-mail: edgarisaac10@yahoo.com.mx*

Ortiz-Prado A.

*Unidad de Investigación y Asistencia Técnica en Materiales (UDIATEM).
Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
E-mail: armandoo@unam.mx*

Schouwenaars-Franssens R.

*Unidad de Investigación y Asistencia Técnica en Materiales (UDIATEM).
Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
E-mail: raf_schouwenaars@yahoo.com*

Ruiz-Cervantes O.

*Unidad de Investigación y Asistencia Técnica en Materiales (UDIATEM).
Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
E-mail: ocervantes@hotmail.com*

(Recibido: octubre de 2007; reevaluado: abril de 2009; aceptado: septiembre de 2009)

Resumen

En este trabajo se establece una metodología para generar modelos bidimensionales de hueso esponjoso, que son analizados mediante paquetería de elemento finito. Los modelos están enfocados a representar la arquitectura trabecular mediante celdas de Voronoi, a partir de las coordenadas de los centros de los poros de la estructura ósea observados en imágenes generadas mediante microscopía óptica. Buscando similitud geométrica, se asignó un mayor espesor en la zona de unión de las trabéculas, ya que se ha comprobado que esta consideración lleva a resultados más aproximados a los experimentales. Para nutrir el modelo se realizaron pruebas de compresión a probetas de hueso trabecular, tomando los valores de deformación máxima y esfuerzo máximo para determinar la rigidez del tejido. Mediante el análisis de imágenes de probetas deformadas, se estableció que el momento del colapso de la estructura trabecular se da por la sucesión de fallas en las trabéculas individuales y se determinó un valor crítico de aproximadamente un 36% de las trabéculas. Finalmente, se determinó mediante análisis por elemento finito, que la rigidez del tejido esponjoso es de 323[MPa], y a partir de este valor se evaluó la variación de la resistencia en función de la densidad y la arquitectura trabecular.

Descriptor: estructuras de Voronoi, caracterización mecánica de hueso, hueso trabecular.

Abstract

In this paper is established a spongy bone bidimensional models methodology for its analysis by finite element software. The models are focused to represent the bone trabecular structure by Voronoi cells, using the coordinates of the porous center, contained within the bone structure, obtained by optical microscope images. Looking for a better geometrical similarity, it was assigned a thicker transversal area in the trabecula union zone, because has been reported that this factor gives a better approximation to experimental results. To feed the finite element models, compression test has been done to trabecular specimens, taking the maximum strain and maximum stress, to obtain the elastic modulus. By means of strained specimen images analysis, it has been established the structure collapse moment. It was when the 36% of total trabeculae failed. Finally it was obtained a tissue Young modulus of 323 [MPa] and with this value, the resistance variation in function of density and trabecular architecture.

Keywords: Bone mechanical modeling, voronoi structures, bone mechanical characterization, trabecular bone.

Introducción

Tejido esponjoso

El tejido óseo se puede clasificar en dos tipos principalmente; el hueso esponjoso y el cortical.

El hueso cortical es una masa sólida con canales únicamente microscópicos. Aproximadamente el 80% de la masa esquelética de un ser humano adulto es hueso cortical, el cual se forma como una pared exterior de los huesos y sus funciones principales son de soporte y protección.

El 20% restante pertenece al hueso esponjoso, también conocido como poroso o trabecular (figura 1), que está compuesto de una red interconectada de placas y barras que reciben el nombre de trabéculas, que a su vez, están compuestas de cristales de hidroxapatita dentro de una matriz de fibras de colágeno.

A densidades bajas, las celdas forman una red abierta de barras, conforme la densidad relativa aumenta más material se acumula en las paredes de las celdas y la estructura se transforma en una red más cerrada de placas.

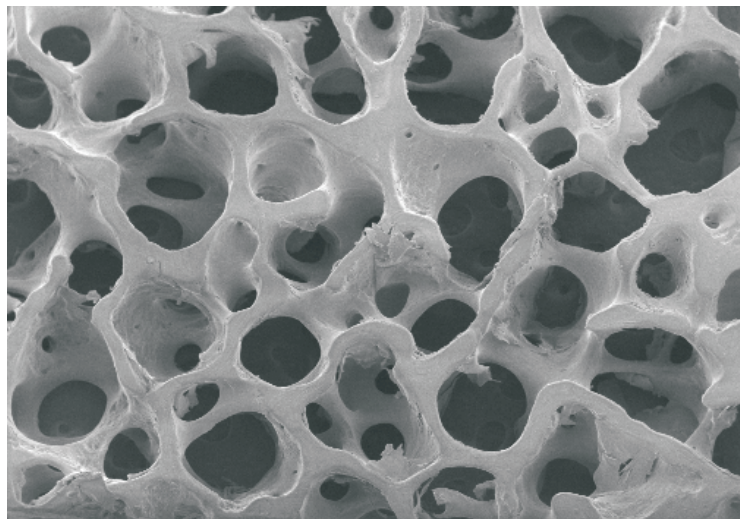


Figura 1. Hueso esponjoso 200X (Narváez, 2004)

El hueso esponjoso se encuentra principalmente cerca de las terminales de los huesos largos y en los cuerpos vertebrales. En los huesos largos, distribuye las cargas mecánicas desde las superficies articulares hasta el hueso cortical, mientras que en las vértebras es el constituyente principal que absorbe la carga (Cowin, 2001).

La densidad, arquitectura y función del hueso en una posición localizada dependen de la magnitud de las cargas a las que está sometido.

El comportamiento mecánico de los materiales celulares como el hueso trabecular depende de tres parámetros principalmente, el tipo de estructura que forman las celdas, la fracción volumétrica de sólido y las propiedades del material de la pared de la celda. La razón primordial para su modelado es debido a que si bien la resistencia del hueso depende primordialmente del hueso cortical, las fracturas más frecuentes que no tienen que ver con un impacto que supera la resistencia del hueso, están asociadas a regiones donde se presenta una alta concentración de hueso trabecular.

Modelos de hueso esponjoso

La respuesta mecánica de los sólidos celulares ha sido modelada mediante la representación de la estructura celular en distintas formas. Los modelos iniciales desarrollados para análisis estructural de una celda unitaria como un hexágono en dos dimensiones y un dodecaedro (poliedro 12 caras) o tetracaidecaedro (poliedro de 14 caras) en 3 dimensiones.

Beaupré y Hayes en 1985, supusieron una estructura cúbica conteniendo una cavidad esférica, donde el diámetro es mayor que la longitud de la celda, por lo que los huecos se encuentran interconectados y dependiendo del diámetro el material que queda en la estructura toma la forma de barras o de placas perforadas (figura 2).

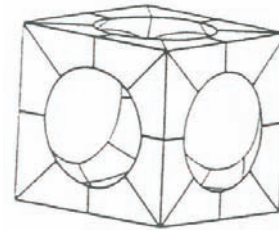


Figura 2. Celda unitaria básica que sirve para la construcción de un bloque de hueso trabecular (Beaupré et al., 1985)

Gibson y Ashby (1997), suponen celdas equiaxiales donde a bajas densidades las celdas son una red de barras mientras que a altas densidades su estructura es en forma de platos perforados, donde las celdas se encuentran desfasadas, lo que permite flexión de las paredes.

Según Gibson (1985), existen cuatro estructuras básicas de hueso esponjoso: la asimétrica, celda abierta con estructura de barras (figura 3a); la asimétrica, celda cerrada con estructura de placas (figura 3b); la columnar, celda abierta con estructura de barras (figura 3c); y la columnar, celda cerrada con estructura de placas (figura 3d).

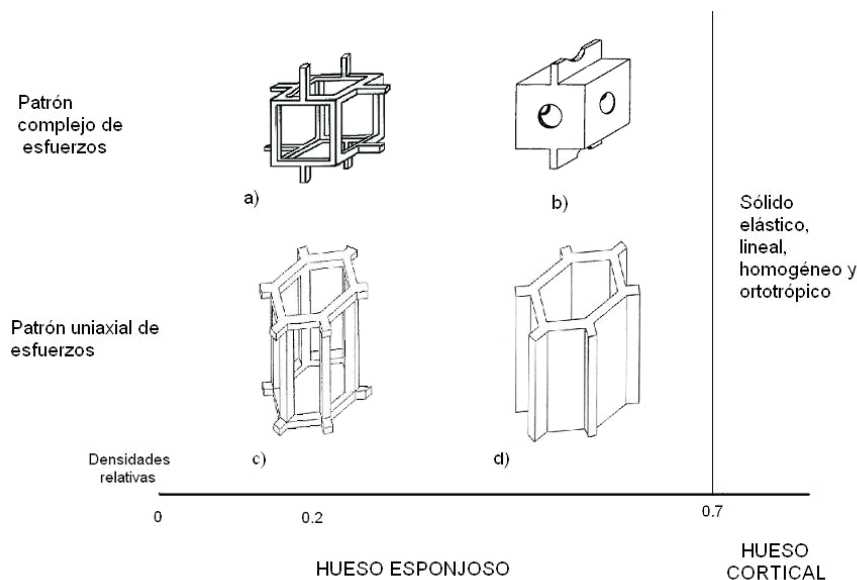


Figura 3. Modelos de celda unitaria (Gibson, 1985)

Las geometrías escogidas para los modelos son simples y altamente idealizadas y solo en algunos casos, toman en cuenta propiedades geométricas como la anisotropía en el hueso esponjoso. En los modelos se usan argumentos dimensionales, que no dependen de la geometría exacta del modelo, lo que provoca que los resultados numéricos difieran de la realidad, pero si reproducen los mecanismos de deformación.

Kim y Al-Hassani (2002) presentan un modelo analítico de celda unitaria que considera un aumento en su sección cerca de las zonas de unión, con el cual predicen las propiedades del hueso esponjoso. En éste se demuestra la importancia de aumentar el espesor cerca de las

zonas de unión en las celdas, para mejorar la exactitud al momento de calcular las propiedades mecánicas (figura 4).

Todos los modelos hasta ahora presentados, se basan en celdas unitarias para el estudio del comportamiento del hueso trabecular, en 1997 Silva y Gibson plantean un modelo bidimensional de elemento finito para simular el hueso trabecular de una vértebra, usando el concepto de celdas de Voronoi (figura 5). Este diagrama es ampliamente utilizado en construcciones geométricas que definen cómo el espacio de dos o tres dimensiones puede ser dividido en celdas y que a diferencia de los modelos anteriores considera la orientación de las trabéculas.

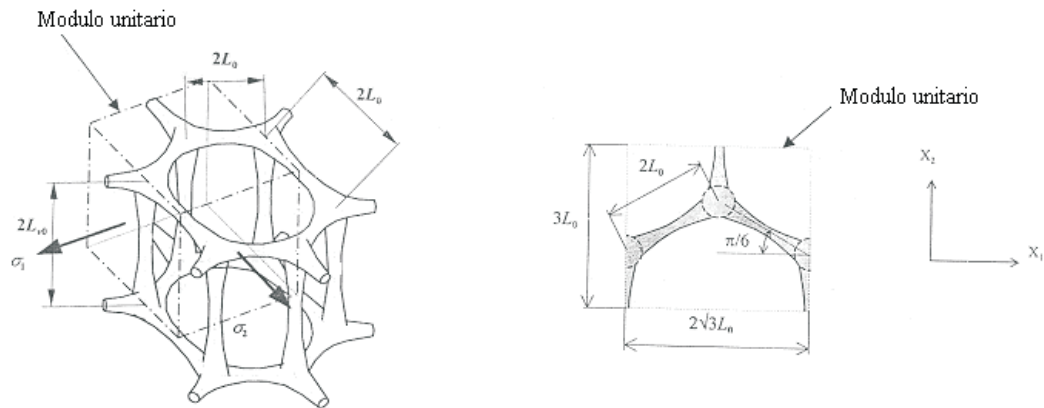


Figura 4. Modelo con estructura columnar hexagonal de hueso trabecular (Kim et al., 2002)

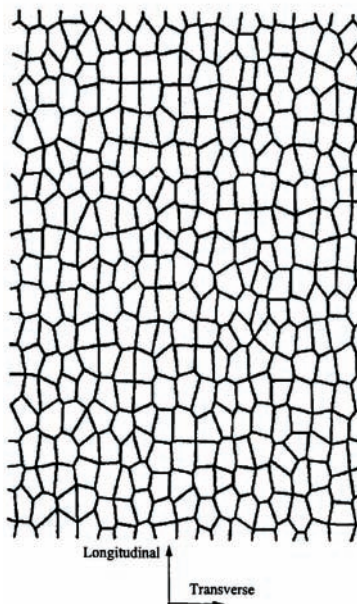


Figura 5. Modelo bidimensional en elemento finito (Silva et al., 1997)

Desarrollo experimental

Caracterización mecánica de hueso esponjoso

Se obtuvieron 10 probetas cilíndricas con una relación longitud-diámetro de 2:1. Lo anterior con la ayuda de un sacabocados, con el cual se extrajo una probeta de cada cabeza del fémur. Posteriormente, se ajustó la muestra a sus dimensiones finales mediante una cortadora de disco de diamante para obtener un corte más fino en las superficies planas de la probeta y dejar una longitud final de 2cm.

Las muestras fueron lavadas con agua y jabón, sin el uso de sosa o algún elemento desengrasante, debido a los daños que pueda ocasionar en la misma y posteriormente se realizó un lavado ultrasónico para eliminar médula y grasa, ya que la limpieza con aire a presión puede dañar la estructura. El almacenamiento de las muestras se realizó en solución isotónica de cloruro de Sodio Abbott (Cloruro de Sodio al 0.9%), procediendo a su refrigeración por un periodo de 8 días a una temperatura aproximada de 10 ° C.

La determinación de las propiedades mecánicas se realizó mediante ensayos de compresión, esto en una máquina de ensayos universales electromecánica Instron equipada con celda de carga de 5KN, buscando con esto una mayor exactitud en los resultados. Finalmente, se probaron las muestras húmedas a una velocidad de 0.05 mm/s.

Las curvas esfuerzo-deformación obtenidas de las pruebas de compresión, presentan el comportamiento típico para sólidos celulares, que se caracteriza por presentar tres regiones perfectamente identificadas (figura 6):

1. Régimen elástico lineal, correspondiente a la flexión en las trabéculas o la deformación de las paredes;
2. Esfuerzo meseta (plateau), correspondiente al colapso progresivo de la celda por pandeo elástico, cedencia plástica o fractura frágil dependiendo de la naturaleza del material de las trabéculas;
3. Densificación, correspondiente al colapso de las celdas a través del material y de la carga subsecuente de los bordes y de las caras de las celdas, unas sobre otras (Ramírez *et al.*, 2007).

El análisis de las curvas se realizó únicamente en la región elástica, obteniéndose los resultados que se presentan en la tabla 1.

El módulo obtenido de la tabla anterior se conoce como módulo aparente E^* , y es el módulo de elasticidad asociado a la estructura (trabéculas y poros) considerándola como un continuo, pero para el modelo no puede ser utilizado, ya que éste último considera la porosidad en su geometría.

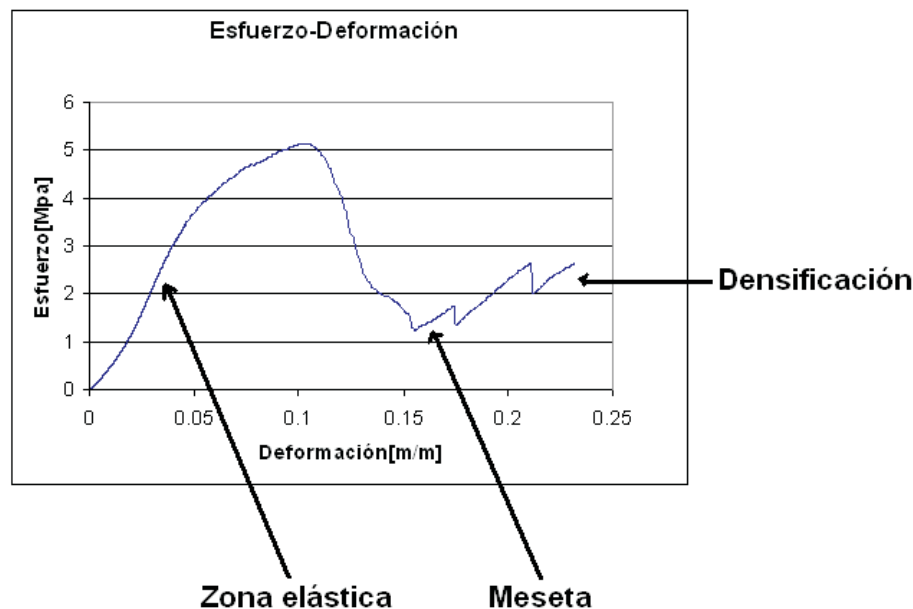


Figura 6. Curva esfuerzo-deformación para sólidos celulares

Tabla 1. Resultados de las curvas esfuerzo-deformación (Ramírez et al., 2007)

Probeta	E [GPa]	Def. Max. [%]	Esf. Max. [Mpa]
1	113	8	7.7
2	123	4.8	4.7
3	131	6	6.6
4	129	4.6	4.5
5	168	5.2	6.8
6	68	7.9	5.06
7	113	7.1	5.09
8	170	5	6.43
9	140	4	5.12
10	126	5.4	5
Promedio	128.1	5.8	5.7
Desv. Std.	29.05	1.41	1.08

Por lo anterior, los valores que se utilizarán para la obtención de la rigidez del hueso serán los de deformación y esfuerzo máximo promedio.

La deformación máxima promedio fue utilizada dentro del modelo mediante un desplazamiento a compresión, con un módulo de elasticidad de 1 [GPa], este último posteriormente fue ajustado con la finalidad de obtener sobre la imagen el esfuerzo máximo experimental de 5.5 [MPa], teniendo en cuenta que a este esfuerzo, la estructura colapsa.

Análisis microestructural del hueso esponjoso

A la par de la caracterización mecánica se llevó a cabo la obtención de imágenes microestructurales de hueso

esponjoso con la finalidad de tener las estructuras de partida para los modelos y obtener sus dimensiones características.

Para llevar a cabo la caracterización microestructural se obtuvieron tres muestras cilíndricas de hueso esponjoso mediante la metodología utilizada para la caracterización mecánica.

Para la adquisición de imágenes de la estructura trabecular, se optó por usar la cortadora de diamante y dividir en dos la probeta cilíndrica, de donde se obtuvo el área de observación para tres diferentes muestras (figura 7). De lo anterior, se obtuvieron imágenes a 100X mediante el microscopio óptico, tomando toda la superficie de cada una de las probetas, de tal forma que se pudiera reconstruir mediante Corel Draw®, el área transversal de cada muestra (figuras 8-10).

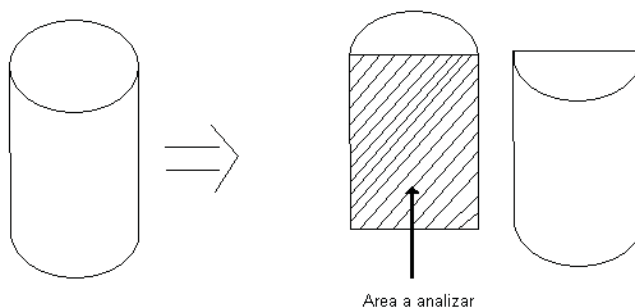


Figura 7. Corte mediante disco de diamante para caracterización microestructural (Ramírez et al., 2007)

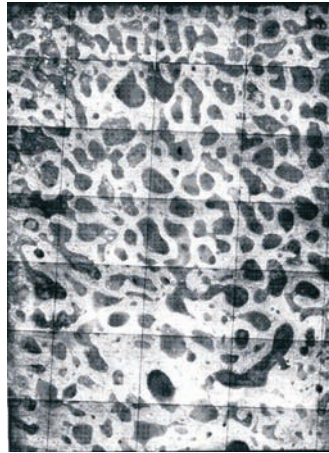


Figura 8. Probeta 1 corte transversal (10.9 x 15.3 mm) (Ramírez, 2007)

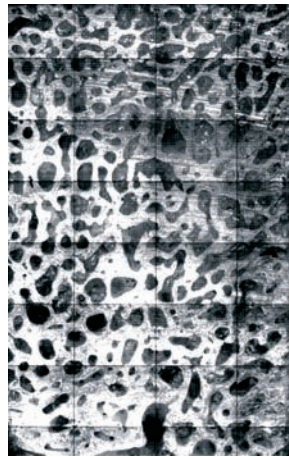


Figura 9. Probeta 2 corte transversal (9.7x15.3 mm)

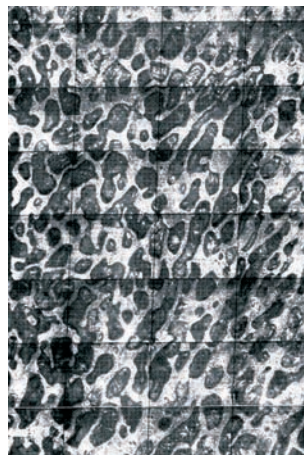


Figura 10. Probeta 3 corte transversal (10.6x16.2 mm)

Para la medición de espesores trabéculares se dividió cada una de las imágenes en tres regiones del mismo tamaño, debido a la clara diferencia en el espesor trabecular a lo largo de la altura de la probeta. Se llevaron a cabo 10 mediciones en cada una de las zonas, obteniendo para cada una de éstas el valor de *L* (espesor trabecular en la zona de unión con las demás trabéculas) y el valor de *l* (espesor mínimo en la zona central de la trabécula) mostrado en la figura 11 y colocando los valores promedio en la tabla 2.

Para el caso de la probeta 1 y 2 es evidente la variación de espesor a lo largo de la altura de la sección transversal de la probeta, en particular, en la zona denominada como “abajo” donde los valores promedio de “*l*” y “*L*” son mayores en comparación con las otras dos zonas. Por lo que para los modelos de estas probetas se determinará el valor promedio del espesor medido entre la región de arriba y en medio y éste será asignado a 2/3 de la estructura, mientras que para el tercio restante se utilizarán los valores de la región de abajo. Para el modelo de la probeta 3 simplemente se utilizarán los valores promedio de las tres regiones tanto para *l* como *L*.

