

Científica

ISSN
1665-0654



Precio \$70.00 Vol. 15 Núm. 1 • Enero-Marzo de 2011 • *Científica: The Mexican Journal of Electromechanical Engineering* • ESIME



Instituto Politécnico Nacional
Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
"La Técnica al Servicio de la Patria"

DIRECTORIO

Guillermo
Urriolagoitia
Calderón
Editor en Jefe

Alma Vicenta
Miranda
Godínez
**Coordinación
Editorial**

Cuauhtémoc
Jiménez
Pérez
**Edición
Técnica**

Miguel Ángel
Tenorio
Trejo
**Producción
Editorial**

Margarita
Sam
Rodríguez
Revisión

Indizada en:

Latindex: Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal.
www.latindex.org

Periódica:
Índice de Revistas Latinoamericanas en Ciencias.
<http://www.dgbiblio.unam.mx/>
http://132.248.9.1:8991/F/-/?func=find-b-0&local_base=PER01

Redalyc: Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal. Sistema de Información Científica Redalyc.
www.redalyc.uaemex.mx

Contenido

Propuesta de inicialización de los pesos en el filtro espacial LMS

Proposal of Initialization for the Weights in the LMS Spatial Filter
Carlos Ríos-Ríos, Marco Antonio Acevedo-Mosqueda, Oleksiy Pogrebnyak · MÉXICO 3-9

Análisis de tuberías de acero A-53 gr. B expuesto a fluidos geotérmicos

Analysis of Steel Pipes A-53 gr. B Exposed in Geothermal Fluid
Israel Saucedo-Meza, Carlos A. Miranda-Herrera, Guillermo Cine-Páez,
Orlando Susarrey-Huerta, Antonio Corona-Guzmán · MÉXICO 11-16

Experiments on One-Phase Thermally Stratified Flows in Nuclear Reactor Pipe Lines

Experimentos de simulación de flujo monofásico térmicamente estratificado en la tuberías de los reactores nucleares
Hugo Cesar Rezende, Moisés Alberto Navarro, Amir Zacarias Mesquita,
André Augusto Campagnole dos Santos, Elizabete Jordão · BRASIL 17-24

Evaluación analítico-numérica para ensambles por interferencia

Analytical-Numerical Evaluation for Assemblies of Interference
Armando Pérez-Cabrera, Beatriz Romero-Ángeles, David Torres-Franco,
Mauricio Aarón Pérez-Romero, Samuel Morales-Bonilla · MÉXICO 25-34

El enfoque de sistemas para la aplicación de la manufactura esbelta

The Systems Approach for Lean Manufacturing Application
Yolanda Juárez-López, Jorge Rojas-Ramírez,
Joselito Medina-Marín, Aurora Pérez-Rojas · MÉXICO 35-42

Relevance of an Energy Dissipation as a Condition of a Stable Reeling Off of a Yarn from a Yarn Accumulator

Relevancia de la energía de disipación como una condición del enrollamiento estable de hilo del almacenador de hilo
Liudmila Oleynikova, José Antonio Gómez-Reyna,
Alla Kabatskaia Ivanovna · MÉXICO 43-48

COMITÉ EDITORIAL

Guillermo Urriolagoitia Calderón
Instituto Politécnico Nacional (MÉXICO)

Alexander Balankin
Instituto Politécnico Nacional (MÉXICO)

Jesús del Castillo
Instituto Venezolano de Investigación Científica
(VENEZUELA)

María Teresa Alonso Rasgado
University of Manchester (REINO UNIDO)

Manuel Elices Calafat
Universidad Politécnica de Madrid (ESPAÑA)

Marco Ceccarelli
University of Cassino (ITALIA)

Héctor Pérez Meana
Instituto Politécnico Nacional (MÉXICO)

Jinhui Shao
University of Shuo (JAPÓN)

EDITORES ASOCIADOS

Apolinar Reinoso Hernández
Centro de Investigación y de Estudios
Superiores de Ensenada (MÉXICO)