Modelado de la arquitectura trabecular

Para la generación de los modelos a partir de las microestructuras de hueso trabecular se utilizaron las

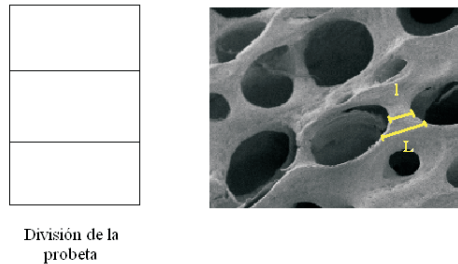


Figura 11. a) Regiones de la probeta donde se realizaron las mediciones b) Imagen del hueso trabecular a 30 X

Tabla 2. Valores promedio de espesores en el centro de las trabéculas [*l*] y en las zonas de unión [*L*] para tres regiones distintas de las figuras 8-10

	Prob. 1		Prob. 2		Prob. 3	
	<i>l</i> [mm]	<i>L</i> [mm]	<i>l</i> [mm]	<i>L</i> [mm]	<i>l</i> [mm]	<i>L</i> [mm]
Arriba	0.20	0.51	0.20	0.46	0.16	0.32
En medio	0.19	0.46	0.19	0.44	0.15	0.33
Abajo	0.32	0.69	0.30	0.75	0.16	0.40
Promedio (arriba y en medio)	0.19	0.48	0.19	0.45	0.16	0.35
Promedio (abajo)	0.32	0.69	0.30	0.75	0.16	0.35

celdas de Voronoi como herramienta para discretizar el espacio.

Un diagrama de Voronoi es construido a partir de un grupo de puntos de nucleación, que pueden estar espaciados regularmente o sin orden. El diagrama es generado mediante la construcción de bisectores perpendiculares para cada par de puntos adyacentes.

Las celdas resultantes son aquellas que son formadas simultáneamente desde los puntos de nucleación y crecen a una velocidad uniforme hasta que se conectan con las celdas adyacentes.

De esta manera en el diagrama de Voronoi, las paredes de las celdas se encuentran vinculadas a todos los puntos en el espacio que están cercanos a un solo punto de nucleación.

Para los diagramas de hueso trabecular, los puntos de nucleación no tienen ningún significado físico, son simplemente entidades de construcción que permiten crear los diagramas de un modo repetitivo.

A partir de las imágenes (8-10), se obtuvieron las coordenadas de los centros de cada uno de los poros de la arquitectura trabecular, mediante los cuales se construyeron los modelos de celdas de Voronoi con ayuda de Mathematica® (figuras 12-14).

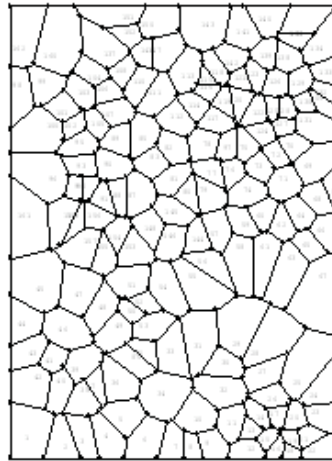


Figura 12. Modelo con celdas de Voronoi para la probeta 1 corte transversal

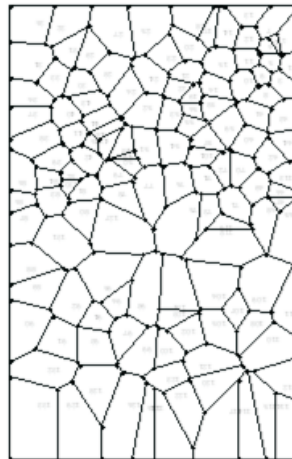


Figura 13. Modelo con celdas de Voronoi para la probeta 2 corte transversal

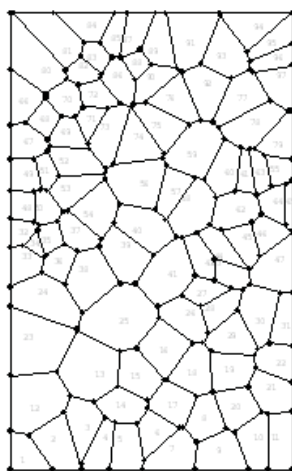


Figura 14. Modelo con celdas de Voronoi para la probeta 3 corte transversal

Las estructuras generadas por celdas de Voronoi presentan similitudes con las estructuras originales, en el caso de las figuras 12 y 13 se observa una distribución homogénea de los poros en la región de arriba. Por otro lado, en la figura 14 se observa la orientación preferencial que tienen las celdas que van desde la esquina inferior izquierda hasta la esquina superior derecha, al igual que en la imagen de la cual se partió, pero en la esquina inferior derecha se obtuvo una estructura que no presenta la orientación preferencial que si se observa la imagen de partida.

A partir de las estructuras de Voronoi generadas mediante paquetería, se transfirieron los datos a Abaqus® para analizar éstas mediante elemento finito.

A cada una de las barras de la estructura de Voronoi se le asignó la geometría trabecular que se observa en la figura 15.

Buscando que la estructura se asemeje en mayor medida a la geometría que se observa en las imágenes y tomando en consideración lo reportado por Kim y Al-Hasani, ya que éstos indican que se obtiene una mejor aproximación al comportamiento si se considera el engrosamiento en las zonas de unión de las trabéculas.

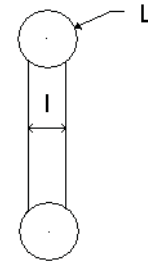


Figura 15. Geometría básica del modelo de la trabécula (Ramirez et al., 2007)

El modelo de la trabécula individual consta de 2 circunferencias de radios iguales a la mitad del espesor medido en las regiones más gruesas ($L/2$), mientras que la sección media tiene como espesor el valor medio evaluado en el centro de las trabéculas (l) (figura 15).

Las estructuras generadas en la paquetería quedan como se muestran en las Figuras 16-18, de las cuales se determinó mediante la paquetería el área que ocupa el sólido, se dividió entre el área total que ocuparía si no tuviera porosidades con lo que se obtuvo la fracción de área para cada una de éstas.

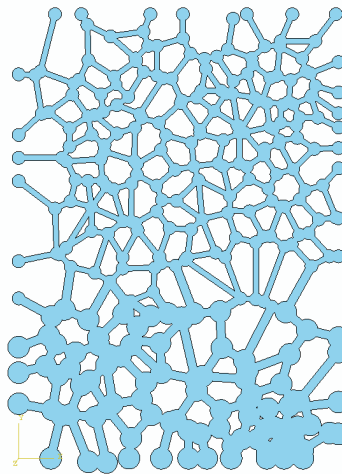


Figura 16. Modelo 1, estructura trabecular con una fracción de área de 0.463 (Ramirez, 2007)

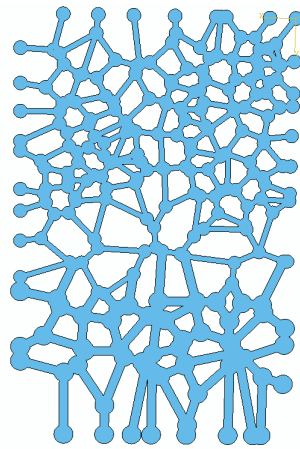


Figura 17. Modelo 2, estructura trabecular con una fracción de área de 0.419

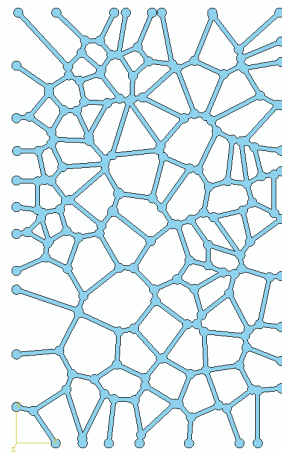


Figura 18. Modelo 3, estructura trabecular con una fracción de área de 0.232

Evolución de la arquitectura trabecular durante la deformación

Con la finalidad de establecer un criterio para determinar el momento en que la estructura trabecular colapsa, es decir, cuando llega a su esfuerzo máximo, se llevó a cabo el análisis de la evolución de la arquitectura del hueso esponjoso durante la deformación.

Las pruebas consistieron en tomar distintas muestras de hueso esponjoso y someterlas a compresión, de tal manera que cada una fue sometida a un distinto porcentaje de deformación, desde 2% hasta 6% (2, 3, 4, 5 y 6%). En las pruebas experimentales se observó que la deformación correspondiente al esfuerzo máximo es del orden del 5.5% y es por esto que el valor de deformación máxima que se tomó fue del 6%. Todo este análisis se encuentra en el rango elástico de las curvas esfuerzo-

deformación, por lo que se puede esperar que después de la deformación exista una recuperación total de la muestra, lo cual implicaría que al tomar las imágenes no existiera ninguna evidencia de las solicitaciones a las que estuvo sometida. Sin embargo, y dado que no se trata de un continuo sino de una estructura, se tiene que algunas de las trabéculas fallan a deformaciones menores a la máxima, en consecuencia, lo que se midió es el daño causado en las trabéculas durante la deformación, es decir, el número de trabéculas rotas.

Para llevar a cabo el análisis cuantitativo, las piezas deformadas fueron llevadas al microscopio óptico y de nuevo se reprodujeron por completo las imágenes de las probetas, pero para este estudio únicamente es de interés el resultado asociado a la estructura que fue sometida a un 6% de deformación, ya que es la relacionada con el colapso de la estructura.

Se midió la cantidad de trabéculas faltantes por unidad de área, considerando como trabéculas faltantes todas aquellas trabéculas incompletas, o donde parece que en un momento dado estaba la presencia de alguna. La realidad es que estas trabéculas no desaparecen durante la deformación, simplemente se fracturan y quedan dispersas.

En la figura 19 se observa la muestra con un 6% de deformación, en la cual se contaron aproximadamente 235 trabéculas faltantes, en un área analizada de 96.81 [mm²]. Se contó que la cantidad total de trabéculas es de 652, por lo que es necesario que aproximadamente el 36% de las trabéculas fallen para que se presente el colapso de la estructura.

Resultados

De lo observado microestructuralmente tanto en las muestras que fueron sometidas a pruebas de compresión, como en las que se realizó el análisis de la evolución de falla, la estructura que aparece de forma más común es la que generó el tercer modelo; aun cuando de las estructuras seleccionadas para modelar, dos tienen una variación en el espesor de las trabéculas a lo largo de su altura, lo que genera que tengan una mayor densidad.

Por lo antes mencionado, la rigidez del hueso trabecular fue determinada para el tercer modelo, asignándole un desplazamiento vertical en la superficie superior

que corresponde al 5.5 % de deformación, mientras que la superficie inferior fue empotrada.

Se consideró el comportamiento como elástico asignando un módulo de Young de 1 GPa y una relación de Poisson de 0.3, con esto se observó el nivel de esfuerzos presente en la estructura, se ajustó la escala de colores para que el 36% de las trabéculas quedaran fuera de rango y con esto determinar el factor por el que hay que multiplicar el módulo de elasticidad para obtener el valor de esfuerzo máximo de 5.5 [MPa] sobre la estructura. Para ésta última se determinó un módulo de 323 MPa (figura 20). Este dato se encuentra en los valores reportados por la literatura, dado que para vértebras de cerdo se encontraron valores entre 610 [MPa] hasta 1550[MPa], para fémur de cabra valores entre 234 hasta 770 [MPa], para fémur de humano desde 190 hasta 1610 [MPa] (Yuehwei *et al.*, 2000).

Cabe mencionar que se malló con elementos triangulares lineales, para el modelo 1 se tuvieron 21540 elementos; para el modelo 2, 13347 elementos y para el modelo 3, 13029 elementos. Además, se consideró auto-contacto sin fricción, ya que durante la deformación se puede presentar que unas trabéculas empiecen a interactuar con otras.

Asignando la rigidez de 323 [MPa] a las tres estructuras, considerando que esta propiedad depende principalmente del nivel de mineralización y obteniendo la variación en la resistencia para cada estructura.

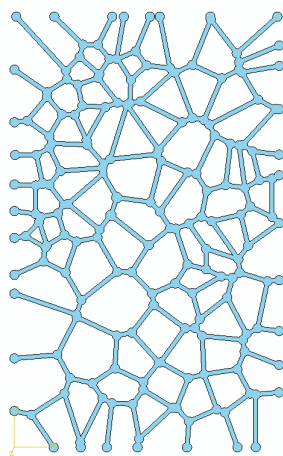


Figura 19. Imagen de hueso trabecular con un 6% de deformación

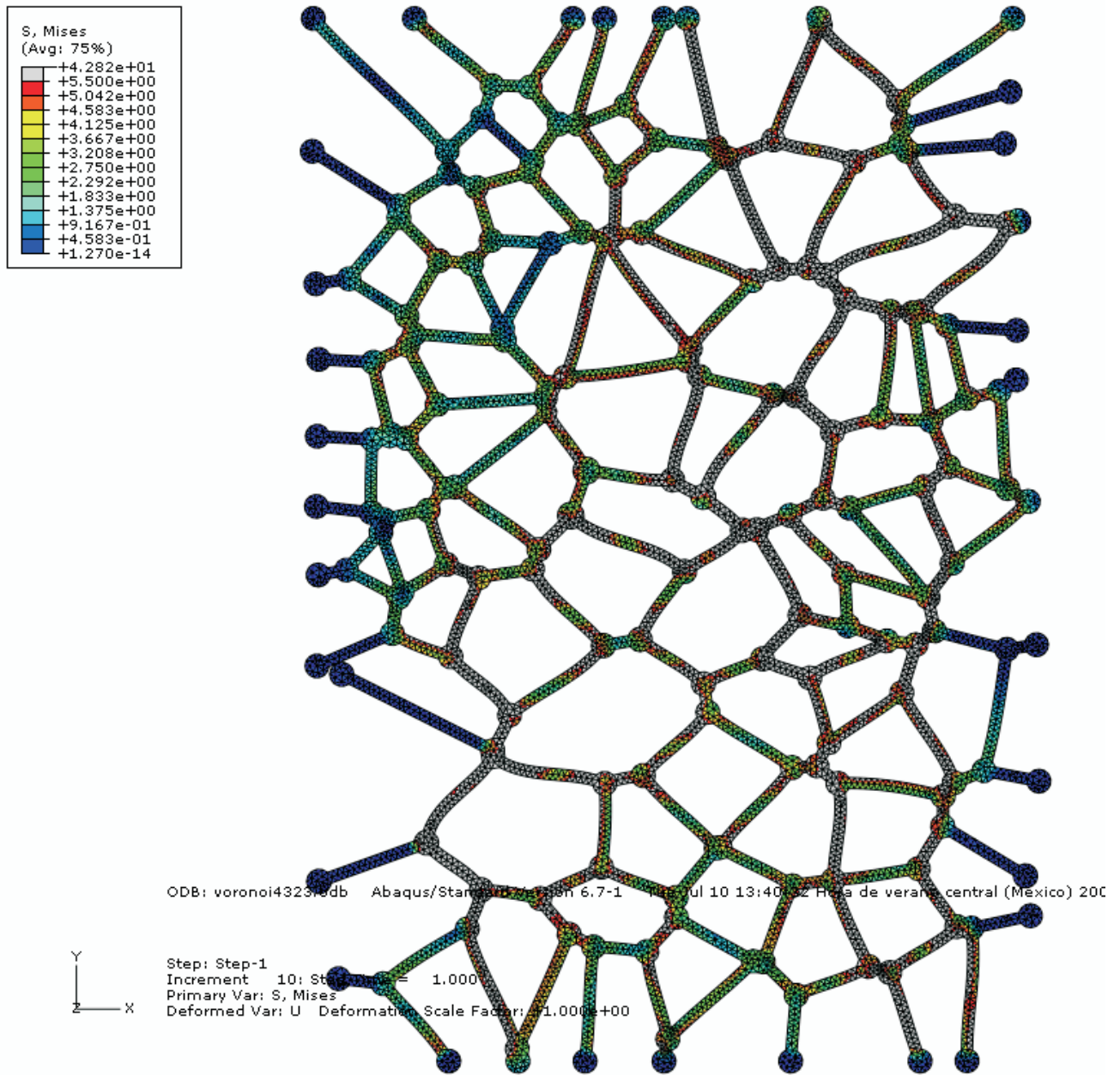


Figura 20. Estructura 3 deformada 5.5%, mostrando el nivel de esfuerzos para un módulo de elasticidad de 323 [MPa]

En las figuras 21 y 22 se observa el nivel de esfuerzos en las estructuras 1 y 2 para un módulo de elasticidad de 323 [MPa], donde para la estructura 1 se encuentra que la resistencia máxima aumenta de 5.5 [MPa] hasta 10 [MPa], mientras que para la estructura 2 se obtiene un valor de 9.4 [MPa], lo cual comprueba que si bien la rigidez del material de los tres modelos es la misma, la rigidez de cada una de las estructuras difiere, y para los

casos analizados en particular, se tiene que la estructura con una densidad relativa mayor, presenta una mayor rigidez y una mayor resistencia.

Pero hay que mencionar que para evaluar el efecto de la arquitectura trabecular en la resistencia se necesitan hacer estos modelos paramétricos y compararlos para el caso en que tengan exactamente la misma densidad.

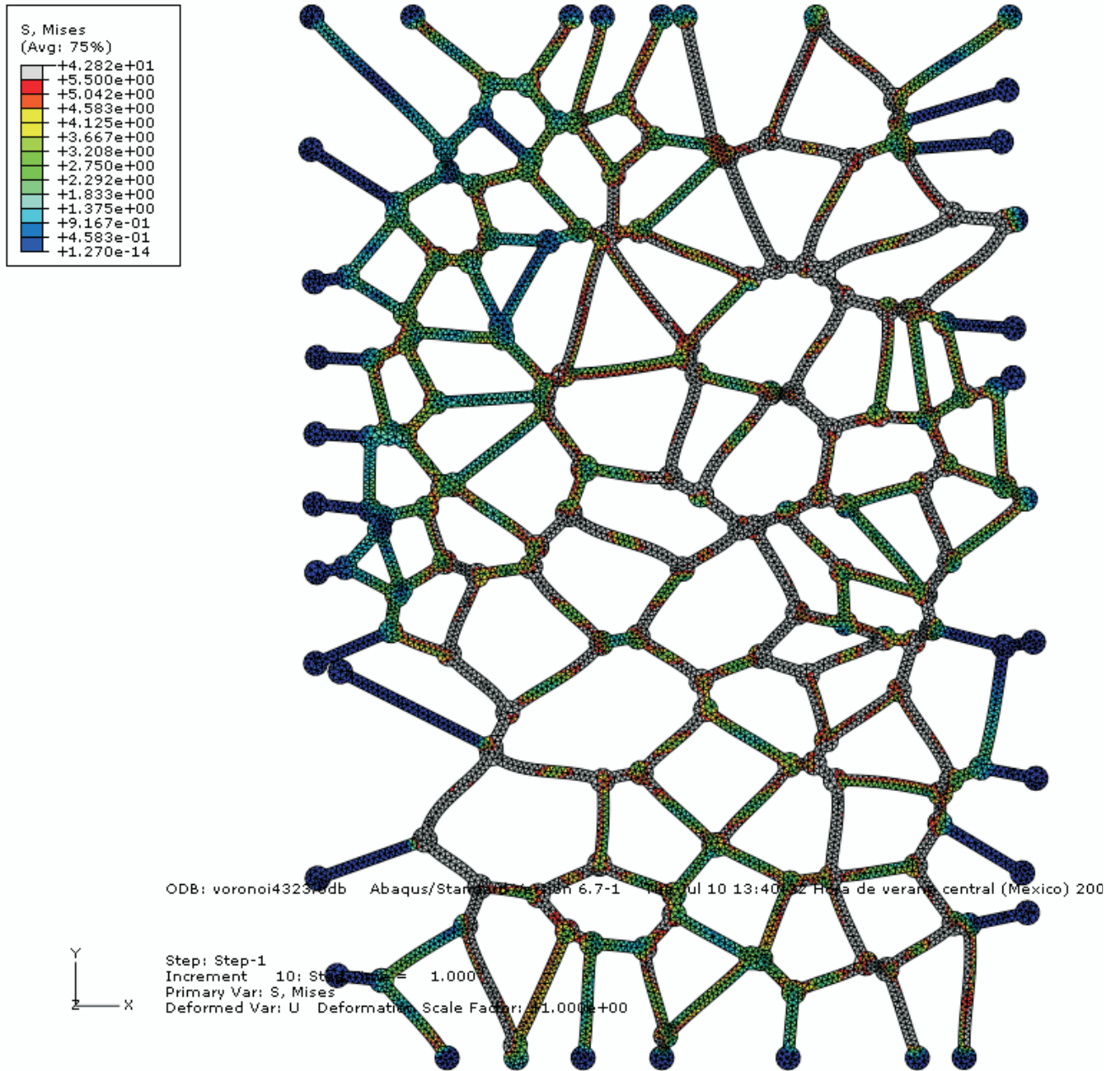


Figura 24. Estructura 1 deformada 5.5%, mostrando el nivel de esfuerzos para un módulo de elasticidad de 323 [MPa]

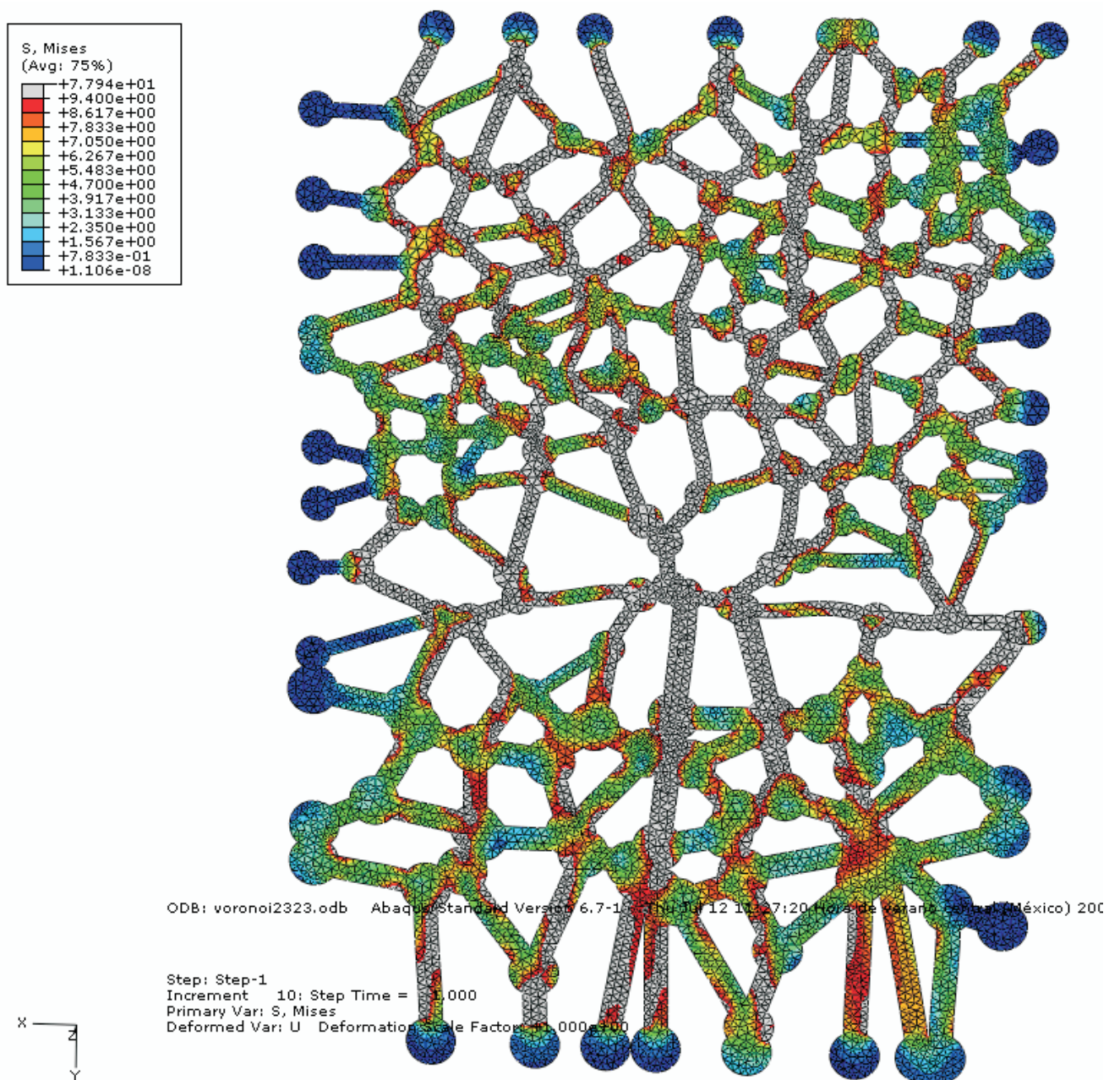


Figura 22. Estructura 2 deformada 5.5%, mostrando el nivel de esfuerzos para un módulo de elasticidad de 323 [MPa]

Adicionalmente para cada una de las estructuras se graficó la sumatoria de las fuerzas de reacción en la superficie del modelo contra el desplazamiento vertical de la muestra, lo que arrojó los resultados que se presentan en la figura 23.

En la gráfica (figura 23) se observa que tanto para el modelo 2 como para el modelo 3, se presenta un comportamiento lineal como era de esperarse, ya que el comportamiento asignado a las trabéculas es elástico, pero en el modelo 1 la linealidad se pierde a partir de los últimos 3 datos graficados, situación que coincide con el momento en el cual empiezan a interactuar algunas trabéculas y la condición de auto-contacto se activa, lo que provoca una disminución en la fuerza de reacción, ya que se consideró una condición sin fricción.

Por otro lado, se observa que la estructura con menor densidad es la que presenta una menor resistencia y que la que tiene mayor densidad (modelo 1) si no fuera por el efecto que tiene la condición de auto-contacto hubiera presentado la mayor resistencia. Analizando la evolución de la falla en el modelo 3, se presenta un comportamiento similar al que se observó en las estructuras inspeccionadas en el microscopio, en las cuales a deformaciones del orden del 2% ya se presenta que en algunas zonas localizadas de las trabéculas, ya se supere el esfuerzo máximo de 5.5 [MPa], lo que se puede ver como puntos de inicio de grietas. A deformaciones mayores del orden del 4%, se observa que estas áreas aumentan y aparecen nuevos puntos de inicio de grietas (figura 24).

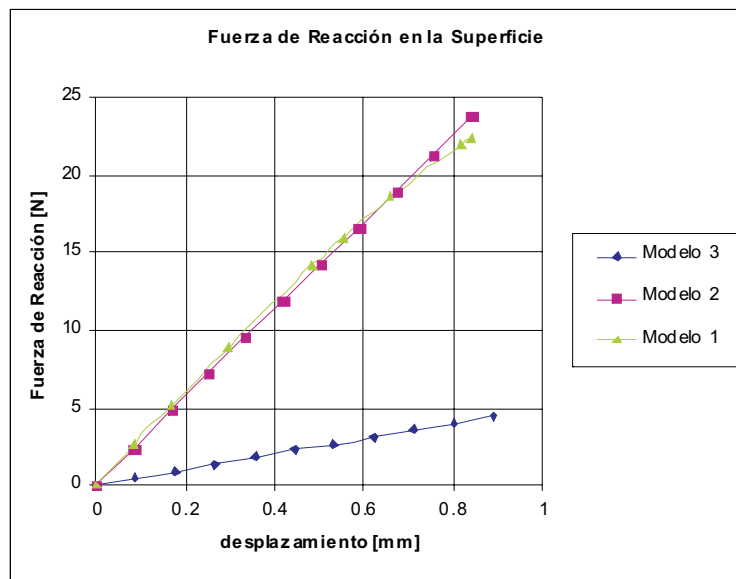


Figura 23. Fuerzas de reacción en las superficies de los modelos

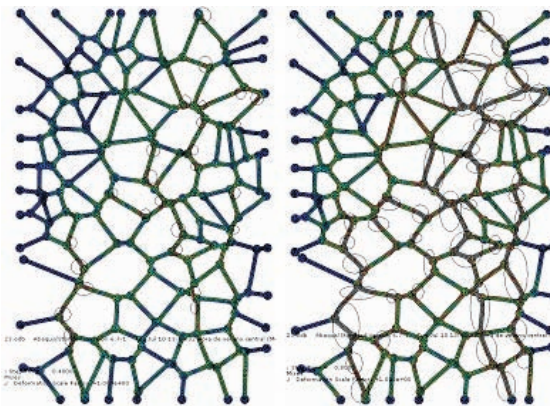


Figura 24. Evolución del nivel de esfuerzos a 2% (izquierda) y 4% de deformación (derecha)

Conclusiones

Cabe mencionar que si bien se llevaron a cabo algunos análisis a las estructuras obtenidas, el objetivo de esta etapa del proyecto es el de establecer una metodología para el modelado de la estructura trabecular del hueso, condición que se consiguió desde el punto de vista de similitud geométrica y al tomar en cuenta los factores más importantes para el comportamiento mecánico de los sólidos celulares.

El método de celdas de Voronoi es una técnica geométrica que permite reproducir de una forma relativamente simple una estructura celular como la del hueso trabecular. Este modelo a diferencia de aquellos que consideran únicamente una celda unitaria, tiene la ventaja que se pueden tomar en cuenta los tres factores determinantes de cualquier sólido celular; las propiedades del tejido, la arquitectura trabecular y la densidad o fracción volumétrica, este último punto se puede desarrollar variando el espesor mínimo de las trabéculas.

En la secuencia de imágenes obtenida durante la deformación de la arquitectura, se observó que la falla de las trabéculas se presenta desde deformaciones muy por debajo del valor máximo obtenido experimentalmente. Por otra parte, no es hasta que una cierta cantidad de trabéculas fallan cuando se da el colapso de la estructura.

Con los datos obtenidos experimentalmente se determinó la rigidez del tejido óseo mediante la paquetería de elemento finito y se obtuvo un módulo de elasticidad de 323 [MPa] para la tercera estructura, esto permitió a su vez observar la variación en la resistencia de las estructuras trabeculares analizadas. El nivel de esfuerzos en las estructuras 1 y 2 para un módulo de elasticidad del tejido óseo de 323 [MPa], es de 10 [MPa] y de 9.4 [MPa], respectivamente, mientras que para la estructura 3 fue de 5.5 [MPa], lo cual comprueba que si bien la rigidez del material de los tres modelos es la misma, la rigidez de cada una de las estructuras difiere, finalmente para los casos analizados, en particular, se tiene que a mayor densidad relativa mayor resistencia.

Si bien para estos primeros modelos se omitieron ciertos factores de relevancia como el comportamiento anisotrópico del hueso, así como la fricción que existiría en el momento en que entran en contacto las trabéculas; son cuestiones con las que actualmente ya se están trabajando para generar modelos con un comportamiento más aproximado a la realidad. Adicionalmente a

lo anterior, también ya existen avances en la optimización de la generación de geometrías, tanto en tiempo como en similitud geométrica, las cuales se presentarán en trabajos posteriores.

Agradecimientos

Se agradece el apoyo en las diferentes etapas del presente estudio a los ingenieros Víctor Hugo Jacobo, Efraín Ramos, Roberto Cisneros, Ignacio Cueva, Jorge Romero y al biólogo Germán Álvarez. Por otra parte, se reconoce el apoyo económico brindado por la Dirección de Asuntos del Personal Académico de la UNAM, esto a través de los proyectos PAPIIT Micromecánica de hueso 2 IN113209 y PAPIIME Laboratorio de biomateriales PE 104109.

Referencias

- An Y. y Draughn R. *Mechanical Testing of Bone and the Bone-Implant Interface*. USA. CRC press. 2000.
- Beaupré G. y Hayes W. *Finite Element Analysis for a Three Dimensional Open-Celled Model for Trabecular Bone*. J. Biomech. 1985.
- Cowin S. *Bone Mechanics Handbook*. 2ª edición. USA. CRC. 2001.
- Gibson L. The Mechanical Behavior of Cancellous Bone. *J. of Biomechanics*, 5:317-328. 1985.
- Gibson L. y Ashby M. *Cellular Solids: Structure and Properties*. 2da edición. 1997.
- Gibson y Lorna. *Biomechanics of Cellular Solids*. J. Biomech. Massachusetts. 2004.
- Kim H., Al-Hassani S. A Morphological Model of Vertebral Trabecular Bone. *Journal Biomechs*. 35:1101-1114. South Korea, 2002.
- Narváez M. Propuesta para el análisis de las propiedades mecánicas del hueso esponjoso vertebral. Tesis (Licenciatura en ingeniería). México DF. Universidad Nacional Autónoma de México. 2004.
- Ramírez E., Ortiz A., Schouwenaars R., Ruiz O. Modelado de hueso trabecular mediante paquetería de elemento finito basándose en estructuras de Voronoi. *Revista de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica*, 2(5). Septiembre 2007.
- Silva M. y Gibson L. Modeling the Mechanical Behavior of Vertebral Trabecular Bone: Effects of Age-Related Changes in Microstructure. *Bone*, 21(2). 1997.

Semblanzas de los autores

Edgar Isaac Ramírez-Díaz. Estudió la licenciatura en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), obteniendo el título de ingeniero mecánico en el 2004. Perteneció a la Unidad de Investigación y Asistencia Técnica en Materiales desde 2003, colaborando en proyectos académicos y para la industria, primordialmente en el área de análisis de falla, modelado por elemento finito, optimización de procesos de conformado. Estudió el posgrado en el Instituto de Investigaciones en Materiales en la misma Universidad, obteniendo el grado de maestro en ciencia e ingeniería de materiales en el 2007. Es profesor asociado "C", T.C. en la Facultad de Ingeniería de la UNAM desde el 2004, donde ha impartido ciencia de materiales II, metalurgia física, laboratorio de ciencia de materiales II, laboratorio de modelado de procesos de manufactura y proyecto de ingeniería. Ha publicado un artículo en congreso internacional, 13 artículos en congresos nacionales y 2 artículos en revistas y ha dirigido 7 tesis a nivel licenciatura con 8 alumnos titulados.

Armando Ortiz-Prado. Se graduó como ingeniero mecánico electricista (Ingeniería mecánica) por la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) en 1980. Posteriormente, obtuvo la maestría y el doctorado en ingeniería mecánica. Es profesor desde hace 29 años, impartiendo cátedra principalmente en las áreas de procesos de manufactura y ciencia de materiales. Es profesor titular "C" de tiempo completo definitivo y tutor doctoral de los posgrados de ciencia e ingeniería de materiales y de ingeniería. Sus líneas de investigación son modelado de procesos de conformado mecánico, análisis de falla, comportamiento mecánico de biomateriales y corrosión en equipo electrónico. Ha desarrollado proyectos y estudios para diferentes empresas privadas y entidades gubernamentales, orientados éstos al desarrollo y mejora de métodos de manufactura, desarrollo de materiales, corrosión y análisis de falla; lo cual se traduce en más de 50 estudios y asesorías para la industria, 12 proyectos de investigación y desarrollo tecnológico. A la fecha, suma más de 90 tesis de licenciatura. Su experiencia se ha transmitido a través de 7 textos para licenciatura en las áreas de manufactura, materiales y corrosión. Asimismo, su productividad incluye más de 15 artículos en congresos internacionales, más de 80 artículos en congresos nacionales y más de 20 artículos en revistas arbitradas. Fue galardonado por la UNAM con la Distinción Universidad Nacional para Jóvenes Académicos (Docencia en ciencias exactas) en 1989. Su productividad académica y científica ha sido reconocida por la UNAM, a través del otorgamiento del nivel D del PRIDE y por el CONACYT con el nombramiento de Investigador Nacional Nivel I.

Rafaël Schouwenaars-Franssens. Obtuvo el grado de maestro en ingeniería de minas en la Universidad de Lovaina, Bélgica y el doctorado en ingeniería mecánica en la FI-UNAM. Ocupa el nivel I en el sistema nacional de investigadores. Durante cuatro años estaba activo como investigador, trabajando proyectos industriales relacionados con la textura cristalográfica en aceros en el Departamento de Metalurgia e Ingeniería de Materiales de la misma universidad. Su trabajo en México lo inició como experto en microscopía electrónica dentro de la Unidad de Investigación y Asistencia Tecnológica en Materiales (UDIATEM). Posteriormente combinó estas actividades con una carrera de profesor en la Facultad de Ingeniería. En el ámbito tecnológico se dedica al análisis de falla y la optimización de procesos en la industria metal-mecánica, con un enfoque especial hacia las aleaciones tribológicas dúctiles. Ha realizado estudios científicos enfocados a las propiedades mecánicas de materiales complejos, los cuales se han publicado en 25 artículos internacionales, 7 en revista nacional y 37 que se han presentados en 30 congresos tanto internacionales como nacionales. Es árbitro de varias revistas tanto nacionales como internacionales y miembro del comité científico de dos series de congresos internacionales de primer nivel.

Oswaldo Ruiz-Cervantes. Realizó sus estudios de licenciatura en la Facultad de Ingeniería de la UNAM, obteniendo el título de ingeniero mecánico en el 2004. Perteneció a la Unidad de Investigación y Asistencia Técnica en Materiales desde 2005, desempeñándose como ingeniero de proyectos en las áreas de simulaciones numéricas, procesos de conformado mecánico y caracterización de hueso trabecular. Actualmente realiza trámites para obtener el grado de maestro en ciencias e ingeniería en el Posgrado del Instituto de Investigaciones en Materiales, teniendo como asesor al Dr. Armando Ortiz Prado. Imparte las materias de Modelado de Procesos de Manufactura e Ingeniería de Materiales en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Generic Model to Send Secure Alerts for Utility Companies

Modelo genérico para el envío de alertas seguras en empresas del sector energético

Galván-Bobadilla I.

*Instituto de Investigaciones Eléctricas.
Cuernavaca, Morelos, México.
E-mail: igalvan@iie.org.mx*

Santos-Domínguez M.

*Instituto de Investigaciones Eléctricas.
Cuernavaca, Morelos, México.
E-mail: msantos@iie.org.mx*

Perez-Díaz J.A.

*Tecnológico de Monterrey, Campus Cuernavaca.
Cuernavaca, Morelos, México.
E-mail: jesus.arturo.perez@itesm.mx*

(Recibido: abril de 2008; reevaluado: enero de 2009; aceptado: febrero de 2009)

Abstract

In some industries such as logistics services, bank services, and others, the use of automated systems that deliver critical business information anytime and anywhere play an important role in the decision making process. This paper introduces a "Generic model to send secure alerts and notifications", which operates as a middleware between enterprise data sources and its mobile users. This model uses Short Message Service (SMS) as its main mobile messaging technology, however is open to use new types of messaging technologies. Our model is interoperable with existing information systems, it can store any kind of information about alerts or notifications at different levels of granularity, it offers different types of notifications (as an alert when critical business problems occur, as a notification in a periodical basis or as 2 way query). Notification rules can be customized by final users according to their preferences. The model provides a security framework in the cases where information requires confidentiality, it is extensible to existing and new messaging technologies (like e-mail, MMS, etc). It is a platform, mobile operator and hardware independent. Currently, our solution is being used at the Comisión Federal de Electricidad (Mexico's utility company) to deliver secure alerts related to critical events registered in the main power generation plants of our country.

Keywords: Mobile middle ware, mobile environments, nomadic computing.

Resumen

En algunas industrias como las empresas de generación eléctrica, consultoras de servicios de logística, banca y otras, el uso de sistemas automatizados que entreguen -en cualquier

lugar y en cualquier momento- información crítica del negocio, juegan un papel muy importante en el proceso de toma de decisiones. En este artículo se presenta un "modelo genérico para enviar notificaciones y alertas en forma segura", el cual opera como una capa intermedia entre las fuentes de datos empresariales y sus usuarios móviles. Este modelo usa el servicio de mensajes cortos o Short Message Service (SMS) como su principal tecnología de mensajería, no obstante, está abierto a usar nuevas tecnologías de mensajería. Nuestro modelo es interoperable con sistemas informáticos existentes, es capaz de almacenar en distintos niveles de granularidad cualquier tipo de información sobre alertas o notificaciones, ofrece distintos tipos de notificación (por ejemplo: como alerta cuando ocurre algún problema crítico del negocio, como una notificación en forma periódica ó como una consulta de dos vías). Las reglas de notificación pueden ser personalizadas por los usuarios finales, de acuerdo a sus preferencias. El modelo ofrece un marco de seguridad para aquellos casos en que la información requiere ser protegida, además es extensible con nuevas tecnologías de mensajería. Es independiente de hardware, sistema operativo y operadora de telefonía celular. Actualmente, nuestra solución se encuentra en uso por la Comisión Federal de Electricidad para enviar alertas seguras relacionadas con eventos críticos ocurridos en las principales plantas de generación eléctrica de nuestro país.

Descriptor: capas intermedias móviles, ambientes móviles, cómputo móvil.

Introduction

Medium to large size organizations have a variety of information systems like administrative, operative or strategic applications; these applications contain very valuable and helpful information for the decision-making process. Usually, these systems need to be consulted from a desktop computer so the user can be informed of critical information.

There are scenarios where users have no access to a desktop computer because most of their time is spent in continuous movement outside of their offices, and some of these users are persons who are responsible for taking critical decisions for the company. This group of users requires mobility and ubiquitous access to information at the moment that is needed.

Hence, there is a need to have a tool that monitors and unifies critical business information which delivers it to decision makers as quickly as possible in pocket-sized devices, in a secure way, anytime-anywhere and also eliminate the need for wires.

An alternative to solve those necessities is the creation of a "middleware" between data sources and final users that make use of mobile messaging as an instantaneous medium of communication.

Such middleware must resolve the following challenges (see figure 1):

- A) *Interoperability with existing systems.* Usually, data sources are heterogeneous; information is stored

in different database management systems and accessed through applications created in distinct programming languages.

The middleware must provide a standard mechanism for connecting to data sources without concerning the technical aspects where they were created.

- B) *Handle different kinds of notification contents.* Notification data in a certain domain may not be the same in another domain, so a flexible repository design must be considered to store any kind of information related to a notification service.
- C) Confidentiality and integrity of messages have to be assured, especially when classified data is transmitted.
- D) *Different mobile messaging technologies and devices to notify.* The content of messages needs to be transformed to a proper format according to the type of device where the message is going to be read.
- E) *Users require customizing their notification preferences.* There are some cases where alerting services are too general, and users need to customize their notification preferences according to their information needs.

For example: if the alerting system consists of notifying the presence of hurricanes, maybe a user who is living in the west will decide to only receive alerts of hurricanes from the Pacific Ocean.

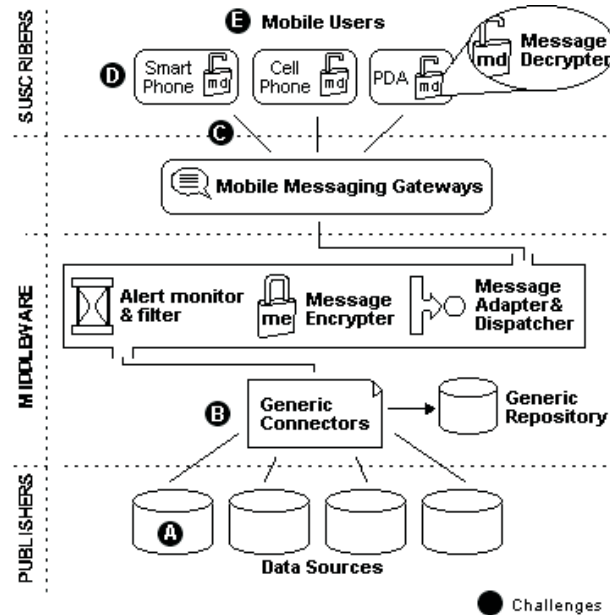


Figure 1. Architecture and Challenges of the Proposed Solution.

Selected technologies and related work

As part of this research, we made an analysis of the current Mobile Messaging Technologies (MMT) in order to decide which of them is more suitable to our country.

Currently there are three MMTs: *Short Message Service (SMS)* (2002), *Enhanced Message Service (EMS)* and *Multimedia Messaging Service (MMS)*. Table 1 summarizes all the features of each technology.