Baltasar Mena Inesta
Universidad Nacional Autónoma de México
(MÉXICO)

Édgar Sánchez Sinencio
Texas A&M University College Station
(Estados Unidos)

Francisco Sánchez Sesma
Universidad Nacional Autónoma de México
(MÉXICO)

Garret Sautis
University of Sheffield (REINO UNIDO)

Guillermo Urriolagoitia Sosa
Instituto Politécnico Nacional (MÉXICO)

Hidilberto Jardón Aguilar
Centro de Investigaciones y Estudios Avanzados
(MÉXICO)

Israel Saucedo Meza
Universidad de Baja California (MÉXICO)

Joaquín Fernández Valdivia
Universidad de Sevilla (ESPAÑA)

Jorge Sosa Pedroza
Instituto Politécnico Nacional (MÉXICO)

José de Jesús Álvarez Ramírez
Universidad Autónoma Metropolitana (MÉXICO)

José Luis del Río Correa
Universidad Autónoma Metropolitana (MÉXICO)

José Manuel de la Rosa
Instituto Politécnico Nacional (MÉXICO)

Juan Alfonso Beltrán Fernández
Instituto Politécnico Nacional (MÉXICO)

Luis Héctor Hernández Gómez
Instituto Politécnico Nacional (MÉXICO)

Luis Niño de Rivera y Oyarzábal
Instituto Politécnico Nacional (MÉXICO)

Mariko Nakano Miyatake
Instituto Politécnico Nacional (MÉXICO)

Manuel A. Duarte Marmoud
Universidad de Chile (CHILE)

Michael Shapiro Fihman
Centro de Investigaciones y Estudios Avanzados
(MÉXICO)

Miguel Ángel Rodríguez Díaz
Instituto de Física de Cantabria
(ESPAÑA)

Miguel Castro Fernández
Centro de Investigación y Pruebas
Electromagnéticas de Cuba (CUBA)

Miguel Cruz Irisson
Instituto Politécnico Nacional (MÉXICO)

Pablo Rogelio Hernández Rodríguez
Centro de Investigaciones y Estudios Avanzados
(MÉXICO)

Patricia Camarena Gallardo
Instituto Politécnico Nacional (MÉXICO)

Rafael Castro Linares
Centro de Investigaciones y Estudios Avanzados
(MÉXICO)

Régulo López Callejas
Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares
(MÉXICO)

Valery Kontorovich
Centro de Investigaciones y Estudios Avanzados
(MÉXICO)

Víctor Champac Vilela
Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica
y Electrónica (MÉXICO)

Victor F. Kravchenko
Moscow Institute of Physics and
Technology (FEDERACIÓN RUSA)

Vladislav Kravchenko
Centro de Investigaciones y Estudios Avanzados
Querétaro (MÉXICO)

Volodymir Ponomaryov
Instituto Politécnico Nacional (MÉXICO)

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA
MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SECCIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN

Revista
Científica
ISSN 1665-0654

VOLUMEN 15, NÚMERO 1,
ENERO-MARZO 2011

LA REVISTA MEXICANA
DE INGENIERÍA
ELECTROMECAÁNICA

THE MEXICAN JOURNAL OF
ELECTROMECHANICAL
ENGINEERING

Revista Científica ESIME, ISSN 1665-0654, Volumen 15, Número 1, enero-marzo de 2011. Revista trimestral editada por la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME) del Instituto Politécnico Nacional (IPN), México. Edificio 5, 1º piso, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación (SEPI-ESIME Zacatenco), Col. Lindavista, Unidad Profesional Adolfo López Mateos, CP 07738, México, DF, Tel. 5729 6000 ext. 54518. correo electrónico: revistacientificpn@yahoo.com.mx. Página en Internet: www.revistacientifica.esimez.ipn.mx. Certificado de Reserva de Derechos al Uso Exclusivo. Reserva: 04-2004-053109300500-102, 31-V-06. Certificado de Licitud de Contenido 7611, 10-I-00. Certificado de Licitud de Título 10962, 10-I-06. Suscripción anual: \$ 400.00 (pesos). Annual fee including airmail charges US \$ 50.00 (fifty US Dollar). El contenido de los artículos firmados es responsabilidad del autor. Prohibida la reproducción total o parcial sin previa autorización. Registro Postal (Publicaciones Periódicas) SEPOMEX PP09 0972. Tipografía: Édgar Eduardo Jiménez Lucero y Othir Amaro Nápoles. Portada: Digital Dot, SA, Tel./Fax: 5592 8429 y 8589 5311, México, DF. Impresión: Talleres Gráficos de la Dirección de Publicaciones del IPN, Tresguerras 27, Centro Histórico, México, DF. Tiraje 500 ejemplares.