Table 1. Main Features of Mobile Messaging

SMS	<ul style="list-style-type: none"> - Sends text plain-based messages with a length up to 160 characters, although concatenation of messages is allowed. - Offers a “Store and forward” service for traffic management, delivers the message when the user turns on his mobile equipment. - Cheap, also offers international roaming without charges. - Is included in all cell phones, from the most basic to the most sophisticated.
EMS	<ul style="list-style-type: none"> - Emerged as an upgrade for SMS. - Allows sending formatted text, grayscale images and melodies. - Is a 3GPP Standard. - Is not supported in all cell phones. - Its price varies depending on the content of the message. - Not commonly used, surpassed by MMS.
MMS	<ul style="list-style-type: none"> - The most modern system for mobile messaging - Allows the user to send: formatted text, graphics, data, animations, voice transmissions, video and audio clips - It is based in SMIL (also based in XML) to customize the flow of displaying multimedia elements. - Expensive costs per message, also requires sophisticated and costly equipment.

SMS is the most used technology in the world. According to Garnet Dataquest Group, one of the industry's major research agencies, it is estimated that in 2002, 142 billion SMS messages were exchanged worldwide, and 168 billion in 2003 (Le Bodic, 2003). In México the use of SMS is intensive; from 2003 to 2005 SMS increased by 500% (Olguín, 2006). On the other hand, its cost is very low: 85 cents of a peso, compared with MMS that costs 13 pesos per message (The net size guide 2006) plus download charges.

The previous information motivated this work to focus on the use of SMS as a default technology to send alerts, in addition to the following: it is very cheap; it is available in many countries; it is present in any cell phone; it is interoperable between different cell phone companies; offers "store and forward messaging", that means, that when a user has "turned off" his mobile, the SMS center holds the message until the user turns "on" his equipment; and many other advantages mentioned in Drumea *et al.* (2004) and Ravi *et al.* (2004).

Related work

Before starting with the design of our proposed model, we made an analysis of previously related work on the use of mobile messaging for sending alerts (see table 2).

We found the following disadvantages: they are expensive tools; they are proprietary and domain specific; they do not offer security on the transmission of messages; they are operating system dependant and are limited to a specific mobile technology; and they do not allow the customization of notification preferences.

The work described in (Wams *et al.*, 2003) is an abstract model that it is implementation independent, so features G, H, I and J are not available. On the other hand, security is achieved by using hybrid protocol based on public and private keys; however this requires bigger processing requirements that are not suitable for many mobile devices. Ravi (2004) offers very poor security: data is only encoded (not encrypted); access rights are based on a plain user-id.

Table 2. Available Tools for Sending Alerts Using Mobile Messaging

Tools	Admin. tools			Notification Models			Technological advantages				
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
[6]	Y	N	N	N	Y	N	N	*	*	N	N
[7]	Y	N	Y	N	Y	N	N	N	Y	N	N
[8]	Y	N	N	N	N	N	N	N	Y	Y	N
[9]	Y	N	Y	S	Y	Y	N	N	Y	Y	N
[10]	N	N	N	N	Y	Y	N	N	Y	Y	N
[11]	N	P	Y	Y	Y	N	Y	Y	Y	Y	N
[12]	N	N	Y	Y	Y	N	*	*	*	*	P
[13]	N	N	Y	Y	N	N	N	N	Y	Y	P
[14]	N	N	N	N	Y	N	N	N	N	Y	N

Y = Yes,

N = No ,

P = Partially,

* = Not available

A Subscribers groups management

B Customize notification preferences

C Interoperability with existing systems

D Periodical

E Per event

F 2 Ways support

G Extensible to new messaging technology

H Multiplatform

I Hardware Independent

J Operator independent

K Security on transmitted msg

■ Opportunity areas

SMS Based Generic Model To send secure notifications in real time systems

After analyzing the previous work, we concluded that it was necessary to create a cheaper solution that eliminates all the disadvantages that the other tools have. Figure 1 shows the architecture of the proposed model.

Generic connectors

In order to be able to communicate the middleware with any data source (challenge A), we created a couple of documents (called generic connectors) based on XML [1]; the advantage of using XML is that publishers just need to generate (or “push”) two outputs based in our proposed XML structure.

The first output (called XMLAlertDef) is generated only once and is used by the publishers to describe what the alert consists of (See figure 2).

A typical XMLAlertDef document will include: the alert’s name, the alert’s description, who is the publisher,

how often information will be published, if it has support for two-way messaging and (optionally) the name and type of additional information that can be included as “extra_parameters” in the content of an alert’s message.

The second output (called XMLAlertData), is used by publishers to issue the message content of an alert, this document is generated when new information is registered at data sources (See figure 3).

The use of “extra_parameter” tags are very useful when the publisher wants to add more data granularity to the alerting service, for example, if the alerting service is Temperature of Mexico City the “extra_parameters” tags will probably include data like: humidity, UV Index, precipitation probability, etc. In the other hand, the subscriber can take advantage of the information contained in the “extra_parameter” tags to customize his notification preferences based on its contents.

The “extra_parameters” are also used to solve any kind of information related to a notification service (challenge B).

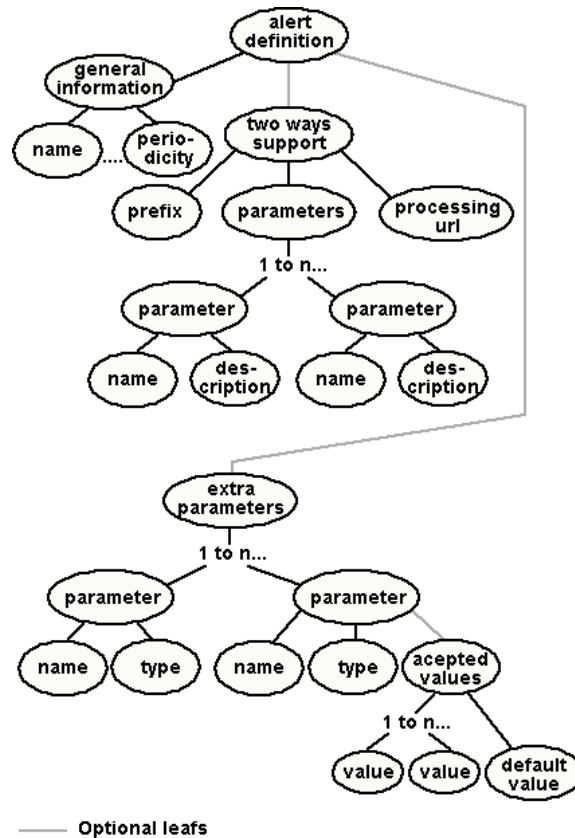


Figure 2. XMLAlertDef Document Structure

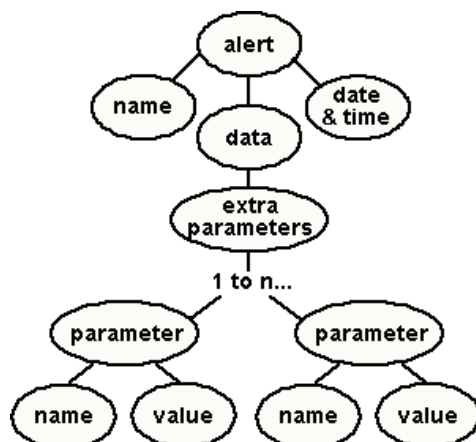


Fig. 3. XMLAlertData Document Estructure

Alert's monitor

This component works in three modes: per event mode, "two ways" mode and periodical mode.

Per event mode:

There are some scenarios where information is generated in a random, unpredictable or unexpected way, for example, an earthquake, a fault in a power station, the increase or decrement of auctions, etc. On this type of scenarios, the "per event" monitoring mode is used.

Similar to the "event streams" described in Chen (2002), in the per event mode, publishers have the responsibility to identify and deliver new information. It is more efficient that the publisher "push" information when generated instead of having a monitor checking continuously data sources and consequently consuming resources such as bandwidth, DB connections, processor time, etc.

The monitor is "listening" for new data and when this occurs it verifies the authenticity of the data source and if it is valid, proceeds to create a list of subscribers for that alerting service. Later, for each subscriber, it carries out a process called "parameters collation" (explained in section 4.3) to verify if the received data "matches" with the user's notification preferences. In the case of a match, it checks on which mobile equipment and MMT the notification must be sent.

Finally, based on that information, the middleware adapts and dispatches the message using the appropriate Mobile Messaging Gateway (MMG). A MMG is a hardware and software component that serves as an access point to other networks; it makes the

conversion of protocols between different types of networks or applications. Figure 4 shows the flow diagram for this mode.

"Two ways" mode:

In this mode, the way that information travels is different; in this case the mobile user sends a request using a message (See figure 5). This message includes a prefix, 2-ways parameters and the source's equipment ID. The "prefix" parameter is used by the monitor to identify the alerting service which will process the request, the 2-way parameters are optional and they are used by the data source system as a filter of information, finally the equipment ID is later used by the MMG to return to the subscriber the results of the query.

Periodical mode:

This monitoring mode is used when information at data sources is generated on a regular basis, so the middleware knows how often new information will be available. Examples of this type of information are the amount of sales in a week, the daily price of fuel and other raw materials, the monthly complaint summary, etc.

This mode is similar to per event mode, the only difference is that the monitor is continuously consulting data sources (based on the notification period specified by the publisher).

The minimal time for monitoring is every hour and the maximum is every year. When new information is discovered, a similar process like "per event mode" is carried out.

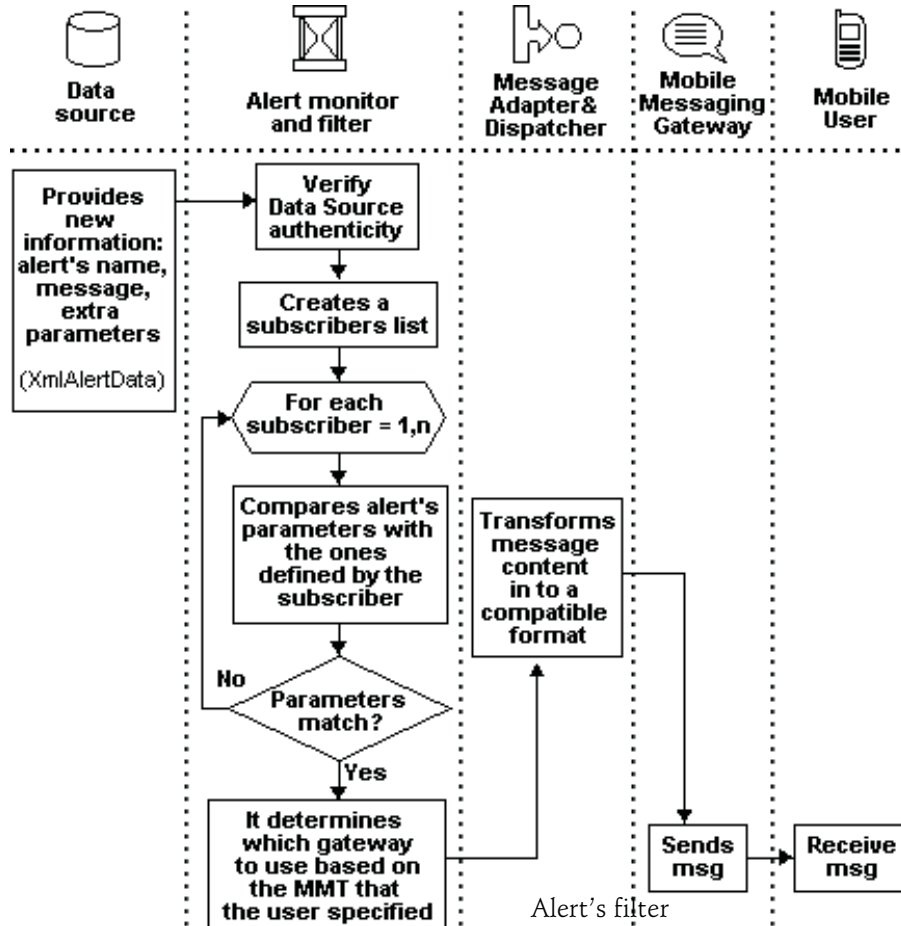


Figure 4. "Per Event" monitoring mode

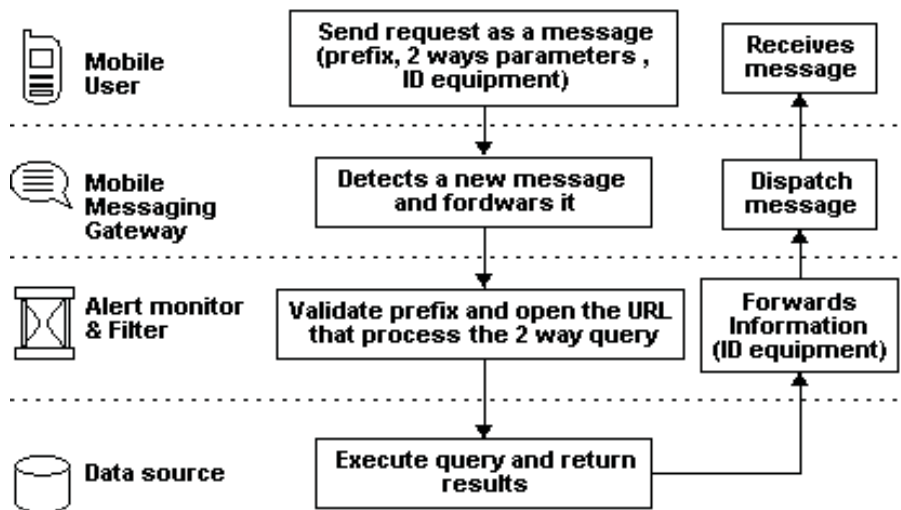


Figure 5. "Two ways" monitoring mode

With this component, the middleware determines if an alert must be sent to a subscriber or not. This is achieved by doing a Parameters Collation Process (PCP). See figure 6.

The PCP analyzes and compares each “extra_parameter” tag included in the XMLAlertData Document against the parameters that were customized by the subscriber. In the case that all the “extra_parameter” values satisfy the conditions indicated by the

subscriber, the alert must be sent. On the contrary, the alert should be ignored.

Figure 6 shows an example of the PCP, in that example, Subscriber A is the only one who is going to receive an alert because all his conditions are satisfied.

The PCP is a novel feature that allows subscribers to customize their notification preferences when no alert’s history is stored in the middleware’s database. The PCP was not found in any of the related work (challenge E).

XMLAlertData

```

<alert>
  <name> Temperature of Mexico City </name>
  <date> 01/02/2007 </date>
  <time> 13:00 </time>
  <message> 26 Celsius grades </message>
  <extra_parameters>
    <extra_parameter>
      <name> UV Index </name>
      <value> High </value>
    </extra_parameter>
    <extra_parameter>
      <name> Humidity </name>
      <value> 20 </value>
    </extra_parameter>
  </extra_parameters>
</alert>
  
```

Subscriber's notification preferences (database view)

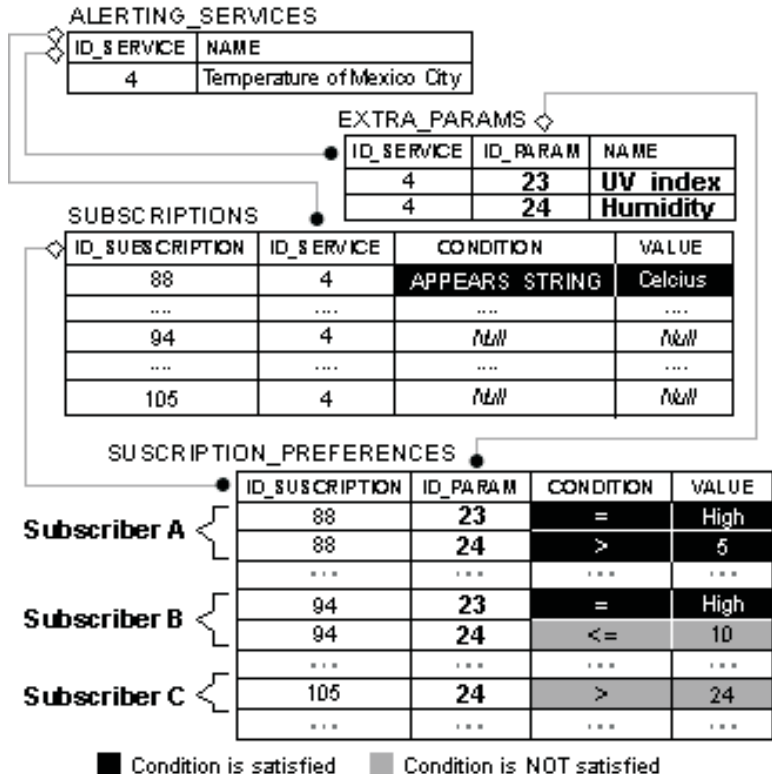


Figure 6. Example of the Parameter Collation Process (PCP)

Our middleware also offers templates that include common notification preferences, with this feature a subscriber can save time at the customization of notification preferences process. In future work, our middleware will include Artificial Intelligent techniques to decide when an alert should be sent based on the alerts sent to subscribers in the past.

Message adapter and dispatcher

Based on Haneef *et al.* (2004) we developed a Message Adapter (MA) component, that transforms the content of a message in to a proper format in order to suite the capabilities of the target device, for example, if the subscriber wishes to receive an alert via MMS the MA transforms the content of the alert (the XMLAlertData Document) into SMIL [3]. SMIL is the used language for creating MMS messages. If another subscriber wants to receive an alert as an e-mail then the MA transforms the message into HTML, etc. The MA uses XSLT [4] as its core technology (see figure 7).

With XSLT the rules about how the middleware has to transform an alert into specific format are provided as external instructions that can be updated or removed without affecting the middleware's operation. If a new MMT is created and the middleware wants to use it, the middleware's administrator only needs to register the new MMT and attach its corresponding XSLT document.

By using a MA the middleware is extensible to other messaging technologies (so challenge D in figure 1 and feature G in table 2 is achieved).

The MA is a feature that was not found in any of the previous work. We succesfully tested our MA transforming XMLAlertData to SMS, HTML and email. Future work will include voiceXML, SMIL and SVG transformations.

Message encrypter & decrypter

As we mentioned in section 2, we focused on the use of SMS as a default MMT. However, SMS does not consider any security features, hence, information is transmitted as plain text, and therefore, it is susceptible to malicious attacks like eavesdropping and data alteration (Talukder, 2003).

This is a problem when the type of information to be transmitted is classified. To avoid these problems we propose a Message Encrypter (ME) in the middleware and a Message Decrypter (MD) at the end user's mobile equipment, as illustrated in figure 1.

The message Encrypter seeks (inside of the middleware database) the subscriber's password and uses it as a symmetric key to encrypt the message to be sent. The subscriber's password was previously provided when the user subscribed to an alerting service. Figure 8 shows the message protection process.

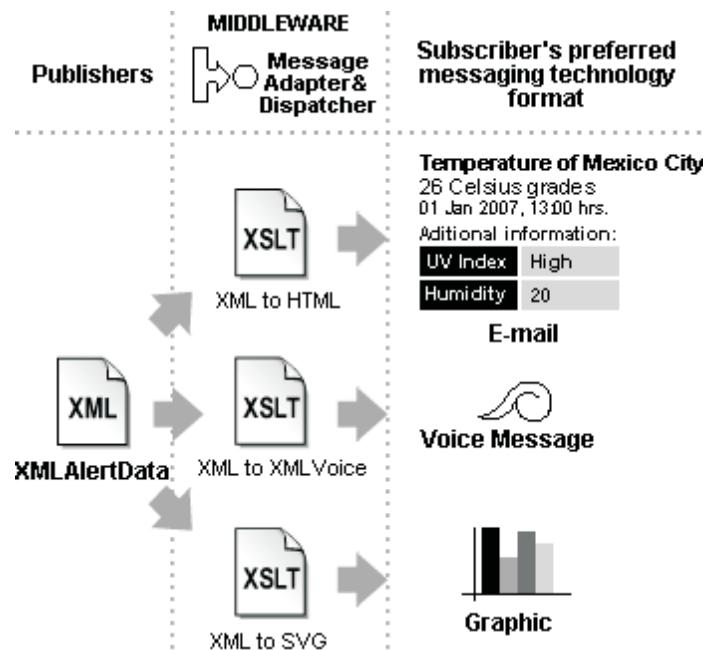


Figure 7. Examples of Different Formats Generated by the MA

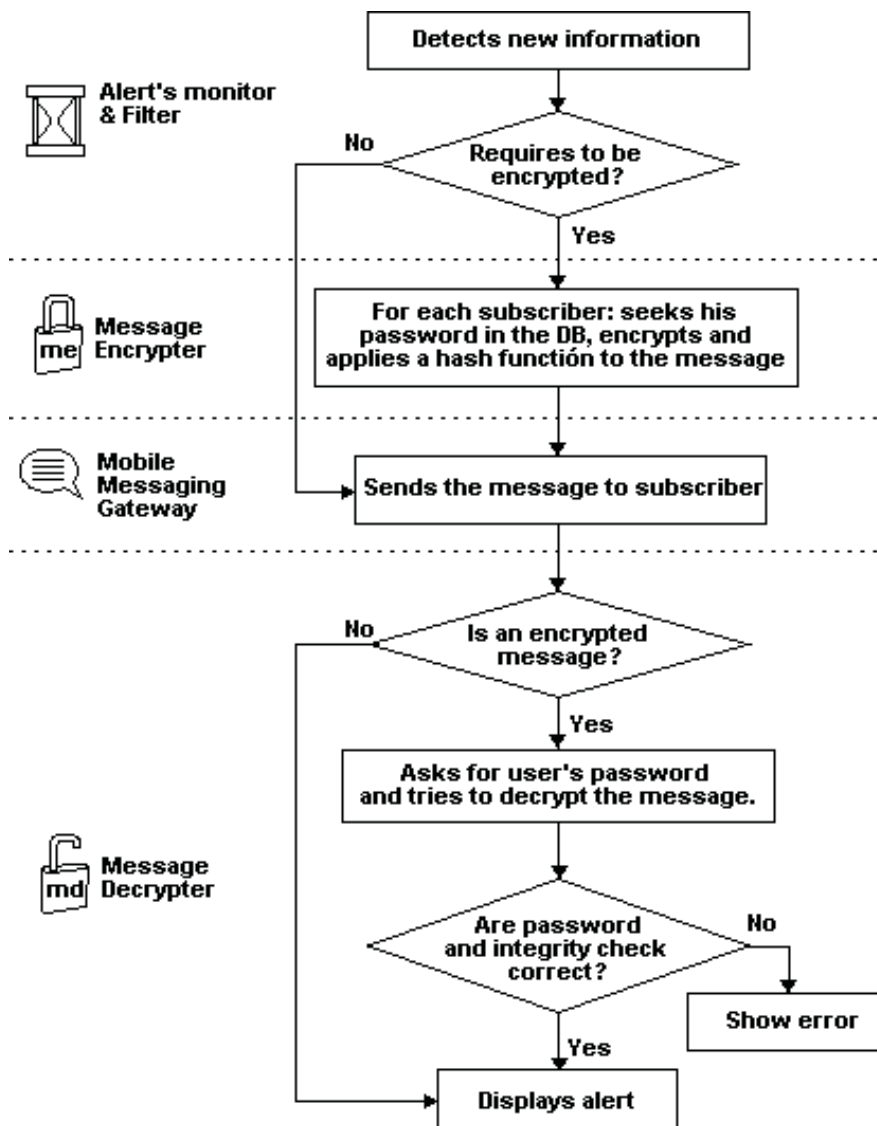


Figure 8. Message Protection Process

The use of an encrypter and decrypter component is a feature was not found in any of the related work and that is used to assure the confidentiality of SMS (challenge C). Authentication is out of the scope of our middleware, because this is done when the subscribers registers his mobile equipment to the notification service. We assume that additional authentication is made by the mobile carrier when the subscriber's mobile is connected to the network.

With the encrypter and decrypter components, our model is a cheap and safe solution that can be used to deliver confidential SMS in several domains where information is classified, for example, to send a password

to activate a system, a credit card number for bank transactions, the name and diagnosis results of a patient in a hospital, the amount of sales of a store, the geographic coordinates of an important shipment, etc.

Implementation

The proposed model was implemented and distributed in several hardware and software components. Currently, it is being successfully used in a real world application at the Comisión Federal de Electricidad (CFE) (2007) to deliver secure alerts related to critical events registered in the main power generation

plants of our country. CFE is the utility company in Mexico. Figure 9 shows the distribution diagram of the implemented model. However, a smaller hardware and software distribution can be made to reduce costs which would be easy to install in small businesses.

The alert monitor and filter, the message encrypter and the message adapter and dispatcher were implemented as a Java 2 SE desktop application, which operates as thread that is continuously executed to search new alerts.

Another important part of our implementation is mAlert, which is a web application where the middleware's administrator can register and manage alerting services, supported devices, MMTs, MMGs and subscribers. Additionally, mAlert provides a public area where mobile users can subscribe to alerting services and customize their notification preferences (see figure 10).

Concerning the confidentiality and integrity of SMS, the Message Encrypter and the Message Decrypter was implemented using symmetric cryptography based on AES (Daemen, *et al.*, 2002) and SHA-2 (Eastlake *et al.*, 2006). We selected AES algorithm because it is the best and current encryption standard,

and there is a current implementation available. A stronger cryptosystem is not required because the alert's data is not considered to be top secret stuff.

Message Decrypter was specifically implemented as a mobile application (MIDlet) based on J2ME [2] / MIDP2.0 (2002) that can be executed in a PDA or a Cell Phone, this application is listening for incoming ciphered SMS at a specific port number.

When a new secure SMS arrives at the mobile device the application is launched and asks the user for a valid password in order to display the message, as illustrated in figure 11.

In order to send secure SMS to a specific port number in a mobile device, we developed our own SMS gateway (called *mGateway*). *mGateway* is a multiplatform application (created in Java) that is capable to manipulate (Through AT Commands, 2003 in PDU mode) any cell phone or GSM MODEM (based on ETSI standard) connected by a COM port to send SMS. *mGateway* includes inside of the SMS message information about: the port number where the message has to be sent (port addressing), the size of the message, the payload, the digest and other extra parameters, as illustrated in figure 12.

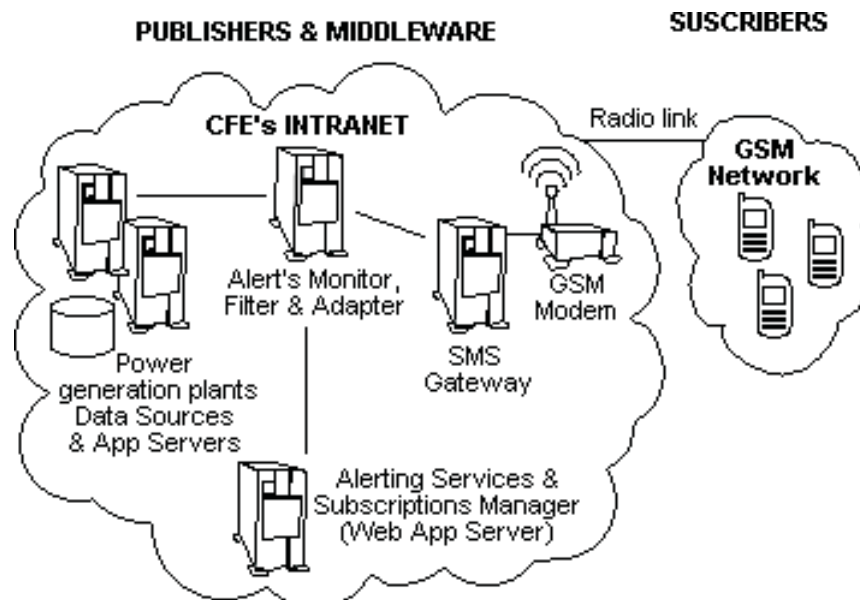


Figure 9. Distribution diagram for medium and large size companies



Figure 10. Web interface for customizing notification preferences



Figure 11. Message Decrypter main user interfaces

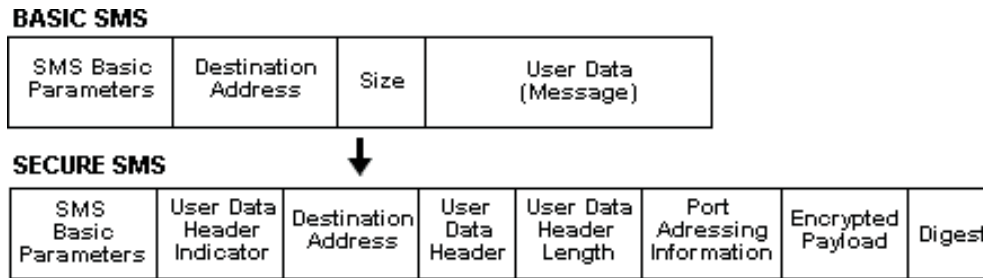


Figure 12. Secure SMS format created by mGateway

Potential applications

Although our current implementation is being used by the utility sector, our model can be extrapolated to other domains like banking services, logistic and financial services. The following is a list of examples where the proposed model can be used:

1. Alerts about unsafe operation levels in production plants.
2. Notifications about fuel price variations.
3. Earthquake and infrastructure impacts reports.
4. High traffic warnings.
5. Bad weather and disaster alerts.
6. Notification of expired payments.
7. Notification of important banking transactions.
8. Notification of daily revenues in small business.
9. Low stock warnings.

Future work

During the testing of our work we identified that performance and wait times presented a variation between different mobile devices, network technologies and network providers.

Future work will implement a similar model like the one is exposed in Wittie *et al.* (2007), in order to manage a fine tuning to our application code to ensure consistent behavior across platform types and network providers, and by consequence to assure a good application usability and performance.

Conclusions

There are many areas where the benefits of mobile messaging can be exploited. The proposed model provides an easy and fast way to implement it.

Our current implementation has contributed to the decision making process of the CFE's power generation area. It is being successfully used at 300 thermoelectric power plants where supervisors can be well informed

about failures and anomalies in the production process. In the near future, the CFE will use our implementation to provide alerting services about unsafe water levels in dams at hydro power plants.

The use of XML as a universal connector for publishing alerts facilitates the integration of existing information systems with the proposed middleware.

The use of "extra_parameters" tags allows storing any kind of information about an alert and helps to provide a depth level of granularity in the contents of an alert.

The Parameter Collation Process (PCP) takes advantage of the existence of the "extra_parameters" tags in order to allow subscribers to customize their notification preferences. Both PCP and "extra_parameters" are useful and novel features that were not found in any of the related work.

The use of XSLT converts our model to an extensible tool to new mobile messaging technologies. The integration of encryption mechanism and the use of SHA-1 contribute to the area of security of SMS, which was not considered by its creators.

The creation of a Java based mobile messaging gateway capable of connecting to GSM modems via serial communication offers great flexibility to companies that need to incorporate SMS based services at a lower cost, because they do not require expensive hardware, a specific cell phone carrier, and a specific operating system.

Acknowledgments

This research was supported by research grants from the Mexican Electric Research Institute (IIE).

References

- AT Command Set for User Equipment (UE) 3GPP TS 27.007 V3.13.0 (2003-03). 3rd Generation Partnership Project.
- Bulk SMS India-NonStopSMS.com-India's First Website Dedicated to Bulk SMS solutions [on line]. [January 10, 2006]. Available on: <http://www.nonstopsms.com>.

- Comisión Federal de Electricidad (CFE). Mexico's Utility Company [on line]. [January, 2007]. Available on: <http://www.cfe.gob.mx/en>.
- Daemen J., Rijmen V. *The Design of Rijndael: AES-The Advanced Encryption Standard*. Springer-Verlag. 2002. ISBN: 3540425802.
- Dantas M.A.R., Baggio R.K. A SMS Tool for Alerts and Monitoring of a High Availability Cluster Environment. IEEE 19th International Symposium on High Performance Computing Systems and Applications, 2005, pp. 307-11. ISBN: 0 7695 2343 9. 15-18 May 2005, Guelph, ON, Canada.
- Drumea A., Svasta P., Popescu C. Remote Access Solutions for Industrial Control Systems. 27th International Spring Seminar on Electronics Technology: Meeting the Challenges of Electronics Technology Progress, Vol.1, Pages 30-35. IEEE, Institute of Electrical Engineers. 13-16 May 2004.
- Eastlake D., Hansen T. US Secure Hash Algorithms (SHA and HMAC-SHA), RFC 4634 [on line]. [July 2006]. Available on: <http://tools.ietf.org/html/rfc4634>
- Chen G., Kotz D. Solar: An Open Platform for Context-Aware Mobile Applications. In Proceedings of the First International Conference on Pervasive Computing, pp. 41-47, June, 2002.
- Haneef A., Ganz A. ANMoLe—An Adaptive Multimedia Content Delivery Middleware Architecture for Heterogeneous Mobile Multi-Device Neighborhoods. *International Journal of Multimedia Tools and Applications* (Kluwer Academic Publishers), 22(2):171-186, February 2004.
- Jain R., Puglia S., Wullert J., Parmeswaran K., Bakker J. The Mobile Application Server (MAS): An Infrastructure Platform for Mobile Wireless Services. *Information Systems Frontiers*, 6(1):23-34. Mar. 2004. ISSN: 1387-3326. Springer Netherlands.
- Le Bodic G. *Mobile Messaging Technologies and Services: SMS, EMS and MMS*. John Wiley & Sons. 2003. P. 36. ISBN: 0-470-84876-6
- Message Master™ Enterprise Alert, SMS Software for Enterprises. Deraldack GmbH. Germany [on line]. [February 15, 2006]. Available on: <http://www.deraldack.com/products/EA.htm>.
- Mobile Information Device Profile 2.0 Java Community [on line]. [2002]. Available on: <http://jcp.org/aboutJava/communityproess/final/jsr118/index.html>
- Olgún-Sánchez J. Quintuplican envío de mensajes cortos [on line]. Pagina oficial de la Presidencia de la República [January 10, 2006]. Available on: <http://www.presidencia.gob.mx/buscador/index.php?contenido=17470&pagina=1&palabras=sms>.
- Ravi S., Chathish M.S., Prasanna H. WAP and SMS Based Emerging Techniques for Remote Monitoring and Control of a Process Plant. On: 7th International Conference on Signal Processing Proceedings (ICSP'04), 2004, p. 2672-2675. ISBN: 0-7803-8406-7. IEEE, Institute of Electrical Engineers. Aug 31-Sep 4 2004, Beijing, China.
- Small Screens a Global Vision, The Net Size Guide*. Net Size S.A. Paris France. February 2006. ISBN: 2 -9523533-1-X
- SMS Messaging Software From NotePage. NotePage Pro [on line]. [January 12, 2006]. Available on: <http://www.note-page.net/>.
- Talukder-Asoke K. Information Assurance and Security needs in an ASP/MVNO Environment for Pervasive Content through SMS/GSM. International Conference on Communication and Broadband Networks. May 5-7, 2003. Bangalore, India.
- Technical Realization of the Short Message Service (SMS), Release 1998, 3GPP TS 03.40 V7.5.0 (2001-12). 3rd Generation Partnership Project (3GPP). France, 2002.
- Telcel-DATUM. SMS Alerts Generated by Systems Logs [on line]. [January 10]. Available on: [2006http://www.datumtelcel.com/fr_contenidos.html?op=01](http://www.datumtelcel.com/fr_contenidos.html?op=01).
- What is NowSMS? [on line]. [February, 2006]. Available on: [NowSMS.com](http://www.nowsms.com/whatisnowsms.htm).
- Wams J., Van Steen M. A Flexible Middleware Layer for User-to-User Messaging. In Proc. 14th International Conference on Distributed Applications and Interoperable Systems, Lecture Notes on Computer Science, Nov. 2003. Springer-Verlag, Berlin.
- Wittie M.P., Stone-Gross K.C. Almeroth and Elizabeth M. Belding. MIST: Cellular Data Network Measurement for Mobile Applications. Proceedings of IEEE Broadnets, Raleigh, NC. September 2007.
- [1] [Extensible Markup Language (XML). World Wide Web Consortium (W3C) [on line]. Available on: <http://www.w3.org/XML/>.
- [2] [Java ME-Micro App Development Made Easy. Java Technology [on line]. Available on: <http://java.sun.com/javame/index.jsp>
- [3] [SMIL, The Synchronized Multimedia Integration Language. World Wide Web Consortium (W3C) [on line]. Available on: <http://www.w3.org/AudioVideo/>
- [4] [XSL Transformations (XSLT). World Wide Web Consortium (W3C) [on line]. Available on: <http://www.w3.org/TR/xslt>

About the authors

Israel Galván-Bobadilla. Received the B.S. degree in computer systems from Universidad de Occidente, Campus Guasave, Sinaloa, Mexico, in 2000 and the Masters degree in Computer Science from the Tecnológico de Monterrey, Mexico, in 2006. Since 2001, he has been with the Electrical Research Institute, Cuernavaca, Morelos, Mexico, where he has developed several information systems for the Mexican power sector.

Martín Santos-Domínguez. Received the B.S. degree in Physics from Universidad de Veracruz, Mexico, in 1987 and the M.S. degree in fiber optics from the University of Salford, England, in 1994. He has experience in the development of virtual instrumentation systems and image processing, LAN/WAN networks design, installation and management; he also has worked in the multimedia applications field with the use of integrated audio and video services. Since 1998, he has been with the Department of Information Systems at the Electric Research Institute, Mexico, where he is a Project leader. He has directed numerous information system projects for the Mexican Petroleum Company and the CFE (the main utility company of Mexico).

Jesus Arturo Pérez-Díaz. Obtained his B.Sc. degree in Computer Science from the Universidad Autonoma de Aguascalientes, Mexico, in 1995. He worked as a system and network administrator in the Aguascalientes city hall. He got his PhD Degree in Computer Science in the University of Oviedo in 2000. During his PhD studies, he carried out research in mobile agents and published around 12 research papers in magazines and international conferences and became a full associate member of the European founded research project AgentLink. Nowadays he is a researcher and professor in the Tecnológico de Monterrey, Campus Cuernavaca and member of the Mexican Researchers National System, his research field focus in network security and wireless communications. Currently Jesús Arturo Pérez-Díaz holds the recognized Cisco certifications CCNA and CCAI, which allows him to give Cisco certification courses. He has given security courses in some European and South American Universities.

Cuantificación de energía de una planta mareomotriz

Tidal Power Plant Energy Estimation

López-González J.
Instituto de Ingeniería
Universidad Nacional Autónoma de México.
E-mail: JlopezGo@iingen.unam.mx

Hiriart-Le Bert G.
Instituto de Ingeniería
Universidad Nacional Autónoma de México.
E-mail: gerardo367@yahoo.com.mx

Silva-Casarín R.
Instituto de Ingeniería
Universidad Nacional Autónoma de México.
E-mail: RSilvaC@iingen.unam.mx

(Recibido: agosto de 2008; reevaluado: agosto de 2009; aceptado: agosto de 2009)

Resumen

Se presenta una metodología que permite estimar de manera rápida y sencilla el potencial de energía que puede ser extraído a través de una planta mareomotriz. La evaluación se realiza utilizando un nomograma normalizado que es función del área del embalse versus la capacidad eléctrica instalada, para así obtener el potencial energético en una zona en particular. Los resultados contemplan dos formas de operación, una llamada en flujo y otra en flujo-reflujo, además, dos esquemas de embalse (sencillo y doble embalse). Para la elaboración del nomograma normalizado se utilizaron los resultados numéricos de la simulación de múltiples plantas mareomotrices bajo diferentes escenarios durante un año de operación. Los escenarios fueron establecidos variando la potencia instalada, condiciones de aprovechamiento en flujo, reflujo o ambos, así como embalse sencillo o doble con información del nivel del mar cada 15 min. Para validar el modelo se utilizó información de la mareomotriz de La Rance, Francia, que incluye datos sobre la producción, potencia instalada, propiedades de las turbinas y niveles de la marea, obteniéndose una muy buena correlación entre los resultados del modelo numérico y los reportados en varios reportes técnicos.

Descriptor: energía mareomotriz, energía renovable, potencia instalada.

Abstract

In this paper a methodology is presented which allows a quick and simple means of estimating the potential energy that can be obtained from a tidal power plant. The evaluation is made using a normalised nomograph, which is a function of the area of the tidal basin against the electricity installed capacity to thus obtain the potential energy for any

location. The results describe two means of operation, one of "flow tide" and the other "flow-ebb tides", with two tidal basin systems operating: single and double reservoir systems. To obtain the normalised nomograph the numerical results for simulations of several tidal power plants under differing operational conditions over a period of one year. These conditions were established by varying the electricity installed capacity, the hydraulic conditions in "flow tide", "ebb tides" or both and with single or double reservoir systems and using sea level information taken every 15 minutes. To validate the model information from the tidal power plant at Rance, France, was used, which includes data concerning production, electricity installed capacity, turbine characteristics and tidal ranges. A very good correlation was found between the results of the numerical model and those reported in various technical reports.

Keywords: Tidal power, renewable energy, installed capacity.

Introducción

La evolución de las sociedades a nivel mundial ha estado acompañada de una dependencia de dispositivos eléctricos que demandan grandes cantidades de energía para trabajar. En los últimos años, el crecimiento de la población de las grandes ciudades, particularmente las industrializadas, es del orden del 2% más alto que el promedio mundial y el incremento de demanda de energía reporta la misma tendencia. A medida que las sociedades incrementan su confort en el estilo de vida, la demanda de energía es mayor, lo cual se refleja en el consumo energético relativo de los países más industrializados, que con una población del 25% consume el 75% de la energía mundial (Fells, 1990).

Una forma de producir energía eléctrica es usando combustibles fósiles, pero el impacto negativo que ocasiona (calentamiento global) y los altos costos del mismo (Ballenilla, 2004), han hecho que muchos gobiernos de diferentes países realicen esfuerzos muy importantes en la utilización de fuentes renovables de energía (Dincer, 2000). Sin duda, el océano es una de estas fuentes de energía renovable, ya que en él, se concentra la energía del sol, viento y las fuerzas de atracción del sol y la luna. Se puede decir que casi todas las fuentes de energía provienen del sol; la energía solar proporciona un flujo continuo de energía necesaria para el crecimiento de cosechas vía fotosíntesis, gradiente térmico en la superficie terrestre y en el mar, el cual deriva en vientos, que a su vez generan oleaje y por supuesto lluvia, factor primordial para la generación hidroeléctrica, la cual es una de las primeras formas de energía renovable.

Los científicos han realizado numerosos estudios para conocer y aprovechar la energía oceánica; sin embargo, en algunos casos los fondos para realizar tales investigaciones no son suficientes para completar adecuadamente los estudios y definir la mejor manera de

aprovechar el potencial de esta fuente de energía (Fells, 1990). El entendimiento científico de los fenómenos físicos y las formas de energía es la primera parte de la explotación de la energía. La construcción de centrales eléctricas en el océano, es un poco más difícil de llevar a cabo, debido a la variabilidad de los recursos y el alto costo de construcción y mantenimiento.

La idea de aprovechar la energía contenida en las mareas no es nueva. Desde 1890, varias ideas y patentes surgieron y la mayoría de ellas eran francesas. La idea de usar la energía del océano para producir electricidad es más antigua; a pesar de que Romanoski en 1950, analizó la energía térmica del oleaje y de mareas, la energía mareomotriz ha sido usada por cientos de años antes (Charlier *et al.*, 1993) y (Charlier, 1982).

El océano tiene una cantidad enorme de energía, muchos estudios muestran que esta cantidad es de alrededor de 5 millones de MW, pero por supuesto la realidad es que solo una fracción mínima de esta energía es posible aprovechar.

Modos de operación

Una instalación mareomotriz con un embalse puede operar cuando:

- 1) La marea está entrando (**flujo**),
- 2) Cuando la marea está saliendo (**reflujo**) y
- 3) En los dos sentidos (**Flujo y reflujo**), adicionalmente se le puede instalar un sistema de bombeo de agua en horas no pico para aumentar el desnivel (Charlier *et al.*, 1993).