EDITORIAL

Científica, en este primer número de 2011, publica seis artículos de investigación que cubren las diferentes disciplinas que le competen y le invita, además, a consultar su contenido en su página en Internet renovada que cumple con los estándares propios de la publicaciones científicas.

En el primer artículo se propone una alternativa para inicializar los pesos en un arreglo de antenas de siete elementos que utiliza el filtro espacial LMS, el objetivo es reducir el número de iteraciones que el filtro requiere para llegar a la solución de Wiener. Es importante reducir el número de iteraciones para que el patrón de radiación pueda adaptarse en el menor tiempo posible. La propuesta para la inicialización de los pesos se basa en el método de reducción de lóbulos secundarios en arreglos de antenas fijos. En este trabajo se utilizan los coeficientes de un filtro FIR pasa bajas para inicializar el vector de pesos del filtro LMS.

En el trabajo siguiente, se enfoca en la problemática de la red de tuberías de la geotérmica de cerro prieto, por donde se transporta un gran porcentaje de ácido sulfhídrico, dióxido de carbono y gases incondensables, lo cual produce una mezcla altamente corrosiva ocasionando dureza superficial y pérdida del material. Debido a lo anterior y con el fin de evaluar la vida remanente de las tuberías en operación, se obtienen las curvas de fatiga del material A-53 gr. B, antes y después de ser expuestos al medio.

Se exponen, en el tercer artículo, algunos resultados en una amplia gama de experimentos simulando el flujo monofásico térmicamente estratificado en una geometría y condiciones de flujo simulando el bocal de inyección del generador de vapor de un reactor nuclear. Tales resultados tienen el objetivo de estudiar las condiciones del flujo y la evolución del proceso de estratificación térmica. El principal parámetro utilizado en la caracterización de los flujos estratificados debido a la diferencia entre las masas específicas es el número de Froude. Los resultados están presentados aquí y muestran la influencia del número de Froude en la posición de la interface entre las capas de agua caliente y fría, en los gradientes de temperatura y en el fenómeno de la oscilación de la interface (*striping*).

En el siguiente manuscrito, se analiza numéricamente el estado de esfuerzos y deformaciones en el ensamble de camisas y ejes con ajuste forzado con interferencia utilizando el método de elemento finito. El principal objetivo de este trabajo, es demostrar la correlación existente entre los métodos analítico y numérico. Los resultados obtenidos en esta investigación, muestra que las zonas de contacto inicial entre la camisa y eje, experimentan esfuerzos plásticos, por lo que esta situación debe ser considerada como un parámetro de diseño.

El enfoque de sistemas, por su potencial para apoyar conceptualmente la solución de problemas complejos en los dominios más diversos, es considerado de gran utilidad para guiar la aplicación de propuestas de mejora en organizaciones reales. Los sistemas de producción han evolucionado en los criterios de operación, de las decisiones del propio sistema a las que toman en cuenta a los usuarios de la producción, como en el pensamiento esbelto. En este contexto, en el cuarto artículo, se presenta el estudio de un sistema de manufactura, que se simula y se analiza para mostrar las relaciones entre parámetros y medidas de desempeño. Con él se comprueban los aspectos de complejidad en elementos y en interacciones del sistema. Se verifica así que es necesario el enfoque de sistemas para la formulación de un modelo de mejora dirigido a la empresa mexicana sobre bases esbeltas.

En el último trabajo de este número, se consideran los problemas de estabilización de movimiento del hilo y su tensión cuando el hilo se enrolla del almacenador cilíndrico y rueda. La aplicación de las leyes principales de mecánica hacia una parte del hilo en movimiento con la finalidad de evaluar su tensión ha llevado a diferentes resultados si asumimos el caso de enrollamiento sin disipación de la energía. La aplicación de la ley de conservación del impulso lleva al resultado para el valor de tensión del hilo que es más que dos veces mayor que el resultado correspondiente que sigue de la aplicación de la ley de conservación de energía. A pesar de los detalles de consideración provistos para máquinas de tejer los enfoques propuestos son válidos para diferentes aplicaciones de la mecánica de hilos y la mecánica de cables y cuerdas.

Finalmente, en este número, en una página independiente, se señalan estadísticas de uso de 2010 extraídas de la página en Internet del Sistema de Información Científica Redalyc, las cuales nos dan una idea clara del impacto y la relevancia que *Científica* ha adquirido en estos cinco años, como parte de la hemeroteca en línea de publicaciones de investigación de Redalyc.

Propuesta de inicialización de los pesos en el filtro espacial LMS

Carlos Ríos-Ríos¹
Marco Antonio Acevedo-Mosqueda¹
Pogrebnyak Oleksiy²

¹Sección de Estudios de Posgrado e Investigación,
Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Zacatenco,
Instituto Politécnico Nacional.
Unidad Profesional 'Adolfo López Mateos', Col. Lindavista,
CP 07738, México, DF.
MEXICO.

²Centro de Investigación en Computación,
Unidad Profesional 'Adolfo López Mateos',
Av. Juan de Dios Bátiz s/n, Col. Nueva Industrial Vallejo,
CP 07738, México, DF.
MEXICO.

Tel. (+52) 5729 6000 ext. 54756

correo electrónico (email): crioss83@gmail.com
macevedo@ipn.mx

Recibido el 3 de agosto de 2010; aceptado el 30 de noviembre de 2010.

1. Resumen

En este trabajo se propone una alternativa para inicializar los pesos en un arreglo de antenas de siete elementos que utiliza el filtro espacial LMS, el objetivo es reducir el número de iteraciones que el filtro requiere para llegar a la solución de Wiener. Es importante reducir el número de iteraciones para que el patrón de radiación pueda adaptarse en el menor tiempo posible. La propuesta para la inicialización de los pesos se basa en el método de reducción de lóbulos secundarios en arreglos de antenas fijos. En este trabajo se utilizan los coeficientes de un filtro FIR pasa-bajas para inicializar el vector de pesos del filtro LMS. Como primer paso con el algoritmo LMS e inicializando los pesos con valores igual a cero, se modifica el patrón de radiación del arreglo agregando un nulo en la dirección de una señal de interferencia conocida a priori. Este resultado se compara cuando el vector de pesos se inicializa con esta propuesta. Para verificar la reducción en el número de iteraciones, se hace una comparación del error cuadrático medio y la relación señal a ruido cuando se inicializan los pesos con ambas formas.

Palabras clave: inicialización, LMS, FIR, funciones de ventanas.

2. Abstract (Proposal of Initialization for the Weights in the LMS Spatial Filter)

This paper proposes an alternative to initialize the weights in an array of antennas of seven elements that use the LMS spatial filter, the objective is to reduce the number of iterations that the filter required to reach the Wiener solution. It is important to reduce the number of iterations since the radiation pattern can be adapted as soon as possible. The proposal for the initialization of the weights is based on the method of reducing side lobes in fixed antenna arrays. In this paper we use the coefficients of a FIR low pass filter to initialize the weight vector of the LMS filter. First we use the LMS algorithm initializing the weight vector with zero values, to modify the array radiation pattern by adding a null in the direction of an interfering signal known *a priori*. We compare this result when the weight vector is initialized with this proposal. To verify the reduction in the number of iterations, as a comparison of the mean square error and signal to noise when the weights are initialized with both.