1. Modo de Flujo: Consiste en la generación de energía eléctrica cuando la marea está ascendiendo y el nivel de agua en el embalse es inferior al nivel de la marea; entonces, la generación de energía se

realiza cuando el flujo del agua es del mar hacia el embalse.

2. Modo de Reflujo. Consiste en la generación de energía eléctrica cuando la marea está descendiendo, de modo que cuando la marea está ascendiendo, se permite el paso del agua hacia el embalse por medio de unas compuertas, hasta alcanzar el nivel máximo, para permitir luego el paso del agua por las turbinas cuando la marea está descendiendo y el flujo del agua es del embalse hacia el mar. Generalmente, el paso del agua por las turbinas no ocurre hasta que se tiene cierta diferencia entre el nivel del embalse y el nivel de marea fuera del mismo.
3. Modo de flujo y reflujo. Este tipo de generación de energía consiste en aprovechar el ascenso y descenso de la marea, mediante una combinación de los dos modos anteriores.

Con estos modos de operación hay intervalos en los que no se tiene generación, debido a que los niveles del agua dentro y fuera del embalse son los mismos, para lo cual existe el esquema de doble embalse, en el cual, en uno de los embalses sólo se permite la entrada de agua, cuando el nivel en el mismo es menor que la marea (embalse alto) y en el otro sólo se permite la salida del agua cuando su nivel de agua es mayor que la marea y los generadores se encuentran instalados entre estos dos embalses en los cuales, dependiendo del volumen del

embalse y la potencia instalada siempre tendrá un desnivel para generar la mayor parte del tiempo.

Sitios

La cantidad de energía que es posible aprovechar, está directamente relacionada con la amplitud de la marea, pero también es importante la cantidad de turbinas y el área del embalse. La correcta combinación de estos tres factores dará como resultado mayores beneficios a través de una mayor eficiencia.

Hay varios lugares en el mundo que presentan las condiciones óptimas para aprovechar las mareas para la generación de energía, con variaciones de hasta 16 m. Hoy en día, el desarrollo de las turbinas sólo permite aprovechar carreras de marea mayores a 5 m y por el momento, rangos de marea menores a 5 m no son convenientes en virtud que su eficiencia es muy baja. La figura 1 muestra los sitios a nivel mundial que tienen mareas importantes, entre las cuales cabe destacar: Severn River (Reino Unido), Kimberleys (Australia), Cabo Tres Puntas (Argentina), Passamaquoddy (U.S.A.) y la bahía Fundy (Canada) (Charlier, 2002). Algunos de estos sitios ya cuentan con instalaciones como se muestra en la tabla 1, y otros sitios en estudio con buen potencial mareomotriz se muestran en la tabla 2, donde se puede observar que México se encuentra entre estos sitios, con mareas del orden de 6 m en el alto Golfo de California. Corea y China han estudiado la posibilidad de construir

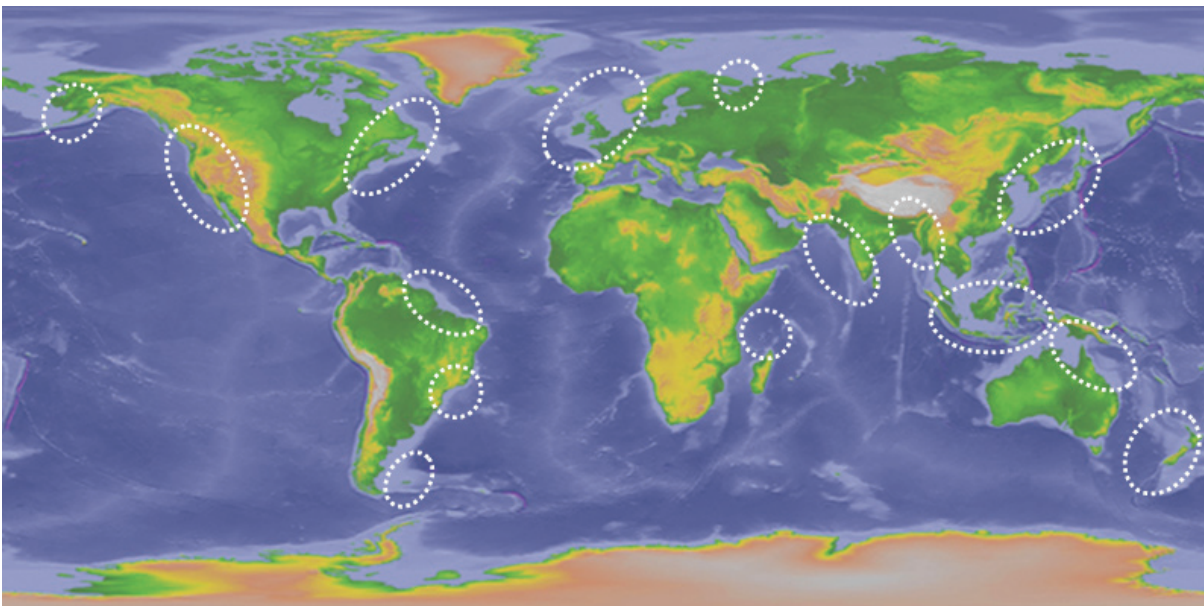


Figura 1. Sitios en el mundo con importantes rangos de marea

algunas instalaciones y han estimado alrededor de 2,000 GWh por año de producción anual con plantas mareomotrices en Shiwa, Garolim y Incheom. Los estudios en China no son nuevos, en el reporte "Collection of Oceanographic Works" (2003) se presentó el potencial de energía mareomotriz para el periodo de 1950-1990.

Aunque hay varios lugares apropiados para aprovechar este tipo de energía y se cuenta con la ingeniería para hacerlo, aún existen muchos problemas por resolver como: impacto ambiental, factibilidad económica y despacho de energía de acuerdo a una curva de demanda (Charlier, 1988) y (Song WO, 1987).

Tabla 1. Instalaciones mareomotrices

Nombre de la Mareomotriz	Fecha de puesta en servicio	Rango Marea (m)	Área del Embalse (km ²)	Núm. de turbinas instaladas	Potencia instalada MW	Generación GWh/año
La Rance (Francia)	1966	8	17	24	240	540
Anápolis Royal (Canadá)	1984	10.8	6	1	16	30
Jiangxia (China)	1980	7.1	2	1	3.2	11
Kislaya Bay (Rusia)	1968	2.4	2	1	0.4	3.5
Severn (Reino Unido)	2000	7	520	en estudio		

Tabla 2. Emplazamientos más destacados para el aprovechamiento de centrales mareomotrices (continúa ...)

País	Emplazamiento	Altura media de marea m	Superficie embalsada km ²	Potencia estimada MW	Producción aproximada GWh/AÑO
Argentina	San José	5.9	778	5040	9400
	Santa Cruz	7.5	222	2420	
	Rio Gallegos	7.5	177	1900	
Australia	Bahía de Secure	7	140	1480	
	Ensenada de Walcott	7	260	2800	
Canadá	Cobequid	13.4	240	5338	14000
	Cumberland	10.9	90	1400	
	Shepody	10	115	1800	
Rusia	Bahía de Mezen	6.76	2640	15000	45000
	Penzhinsk, Mar de Okhost	11.4	530	87400	190000
	Bahía de Tugur	6.8	1080	7800	16200
USA	Turnagain Arm	7.5		6500	16600
	Knit Arm	7.5		2900	
	Pasamaquoddy	5.5			
India	Golfo de Khambat	6.8	1970	7000	15000
	Golfo de Kutch	5	170	900	
UK	Severn	7	520	8640	17000
	Mersey	6.5	61	700	

Tabla 2. Emplazamientos más destacados para el aprovechamiento de centrales maremotrices (... continuación)

País	Emplazamiento	Altura media de marea	Superficie embalsada	Potencia estimada	Producción aproximada
		m	km ²	MW	GWh/AÑO
UK	Duddon	5.6	20	100	
	Wyre	6	5.8	64	
	Conwy	5.2	5.5	33	
Corea	Garolim	4.7	100	400	
	Cheonsu	4.5			
México	Río Colorado	6.7			

Extracto de: Fernández-Díez P. *Energía Mareomotriz*. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética. Universidad de Catabria. Disponible en: <http://www.termica.webhob.info/>

Estimación de la potencia disponible

La energía potencial puede ser estimada con un modelo paramétrico, conociendo las características de la marea como: altura o las principales componentes armónicas, además de algunos coeficientes que en muchos casos contienen mucha incertidumbre (Charlier, 2003).

En este trabajo se presenta una forma alternativa para realizar una evaluación preliminar, la cual consiste en seleccionar la altura de diseño, el área del embalse y la potencia instalada. Por medio de una grafica se puede estimar la cantidad de energía que se producirá con esta combinación.

La energía potencial de la marea es directamente proporcional al rango de marea. En el caso particular de una mareomotriz, es la diferencia entre la elevación del nivel del mar y el nivel del embalse. Con la ecuación (1) es posible calcular la potencia de una instalación.

$$P = \gamma QH \quad (1)$$

donde:

H Es la diferencia de niveles entre el embalse y el mar, expresada en metros.

Q Gasto que pasa a través de las turbinas en m³/s.

γ El peso específico igual a la densidad por la gravedad por m³.

Q Puede ser calculado como:

$$Q = AV \quad (2)$$

donde:

A Es el área transversal de las turbinas (m²).

V Velocidad media en el área transversal de las turbinas (m/s).

V Puede ser calculada como:

$$V = Cd \sqrt{2gH} \quad (3)$$

Cd Coeficiente de pérdidas

Cuando la energía cambia o entra a un sistema, una parte de esta energía se pierde, debido a muchos factores, como pérdidas de fricción a lo largo de la trayectoria y cambios bruscos de sección y dirección entre otros, lo cual se puede tomar en cuenta con un factor de eficiencia a través de la relación entre la energía transformada y la energía disponible. Entonces, la ecuación de potencia quedaría de la siguiente manera:

$$P = \eta \rho A \sqrt{2gH}^{3/2} \quad (4)$$

η Factor de eficiencia incluye

Teniendo los datos de marea se puede conocer el nivel del mar en cualquier instante; sin embargo, el nivel en el embalse depende de cuánta agua está entrando o saliendo, lo cual depende del volumen de almacenamiento y gasto de descarga, que a su vez, depende del número de turbinas y su capacidad, así como de la altura entre un lado y otro del embalse (ΔH).

Se hizo un modelo numérico para simular el funcionamiento de una mareomotriz con datos discretos de marea a cada 15 min del puerto de San Felipe, en el alto Golfo de California (Mar de Cortés). Los datos de marea se muestran en figura 2, donde se aprecia un rango máximo de marea de 6 m aproximadamente.

Suponiendo una determinada área del embalse y seleccionando la potencia instalada fue posible calcular la energía de generación anual para esta combinación, posteriormente se modificó la potencia instalada y nuevamente se calculó la generación, de esta manera se construyó una curva de potencia instalada contra generación por kilómetro cuadrado.

Repitiendo la operación antes mencionada, se construyeron las curvas de potencia instalada contra generación para las diferentes formas de operación: Flujo, Flujo-reflujo y doble embalse.

Estas curvas se muestran en la figura 3. Con estas curvas es posible seleccionar cualquier valor de potencia instalada por kilómetro cuadrado y conocer la generación anual para el Alto Golfo de California.

De las curvas de la figura 3 es posible estimar la cantidad de energía de generación para cualquier combinación de potencia instalada y área del embalse para las diferentes formas de generación.

Hay que aclarar que para calcular la cantidad de energía se utiliza el área de la mareomotriz, por lo que en el caso del doble embalse el área a utilizar es el de los dos embalses.

El ejercicio de la tabla 3 se muestra la forma de cómo utilizar estas curvas con la misma área de la mareomotriz y misma potencia instalada.

Con la misma área y misma potencia instalada, el esquema de un solo embalse podría ser una mejor opción, ya que se obtiene más energía.

Sin embargo, existen intervalos sin generación, debido a que no hay desnivel entre el embalse y la superficie del mar.

Por el contrario, con el esquema de doble embalse es posible despachar la energía de una manera más uniforme (figura 4), por lo cual, el esquema de doble embalse se vislumbra como el más recomendable.

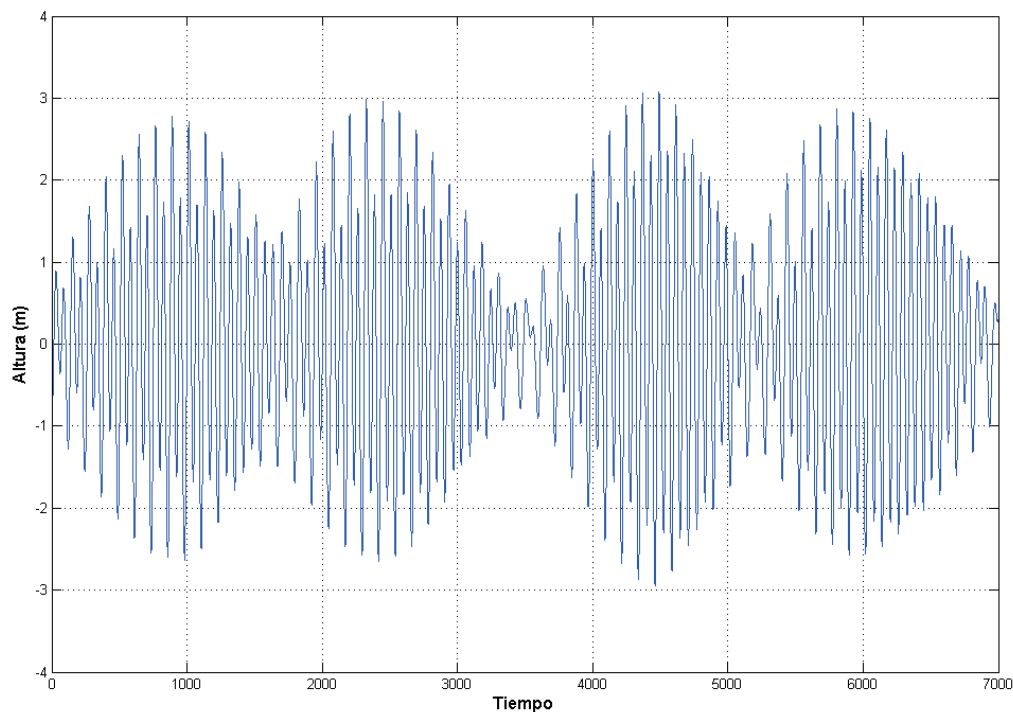


Figura 2. Marea en San Felipe

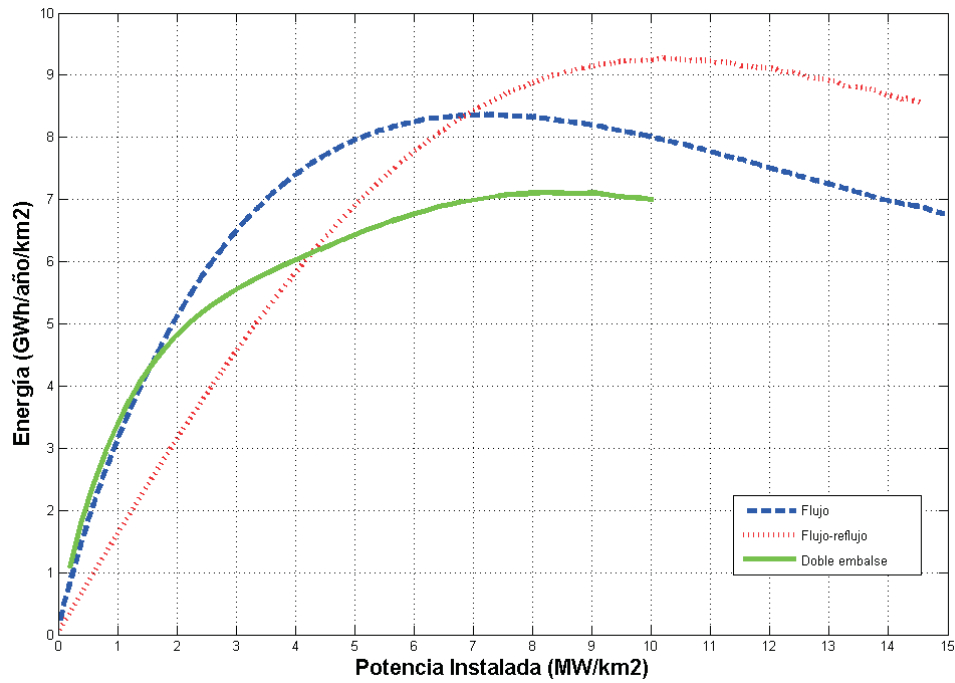


Figura 3. Generación en San Felipe

Tabla 3. Utilización de curvas con la misma área de la marea motriz y potencia instalada

	Área (km ²)	Potencia instalada (MW)	Índice del eje de abscisas	Índice en el eje de las ordenadas	Generación GWh/año
Un embalse modo de flujo	50	250	250/50=5	8	8×50=400
Doble embalse Área 50 km ² (un solo embalse 25)	50	250	250/50=5	6.5	6.5×50=345

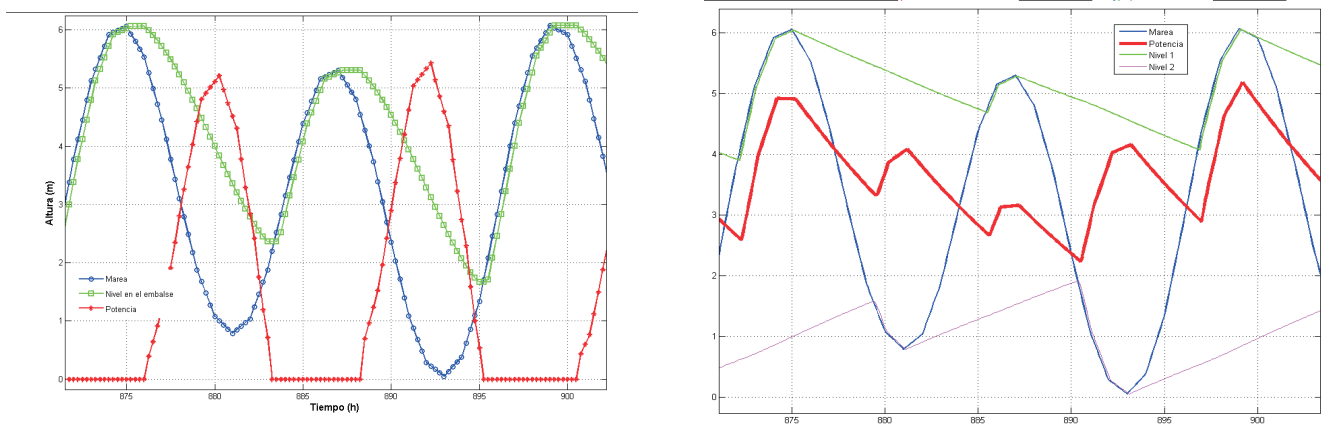


Figura 4. Generación con un embalse en modo de refluo y generación con doble embalse (azul marea, verde nivel en el embalse, rojo potencia)

Generalización

Con la figura 3 es posible conocer la generación en San Felipe, por la potencia instalada y el área del embalse. En forma general, para conocer la generación en diferentes partes del mundo, se utilizó un espectro de energía en el dominio del periodo para 3 sitios: San Felipe en México, La Rance Francia y Puerto Mont en Chile. Los tres sitios tienen marea semidiurna y el principal componente armónico es el Lunar M_2 , como se puede observar en la figura 5. Los diferentes picos que aparecen en esta gráfica se deben a que el intervalo de las muestras (Nyquist) no es un múltiplo de las frecuencias (Emery *et al.*, 2004). Sin embargo, en la tabla 4 se puede observar

que el único componente cercano a estos picos es la componente M_2 con periodo de 12.42 h.

Se puede inferir que es posible construir una sola curva para conocer la generación, ya que la única diferencia entre los tres sitios es la amplitud de marea. Una posibilidad es tomar las tres principales componentes armónicas y otra es utilizar un promedio de amplitud de marea (raíz media cuadrática), lo cual es sencillo de hacer.

Al igual que en San Felipe, con el modelo numérico se simuló la generación para Puerto Mont y La Rance y se construyeron curvas de potencia instalada contra generación para los diferentes modos de operación; estas graficas se muestran en las figuras 6 y 7.

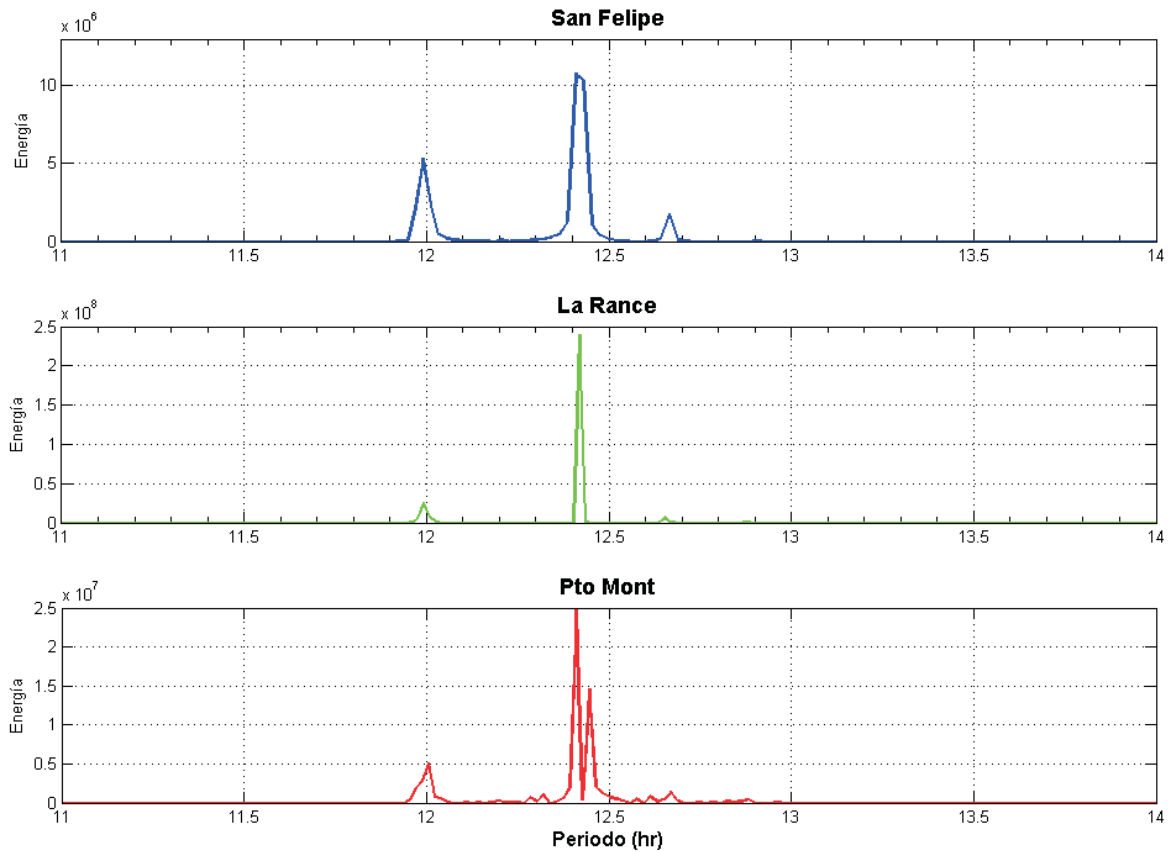


Figura 5. Espectro de energía

Tabla 4. Principales componentes armónicas de la marea

Núm.	Nombre de la componente armónica	Símbolo	Periodo (hr)	%M ₂
1	Principal lunar	M ₂	12.42	100.0
2	Lunisolar diurna	K ₁	23.93	58.4
3	Principal solar	S ₂	12.00	46.6
4	Principal lunar diurna	O ₁	25.82	41.5
5	Principal solar diurna	P ₁	24.07	19.4
6	Lunar elíptica Mayor	N ₂	12.66	19.2
7	Lunar quincenal	M _f	327.67	17.2
8	Lunisolar semidiurna	K ₂	11.97	12.7
9	Lunar mensual	M _m	661.30	9.1
10	Solar semi anual	S _{sa}	2191.43	8.0

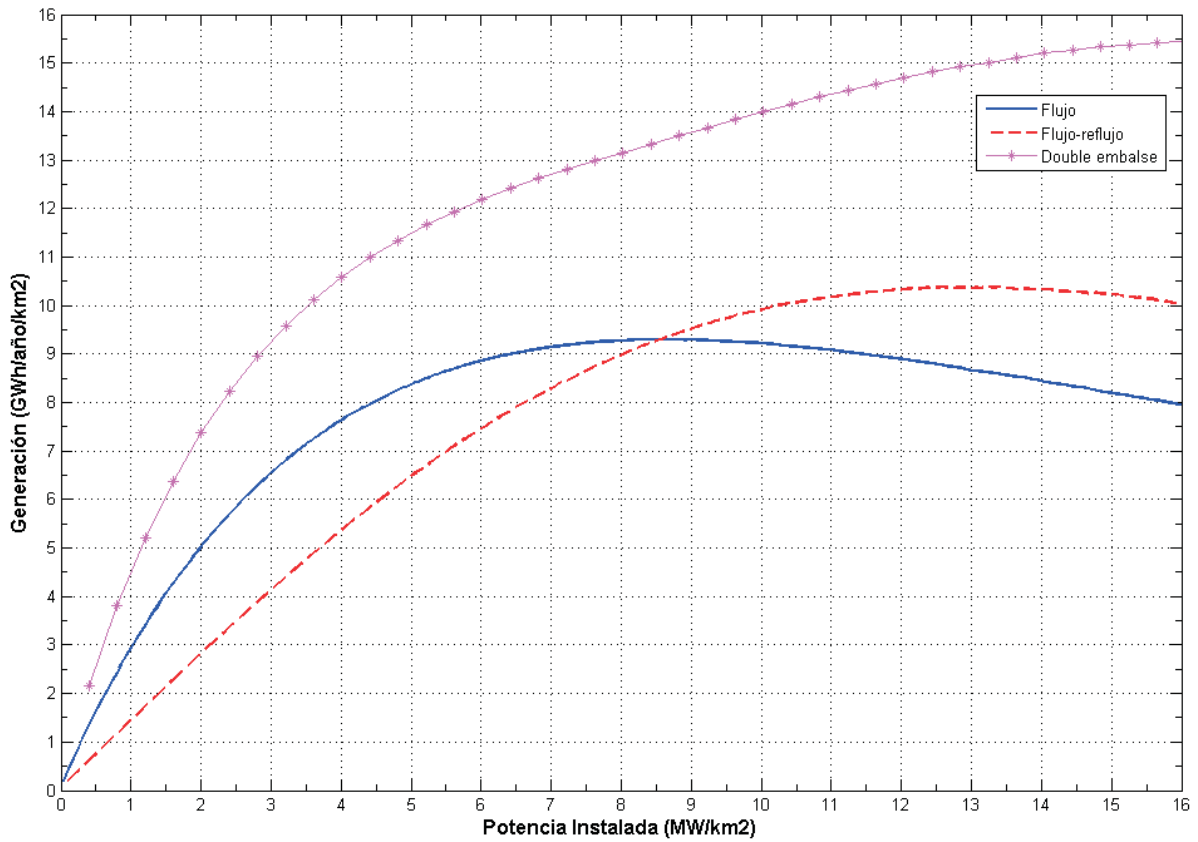


Figura 6. Generación en Puerto Mont (Chile)

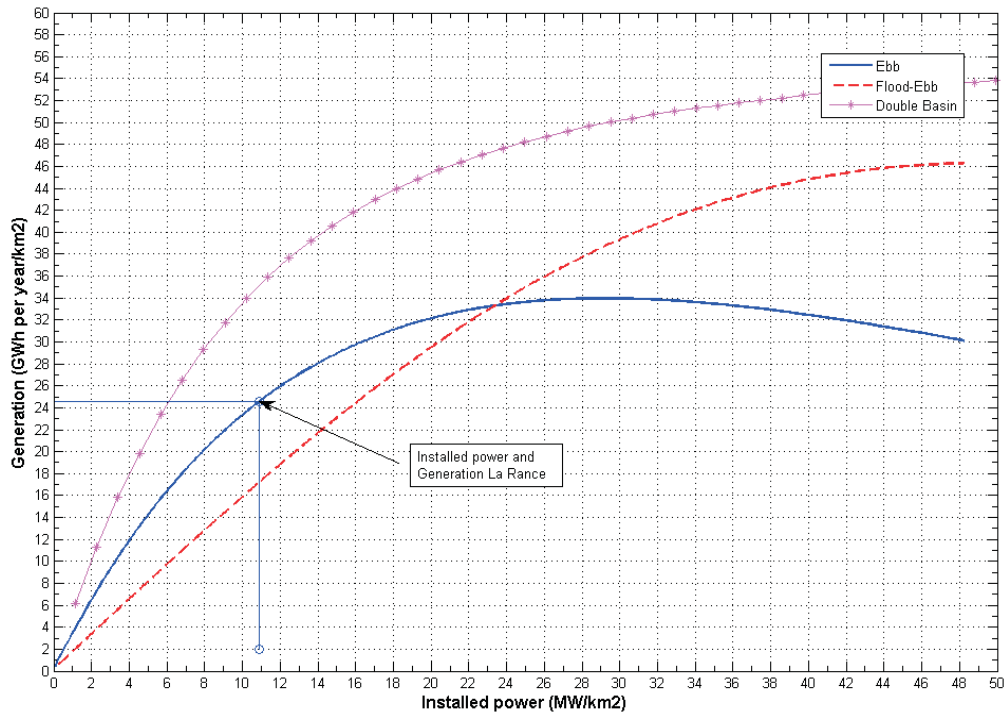


Figura 7. Generación en La Rance

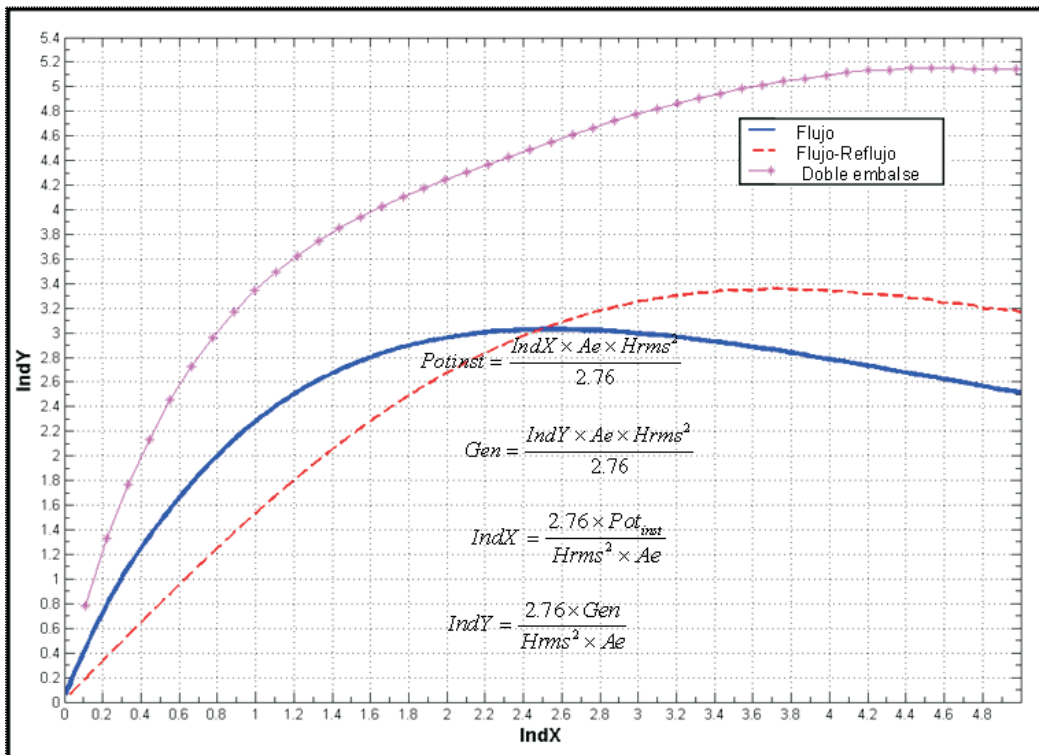


Figura 8. Curvas normalizadas para conocer la generación en una planta mareomotriz

Fácilmente, se puede observar que las curvas presentadas en las figuras 3,6 y 7 tienen la misma forma, solo que a otra escala, por lo tanto, para extender los resultados se buscó la forma de hacer unitaria una de las gráficas y escalarla de acuerdo al sitio de interés. Se tomaron las curvas de San Felipe y se hicieron unitarias dividiendo entre la altura media cuadrática de la marea. De esta forma si se quieren construir las otras dos curvas sólo es necesario multiplicar por la altura cuadrática media del sitio de interés. Estas curvas se muestran en la figura 8 y a través de ellas es posible obtener los mismos resultados para los tres sitios indistintamente. Por ejemplo, para la mareomotriz de La Rance que tiene un área de 22 km² y una producción de 240 MWh/año y el modo de generación es reflujo, se puede obtener de esta gráfica que la generación es de 550 GWh/año, lo cual es muy similar a lo reportado de 500 GWh/año (Romanoski, 1950= y (Charlier *et al.*, 1993).

Consideraciones

A continuación se presentan los datos que se consideraron para las simulaciones.

Sitio	Hrms	Marea máx.	Carga
San Felipe	2.76	6	3.60
Puerto Mont	3.00	7	4.20
La Rance	5.60	13	8.00

Para verificar la robustez del método propuesto se realizó una comparación entre las curvas obtenidas con el modelo numérico y la curva normalizada de la figura 8, los resultados se presentan en la tabla 5. El error obtenido para el caso de generación en modo de flujo y flujo-reflujo, es menor al 10%, por lo cual, los resultados con esta gráfica se pueden considerar adecuados y útiles para una primera evaluación del recurso.

Para obtener la energía de generación de la mareomotriz en el caso del doble embalse, en la curva normalizada el área considerada tendrá que ser la que corresponde a un solo embalse.

Conclusiones

El potencial de energía disponible en el océano, asociada a las mareas autonómicas es muy importante. Para valorar la capacidad es muy importante tener en cuenta la amplitud de la marea, el número de turbinas instaladas y el área del embalse, ya que estos son factores que determinan la cantidad de energía disponible. Una combinación adecuada de estos tres factores dará como resultado los mayores beneficios.

En este trabajo se presenta una metodología confiable y de fácil aplicación para conocer la cantidad de energía aprovechable, dependiendo del área del embalse, la potencia instalada y la amplitud de la marea, la cual puede ser útil para evaluar proyectos de factibilidad de esta naturaleza.

Tabla 5. Comparación entre el modelo numérico y las curvas normalizadas, considerando diferentes esquemas de generación (continúa ...)

Sitio	Curva	Modo de flujo						Modo de flujo Reflujo				Doble embalse			
		Potencia MW	Área Km ²	indX	indY	Energía GWh/y	error	indX	indY	Energía GWh/y	error	ind X	indY	Energía GWh/y	error
San Felipe	Modelo	200	50	4	7.5	375		4	5.9	295		2	7.9	198	
	Modelo	150	60	2.5	6	360		2.5	4	240		1.25	5.8	174	
	Modelo	540	60	9	8.1	486		9	9.1	546		4.5	11.2	336	
	Normalizada	200	50	1.45	2.7	373	-0.6%	1.45	2.1	290	-1.8%	0.72	2.8	193	-2.2%
	Normalizada	150	60	0.91	2.15	356	-3.4%	0.91	1.4	232	-3.4%	0.45	2.2	182	4.7%
	Normalizada	540	60	3.26	2.95	489	0.1%	3.26	3.3	546	0.1%	1.63	4	331	-1.4%
Pto Mont	Modelo	200	50	4	7.6	380		4	5.4	270		2	7.5	188	
	Modelo	150	60	2.5	5.7	342		2.5	3.5	210		1.25	5	150	
	Modelo	540	60	9	9.3	558		9	9.6	576		4.5	11.1	333	

Tabla 5. Comparación entre el modelo numérico y las curvas normalizadas, considerando diferentes esquemas de generación (... continuación)

Sitio	Curva	Potencia MW	Área Km ²	Modo de flujo				Modo de flujo Reflujo				Doble embalse			
				indX	indY	Energía GWh/y	error	indX	indY	Energía GWh/y	error	ind X	indY	Energía GWh/y	error
Pto Mont	Normalizada	200	50	1.23	2.5	408	7.3%	1.23	1.81	295	9.3%	0.61	2.6	212	13.0%
	Normalizada	150	60	0.77	1.9	372	8.7%	0.77	1.2	235	11.8%	0.38	1.8	162	8.0%
	Normalizada	540	60	2.76	3.1	607	8.7%	2.76	3.19	624	8.4%	1.38	3.8	342	2.7%
La Rance	Modelo	200	50	4	12.5	625		4	7	350		2	10	250	.
	Modelo	150	60	2.5	8	480		2.5	4	240		1.25	7	210	
	Modelo	540	60	9	22	1320		9	15	900		4.5	20	600	
	Normalizada	200	50	0.35	1.2	682	9.1%	0.35	0.58	330	-5.9%	0.18	1.1	280	12.0%
	Normalizada	150	60	0.22	0.8	545	13.6%	0.22	0.35	239	-0.6%	0.11	0.8	225	7.1%
	Normalizada	540	60	0.79	2	1363	3.3%	0.79	1.25	852	-5.3%	0.40	2	652	8.7%

En México el potencial de energía mareomotriz en el alto Golfo de California puede llegar a ser muy importante si consideramos una barrera colocada en la cota -10, la cual tendría dos funciones servir de cortina para el embalse y como vía de comunicación, dando como resultado un área de embalse de 2590 km², potencia máxima de acuerdo a la Gráfica 3 en modo de flujo-reflujo de 26 GW y una producción de 23 000 GWh/año que representa más o menos la producción de todas las centrales hidroeléctricas del país, obviamente la colocación de esta cantidad de turbinas es exagerada; sin embargo, la producción de energía eléctrica puede ser importante, aún colocando solo una fracción de ésta.

En cuanto a cantidad y despacho de energía se refiere, el esquema de doble embalse se aprecia como viable, en este caso, sería importante evaluar el costo económico y social, así como el impacto ecológico. Cabe señalar que el modelo numérico toma en cuenta los principales factores de generación pero en condiciones ideales. Para una evaluación real es necesario ajustar los parámetros y coeficientes de acuerdo a las condiciones de cada sitio en particular.

Agradecimientos

Al proyecto IMPULSA4 “Desalación de agua de mar con energías renovables” y al Coordinador de proyecto Sergio Alcocer Martínez de Castro. Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT).

Referencias

- Ballenilla F. *El final del petróleo barato*. El ecologista No. 40. Alicante España. 2004.
- Charlier R.H. Justus J.R. *Ocean Energies Environmental, Economic and Technological Aspects of Alternative Power Sources*. Elsevier Oceanography Series 56. 1993.
- Charlier R.H. *Tidal Energy*. Van Nostrand-Reinhold. New York. 1982.
- Charlier R.H. A “Sleeper” Awakes: Tidal Current Power. *Journal of Renew Sustainable Energy*, 2003.
- Charlier R.H. Resurgimiento or Aggiornamento? Tidal Power at 30 Years. *Journal of Renew Sustainable Energy*. 1(4): 271–89. 2002.
- Charlier R.H. Ocean Alternative Energy. The View From China—‘Small is Beautiful’. *Journal of Renew Sustainable Energy*.
- Charlier R.H., Me´nanteau L. The saga of tide mills. *Journal of Renewable Sustainable Energy*, 1(3):1–44. 1998.
- Dincer I. *Renewable Energy and Sustainable Development: a Crucial Review*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier. 2000.
- Emery and Thomson. *Data Analysis Methods in Physical Oceanography*. Elsevier Oceanography Series. 2004.
- Fells I. *The problem*. In: Dunderdale J, editor. *Energy and the Enviroment*. UK: Royal Society of Chemistry. 1990.
- Fernández-Díez P. *Energía mareomotriz*. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética. Universidad de Catabria

- [en línea]. Disponible en:
<http://www.termica.webhob.info/>
- Isaacs J.D., Seymour R.J. (1973). The Ocean as a Power Resource. *International Journal of Environmental Studies*, 4(3). 2001.
- Kwang-Soo L. Ocean Energy Activities in Korea Ocean Energy Activities in Korea (Tidal Barrage & Tidal Current). International Seminar on Water and Energy, UNAM, Mexico City, pp. 22-23, March 2007.
- Romanoski V. *Les Energies de la Mer (Collection Que sais-je?)*. University Press of France, Paris. 1950.
- Song WO. Reassessment of the Garolim tidal power project. *Ocean Research (Korea)*, 9(1/2):29-35. 1987.

Semblanza de los autores

José López-González. Estudiante de doctorado, obtuvo el grado de maestro en ingeniería en la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), con especialidad en hidráulica marítima. Con 15 años de experiencia en consultoría de procesos e ingeniería costera es profesor de la Facultad de Ingeniería en la UNAM. Actualmente estudia las fuentes de energía renovable del océano y desarrolla un dispositivo de conversión de energía marina dentro del proyecto IMPULSA “Desalación de agua de mar con energías renovables”.

Gerardo Hiriart-Le Bert. Doctor en ingeniería mecánica por la Naval Postgraduate School de Monterey, California, Estados Unidos de América. Es investigador en el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y jefe del proyecto IMPULSA “Desalación de agua de mar con energías renovables”. Es miembro director del Consejo del Circumpacífico para la energía y recursos minerales en donde preside la Comisión de Energías Renovables; laboró en el área de geotermia y energías renovables de la Comisión Federal de Electricidad (México). Ha sido distinguido con el premio “Los Pioneros” por el Consejo de Recursos Geotérmicos de Estados Unidos de América y con el Premio Nacional de Energías Renovables por la Comisión Nacional para el Ahorro de Energía (CONAE) de México.

Rodolfo Silva-Casarín. En 1995 obtuvo el grado de doctor en ingeniería de caminos, canales y puertos en la Universidad de Cantabria, España. Actualmente es investigador de tiempo completo en el Instituto de Ingeniería y profesor titular en la Facultad de Ingeniería (División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería UNAM). Ha impartido 26 cursos y dirigido varias tesis de licenciatura, maestría y doctorado. Ha realizado una cantidad importante de publicaciones científicas tanto nacionales como extranjeras. Dentro de las distinciones recibidas se encuentra el Premio Nacional “Diario de México”, al mejor estudiante de México en 1990. Es miembro de varias asociaciones académicas y científicas y ha participado como árbitro y colaborador científico en diferentes revistas, consejos, comités y evaluador de estímulos de carrera entre otras, así como, árbitro evaluador del CONACYT.

El análisis campo-sustancia

The Substance-Field Analysis

Acosta-Flores J.J.
División de Ingeniería Mecánica e Industrial.
Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
E-mail: jjaf@servidor.unam.mx

(Recibido: mayo de 2008, reevaluado: agosto de 2009; aceptado: octubre de 2009)

Resumen

En el cambio social y en la transformación de las organizaciones puede ser muy útil hacer uso de la teoría para resolver problemas inventivos, TRIZ. En este artículo se presenta TRIZ, a través de una de sus herramientas: el análisis campo-sustancia. Este análisis es una herramienta analítica para modelar problemas que se observan en sistemas. Cada sistema se crea para realizar alguna función. La función deseada es la salida de una sustancia u objeto, causada por otros similares con la ayuda de algunos medios. En términos generales, las sustancias son objetos de cualquier nivel de complejidad. Pueden ser sistemas complejos o artículos simples. La acción o medios para lograr la acción se conoce como un campo. El análisis campo-sustancia provee un modelo simple y rápido que se emplea al considerar diferentes ideas.

Descriptores: TRIZ, sistemas, modelos, campo-sustancia.

Abstract

In organizational transformation and social change can be very useful to use the theory to solve inventives problems. In this paper TRIZ is presented with more detail, specifically through one of his tools: the substance-field analysis. Substance-Field Analysis is a TRIZ analytical tool for modeling problems related to existing systems. Every system is created to perform some functions. The desired function is the output from an object or substance, caused by another object with the help of some means. The general term, substances are objects of any level of complexity. They can be single items or complex systems. The action or means of accomplishing the action is called a field. Substance-Field Analysis provides a fast, simple model to use for considering different ideas.

Keywords: TRIZ, systems, models, substance-field.

Introducción

El reconocimiento de tipos genéricos de problemas en la innovación fue la clave para desarrollar la Teoría para Resolver Problemas Inventivos, cuyo acrónimo en ruso es TRIZ. Emplea el enfoque sistémico basado en el conocimiento para conseguir la innovación. Fue desarrollado bajo las ideas de Genrich S. Altshuller y su

escuela en la entonces Unión Soviética. Sus métodos surgieron del análisis de las invenciones más innovadoras (Altshuller, 2000, 2002, 2004).

Asimismo, Nakagawa (2001) establece la esencia de TRIZ en 50 palabras: “reconocer que los sistemas técnicos evolucionan hacia su ideal, resolviendo contradicciones con el uso mínimo de recursos. Por consiguiente, para resolver problemas creativos, TRIZ proporciona

una forma dialéctica de pensamiento, es decir, entender el problema como un sistema, hacer primero una imagen de la solución ideal para solucionar las contradicciones.”

Por su parte, Mann (2002) pregunta: ¿Es TRIZ un conjunto de herramientas? ¿Un método? ¿Una forma de pensamiento? ¿Una filosofía? A lo cual responde: es todo lo anterior.

En su nivel superior, TRIZ puede verse como el estudio sistemático de la excelencia. Este estudio se enfocó inicialmente sobre patentes y después evolucionó para mirar la excelencia en las ciencias y posteriormente en el arte, los negocios, las ciencias sociales y la política.

De este estudio han surgido cinco elementos filosóficos clave. Ellos son:

- Idealidad. El concepto que los sistemas evolucionan aumentando lo bueno y disminuyendo lo malo.
- Recursos. En este concepto se maximiza la efectividad de las cosas dentro y alrededor de un sistema, aún las cosas malas.
- Espacio/tiempo. La importancia de ver los sistemas en términos de su contexto de espacio y tiempo.
- Funcionalidad. La imperiosa importancia de la función cuando se piensa sobre los sistemas.
- Contradicciones. El concepto de eliminar las contradicciones (conflictos) como el conductor principal de la evolución.

Algunos de estos elementos son únicos de TRIZ; otros tienen precedentes paralelos con estudios similares.

Se tiene una serie amplia de herramientas y técnicas. Estas son: 40 principios inventivos, el resultado final ideal, la matriz de contradicciones, los patrones de evolución, el análisis campo-sustancia, el análisis funcional, los efectos físicos, 76 soluciones estándar y cuatro principios de separación.

Entre la filosofía y esta colección de herramientas está lo que puede describirse como método. A este método se le denominó ARIZ (Algoritmo para resolver un problema inventivo), del cual existen varias versiones.

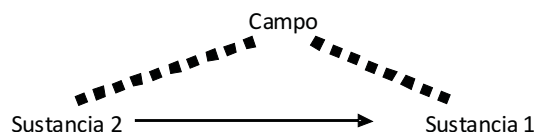
Enseguida se escribirá sobre una de las herramientas de TRIZ: el análisis campo-sustancia (Terninko, 2000) y (Terninko *et al.*, 1998).

El modelo campo-sustancia

En este modelo cada sistema se crea para que ejecute algunas funciones. La función deseada es la salida de un objeto o sustancia (S1), causada por otro objeto (S2) con la ayuda de ciertos medios (algún tipo de energía, F).

¿Cuándo emplear un análisis campo-sustancia?

Para definir un sistema técnico son necesarios y suficientes dos sustancias y un campo.



Existen cuatro modelos básicos:

- Un sistema incompleto (requiere completarlo o un sistema nuevo).
- Un sistema completo pero inefectivo (demanda mejoras para crear el efecto deseado).
- Un sistema completo dañino (es necesario eliminar el efecto negativo).
- Un sistema completo efectivo.

Si falta cualquiera de los tres elementos, el análisis campo sustancia indica dónde debe completarse el modelo y ofrecer direcciones para el pensamiento innovador. Si se tienen los tres elementos requeridos, el análisis puede sugerir maneras de modificar el sistema para que funcione óptimamente.

¿Cómo hacer el modelo sustancia-campo?

El campo, que en sí es una forma de energía, provee una fuerza o reacción para garantizar un efecto. El efecto podría ser sobre S1.

El término campo se utiliza en su sentido más amplio, incluyendo los campos de la física (electromagnetismo, gravedad, interacciones nucleares fuertes y débiles). Otros campos podrían ser químicos, mecánicos, acústicos, de luz, de temperatura, etc.

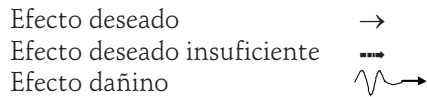
Las dos sustancias pueden ser sistemas completos, subsistemas u objetos. Pueden también clasificarse como herramientas o artículos.

El problema de innovación se modela como un triángulo que ilustra las relaciones entre las dos sustancias y el campo. Los sistemas complejos pueden modelarse conectando varios triángulos sustancia-campo.

Para hacer el modelo sustancia campo, se siguen los dos pasos siguientes:

1. Identificar los elementos. El campo está actuando sobre ambas sustancias o está integrado como sistema con la sustancia 2.
2. Construir el modelo.

Las relaciones entre los elementos del modelo sustancia-campo se dibujan con las líneas siguientes:



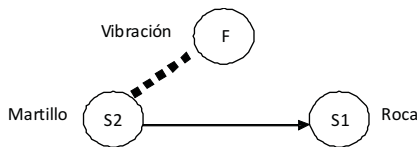
Ejemplo 1

Rompiendo una roca (Terninko *et al.*, 1998)

1. Identificar los elementos. Lo que se desea es romper una roca.
Función = Romper la roca. S1 = Roca. S2 = Herramienta. F = Fuente de energía.
2. Construir el modelo

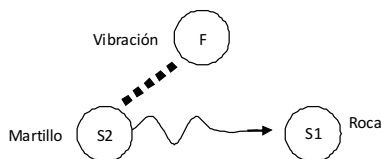
Un sistema incompleto. La roca es S1. Si sólo existe la roca, no se romperá, lo cual quiere decir que el modelo está incompleto. Igualmente el modelo también estará incompleto si se tienen únicamente la roca (S1) y un martillo (S2). De la misma manera, el modelo será incompleto si los únicos elementos del sistema son algún campo (F, gravedad) y la roca (S1).

En estos modelos incompletos, no sucede el efecto deseado. Si se completa el sistema se tendrá la función útil. Un sistema completo es un martillo neumático que proporciona la fuerza mecánica con el martillo sobre la roca, como se muestra en la figura siguiente.

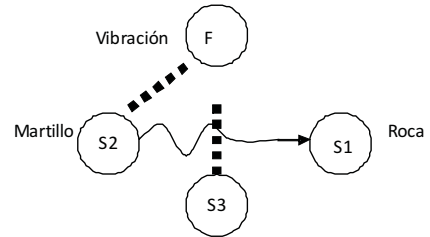


Si el sistema produce el efecto deseado, el análisis está completo. Existen dos formas en las que el sistema podría fallar en dar el efecto deseado: sucede un efecto dañino o los resultados son inadecuados.

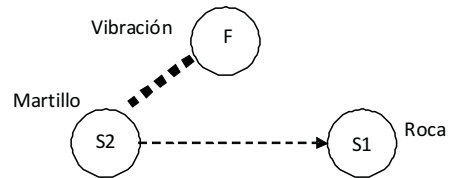
Sistema completo dañino. Suponga que el efecto dañino en este ejemplo son las piezas que vuelan.



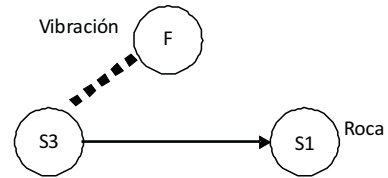
Entonces podría agregarse una sustancia (S3) que podría ser una cápsula de metal o una malla de alambre para eliminar el efecto dañino.



Sistema completo inefectivo. El romper la roca puede no ser tan eficiente o efectivo como se desea.



Al agregar o cambiar los elementos del modelo, se logra mejorar el funcionamiento de diversas maneras. Por ejemplo, cambiando la sustancia S2.



Una posibilidad de cambiar la sustancia (S2) consiste en reemplazar la cabeza original del martillo por una cabeza de martillo para romper rocas (S3).

Ejemplo 2

El campo universal. (Altshuller, 2004). En una fábrica que elabora maquinaria agrícola, es necesario contar con un terreno cercado para probar la movilidad del equipo.

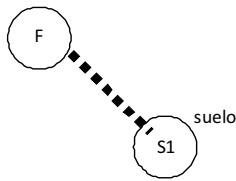
En cierta ocasión la fábrica obtuvo pedidos para fabricar maquinaria para muchos países distintos. Sin embargo, al comprobar que estos países presentan diferentes tipos de suelo, la fábrica encontró que para probar todas estas máquinas necesitaba diversas composiciones de suelo.

Se realizó una reunión, donde el presidente de la fábrica dijo a su ingeniero "Se necesitan 140 clases disímiles de tierra. ¿Cómo obtendremos tanto terreno?"

El contador general agregó “Costaría mucho dinero. Eso sería irreal. ¡La situación no tiene solución!”

De repente apareció el inventor, quien dijo: “No existen situaciones sin solución, se puede construir un campo universal que reemplace a los 140.” La solución consistía en que:

“Primero, se establecerán las condiciones actuales. ¿qué se tiene? El suelo es una sustancia que se designará con el símbolo S1. Es necesario aprender a controlar los parámetros de S1 empleando alguna fuerza o “campo”. Se nombrará este campo con la letra F.



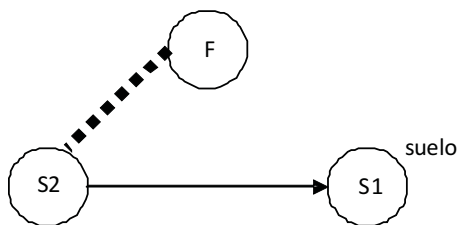
Existen seis campos básicos:

1. Gravitatorio,
2. Electromagnético,
3. Campo nuclear de interacción débil,
4. Campo nuclear de interacción fuerte,
5. Mecánico,
6. Térmico.

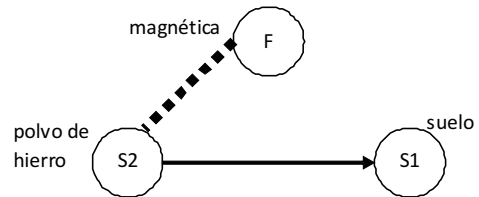
No se considerarán los campos nucleares. Lo que se requiere es una solución muy simple. Se tiene que eliminar el campo de la gravedad porque aún no hemos aprendido a controlarlo. Quedan tres campos –electromagnético, mecánico y térmico”.

Se ve claramente una contradicción física. El campo F deberá actuar sobre la sustancia S1 (suelo) –esto es por especificación del problema- pero el campo F no puede actuar sobre esta sustancia porque no tiene ningún efecto sobre los parámetros de la sustancia S1.

Si es imposible para el campo F actuar directamente sobre la sustancia S1, entonces deberá instrumentarse un libramiento. Permítase al campo F actuar sobre S1 mediante otra sustancia, S2, que instrumente una buena respuesta del campo F.



Supongamos que decidimos emplear un campo magnético. ¿Qué clase de sustancia corresponderá a S2? La respuesta es obvia. Deberá ser una sustancia ferromagnética, por ejemplo, el polvo de hierro, que puede mezclarse fácilmente con el suelo.



Las partículas magnetizadas se atraen unas a otras. Mientras más fuerte es el campo magnético más potente es la atracción. Una mezcla de suelo con polvo ferromagnético en un campo magnético intenso, podría ser tan duro como el granito. La misma mezcla en un campo magnético débil podría ser tan suave como la arena.

Entonces, si el polvo de hierro se mezcla con alguna sustancia, un campo magnético podría fácilmente controlar las propiedades de dicha sustancia –comprimir, ensanchar, inclinar, situar y así por el estilo.

Existen también aplicaciones del análisis campo-sustancia en situaciones no técnicas, por ejemplo el estudio de caso para mejorar el abastecimiento mundial de alimentos (Miller *et al*, 2001). En este estudio de caso se empleó también otra herramienta de TRIZ, las 76 Soluciones Estándar (Terninko *et al*, 2000a, 2000b, 2000c, 2000d y 2000e). Como también es interesante el artículo de Lettieri y Yoneyama (2006), ingenieros aeronáuticos en Brasil, que presentan usando este análisis, un ejemplo educativo para resolver fácilmente problemas de circuitos eléctricos.

Conclusiones

Así, TRIZ es una filosofía, una forma de pensamiento y una metodología que tiene un conjunto de herramientas. Una de esas herramientas es el análisis campo-sustancia, método fácil y rápido para encontrar soluciones innovadoras a diversos problemas.

El análisis consiste en definir el problema mediante un modelo que consta de dos sustancias y una fuerza o campo, que actúa sobre una de ellas o sobre las dos, para obtener el resultado deseado. Los campos pueden ser el gravitatorio, electromagnético, nuclear de interacción débil, nuclear de interacción fuerte, mecánico o térmico.

Cuando falta alguno de estos tres elementos se tiene un sistema incompleto, que requiere ser completado para tener un sistema efectivo. Cuando el sistema está

completo pero es inefectivo, demanda mejoras para crear el efecto deseado, posiblemente agregando otra sustancia o cambiando una de ellas, o bien, utilizando otro campo. Cuando el sistema está completo pero es dañino, se debe eliminar el efecto negativo para contar con un sistema completo efectivo.

Referencias

- Altshuller G. *And Suddenly the Inventor Appeared. TRIZ, the Theory of Inventive Problem Solving*. 6th Printing. USA. Technical Innovation Center, Inc. 2004.
- Altshuller G. *40 Principles. TRIZ Keys to Technical Innovation*. 3th Printing. USA. Technical Innovation Center, Inc. 2002.
- Altshuller G. *The Innovation Algorithm. TRIZ, Systematic Innovation and Technical Creativity*. 2th Printing. USA. Technical Innovation Center, Inc. 2000.
- Lettieri A.C., Yoneyama T. Su-Field: An Educational Example of Inventive Problem Solving in Electrical Engineering [en línea] 2006. Disponible en: <http://www.triz-journal.com/archives/2006/01/05.pdf>
- Mann D. TRIZ for Everyone [en línea] 2002. Disponible en: <http://www.triz-journal.com/archives/2002/01/e/index.htm>
- Miller J., Domb E., McGran E., Terninko J. Using the 76 Standard Solutions: A Case Study for Improving the World Food Supply [en línea] 2001. Disponible en: <http://www.triz-journal.com/archives/2001/04/e/index.htm>
- Nakagawa T. Introduction to TRIZ (Theory of Inventive Problem Solving): A Technological Philosophy for Creative Problem Solving [en línea] 2001. Disponible en: <http://www.osakagu.ac.jp/php/nakagawa/TRIZ/eTRIZ/epapers/eIntro011223/eIntroJCS011104.html>
- Terninko J. Su-Field Analysis [en línea] 2000. Disponible en: http://www.triz-journal.com/archives/2000/02/d/article4_02-2000.PDF
- Teninko J., Domb E., Miller J. The Seventy-six Standard Solutions, with examples. Section One [en línea] 2000a. Disponible en: <http://www.triz-journal.com/archives/2000/02/g/index.htm>
- Teninko J., Domb E., Miller J. The Seventy-Six Standard Solutions, with Examples – Class 2. One [en línea] 2000b. Disponible en: <http://www.triz-journal.com/archives/2000/03/d/index.htm>
- Teninko J., Domb E., Miller J. The Seventy-Six Standard Solutions, with Examples – Class 3. [en línea] (2000c). Disponible en: <http://www.triz-journal.com/archives/2000/05/b/index.htm>
- Teninko J., Domb E., Miller J. The Seventy-Six Standard Solutions, with Examples– Class 4. [en línea] (2000d). Disponible en: <http://www.triz-journal.com/archives/2000/06/e/index.htm>
- Teninko J., Domb E., Miller J. The Seventy-Six Standard Solutions, with Examples– Class 5. [en línea] (2000e). Disponible en: <http://www.triz-journal.com/archives/2000/07/b/index.htm>
- Terninko J., Zusman A., Zlotin B. *Systematic Innovation*. CRC Press LLC. 1998.
- Zlotin B., Zusman A., Kaplan L. Visnepolschi Svetlana, Proseanic Vladimir and Malkin Sergey (2001). TRIZ Beyond Technology: The Theory and Practice of Applying TRIZ to Non-Technical Areas [en línea]. Disponible en: <http://www.triz-journal.com/archives/2001/01/f/index.html>

Semblanza del autor

José Jesús Acosta-Flores. Egresado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Es ingeniero civil, maestro en ingeniería y doctor en ingeniería. Cursó el programa de estudios de ingeniería avanzada en el Instituto Tecnológico de Massachussets. En la Universidad Nacional Autónoma de México es profesor desde 1965. En la Facultad de Ingeniería, UNAM, fue coordinador de su plan de desarrollo 1995-2000, subjefe de la División de Estudios de Posgrado, jefe del Departamento de Ingeniería de Sistemas, miembro del consejo interno de posgrado, de la comisión dictaminadora de la División de Ingeniería Mecánica e Industrial durante dos períodos y de la comisión evaluadora de las primas de desempeño (PRIDE). Ha sido director de 40 tesis de licenciatura, maestría y doctorado. Ha sido autor de numerosos artículos e informes técnicos, así como de siete libros sobre ingeniería de sistemas. En el sector público, trabajó en las Secretarías de Educación Pública, Recursos Hidráulicos, Obras Públicas y Asentamientos Humanos y Obras Públicas. En la iniciativa privada fue director general de desarrollo integral empresarial y consultoría. Miembro fundador de la Academia Mexicana de Tecnología, Académico de número en la Academia de Ingeniería, donde fue presidente de la comisión de ingeniería de sistemas, presidente fundador de la Academia Mexicana de Ciencias, Artes, Tecnología y Humanidades y de la Academia Mexicana de la Ciencia de Sistemas. Recibió la Cátedra Especial “JAVIER BARROS SIERRA” en dos ocasiones, en el año 2003 y en el 2005.

La Revista Ingeniería. Investigación y Tecnología es impresa por el Departamento de Publicaciones de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

Esta edición se terminó de imprimir en marzo de 2010 en México DF y consta de 1800 ejemplares más sobrantes para reposición.

Derechos Reservados ©

Universidad Nacional Autónoma de México, 2010

[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. To send an article for consideration of publication in our Journal commits the author(s) not to submit it simultaneously for evaluation anywhere else.

The proposed contributions for publication will be received only through the Open Journal System (OJS) procedure. Our Web site contains a link to this system.

To submit a paper for evaluation, the first author is required to register in the system as author in our Journal. For more information please visit our Web site
<http://www.ingenieria.unam.mx/~revistafi/>

If you have any doubts about the registration and uploading process, please contact us through e-mail at iit.revista@gmail.com

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 least 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

Moyar 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.

[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

Enviar un artículo a consideración de la revista, compromete a sus autores a no someterlo a evaluación simultáneamente a otra revista.

Las contribuciones propuestas para su publicación son recibidas únicamente por el **Open Journal System**. En nuestro sitio web, se encuentra un enlace a dicho sistema.

Para someter un artículo a evaluación, el autor principal deberá registrarse en dicho sistema como autor de nuestra revista.

Para mayor información: <http://www.ingenieria.unam.mx/~revistafi/>

Si tiene alguna duda sobre el proceso de envío, puede escribirnos a la dirección de correo electrónico iit.revista@gmail.com

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.

CAPITULO DE UN LIBRO IMPRESO

Moyar 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>

CAPITULO 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>

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.



127-139

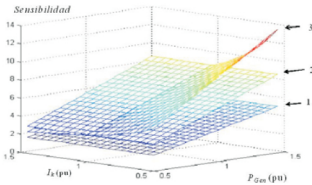
Una estructura neurodifusa para modelar la evapotranspiración instantánea en invernaderos

Ramos-Fernández J.C.,
López-Torales V., Lafont F.,
Enca G. y Duplaix J.

141-154

Calibration of Parallel Manipulators and their Application to Machine Tools. A State of the Art Survey

Hernández-Martínez E.E.,
López-Cajún C.S. and
Jáuregui-Correa J.C.



155-165

Diseño teórico y simulación de un relevador de sobrecorriente con capacidades dinámicas de ajuste

Conde-Enriquez A.,
Vázquez-Martínez E. y
Cantú-Gutiérrez V.P.

167-177

La dureza del agua como indicador básico de la presencia de incrustaciones en instalaciones domésticas sanitarias

Julián-Soto F.



179-188

Intensidades máximas de lluvia para diseño hidrológico urbano en la república mexicana

Campos-Aranda D.F.

189-198

Contaminación armónica producida por cargas no lineales de baja potencia: modelo matemático y casos prácticos

Mora-Barajas M.A. y
Bañuelos-Sánchez P.

Summary Information

Power KW	0.28
KVA	0.37
KVAR	0.11
Total PF	0.76

	Voltage	Current
RMS	122.77	3.03
THD Rms	1.74	55.54

199-216

Metodología para el modelado del comportamiento mecánico de hueso esponjoso a partir de sus microestructuras

Ramírez-Díaz E.I.,
Ortiz-Prado A.,
Schouwenaars-Franssens R. y
Ruiz-Cervantes O.

217-231

Generic Model to Send Secure Alerts for Utility Companies

Gilván-Bobadilla I.,
Santos-Domínguez M. and
Pérez-Díaz J.A.



233-245

Cuantificación de energía de una planta marcomotriz

López-González J.,
Hiriart-Luc Bert G. y
Silva-Casarrín R.

247-252

El análisis campo-sustancia

Acosta-Flores J.J.