Key words: initialization, LMS, spatial filter, weights, FIR.

3. Introducción

Se utiliza un arreglo de siete antenas tipo dipolo distribuidas de forma equidistantes y se obtiene su factor de arreglo. En el factor de arreglo de un arreglo de antenas fijo los pesos son iguales a uno w_u [1][2]. Los valores de los pesos forman la respuesta al impulso del filtro de ventana rectangular. La respuesta en magnitud de esta ventana es un filtro pasa-bajas. Cuando se utiliza esta ventana no se modifica el patrón de radiación original.

Primero se analizan los arreglos fijos de antenas para modificar el patrón de radiación. En particular se abordará sólo el tema de reducción de lóbulos secundarios. Esta reducción de los lóbulos secundarios se logra utilizando las funciones de ventanas de Hamming, Kaiser, Haan, Triangular y Tukey. La respuesta en magnitud de este tipo de filtros es la de un filtro pasa-bajas. Y cuando estos coeficientes se usan como los pesos en el arreglo de antenas se obtiene un patrón de radiación con lóbulos secundarios muy pequeños. Se debe tener cuidado, ya que al

utilizar estas ventanas el lóbulo principal aumenta su ángulo de media potencia, es decir, el lóbulo principal se hace más ancho. Esto se debe a que la frecuencia de corte del filtro depende del número de coeficientes y para este caso sólo se tienen catorce coeficientes, por lo que no se tiene un control sobre dicha frecuencia de corte. Debido a lo anterior, en este trabajo se propone un filtro pasa-bajas truncado, ya que para el cálculo de los coeficientes se debe proporcionar el dato de la frecuencia de corte.

Como segundo paso se toman los pesos arrojados por las funciones de ventanas y por un filtro pasa bajas truncado como opciones para inicializar el vector de pesos del filtro LMS. Esta propuesta modifica el patrón de radiación original desde la primera iteración del algoritmo. Se inicializa con un patrón de radiación con lóbulos secundarios de menor amplitud con respecto al patrón original. La razón de disminuir la amplitud de los lóbulos secundarios es que en éstos se pueden presentar interferencias y para evitarlas se coloca un nulo en la dirección del lóbulo.

Finalmente, se modifica el patrón de radiación del arreglo agregando un nulo en la dirección de una señal de interferencia conocida *a priori*, con el algoritmo LMS inicializando los pesos con valores igual a cero. Este resultado se compara cuando el vector de pesos se inicializa con las funciones ventanas mencionadas y el filtro pasa-bajas truncado. Para verificar la reducción en el número de iteraciones, se hace una comparación del error cuadrático medio y la relación señal a ruido cuando se inicializan los pesos con ambas formas.

4. Desarrollo

4.1. Factor de arreglo

El sistema de antenas utilizado está formado por un arreglo de antenas tipo dipolo, dicho arreglo es asimétrico con una separación entre elementos equidistante tal como se muestra en la figura 1. El arreglo de la figura 1 es igual al utilizado por Widrow [1]. Para obtener el patrón de radiación de campo lejano total del arreglo de antenas, se utiliza el principio de superposición, que establece que el campo total (E_{θ}) producido por un conjunto de fuentes es la suma de los campos de las fuentes individuales. El campo E_{θ} es igual al producto entre el campo eléctrico del elemento y el factor de arreglo (FA). Se obtiene el factor de arreglo para graficar el patrón de radiación, los pesos w_u del arreglo fijo son iguales a uno [1][2]. Partiendo del arreglo asimétrico de la figura 1 el factor de arreglo es:

$$FA(\theta) = w_1 e^{(-6j\pi d \sin \theta)} e^{j(\omega_0 t)} + w_2 e^{(-6j\pi d \sin \theta)} e^{j(\omega_0 t - \pi/2)} + w_3 e^{(-4j\pi d \sin \theta)} e^{j(\omega_0 t)} + w_4 e^{(-4j\pi d \sin \theta)} e^{j(\omega_0 t - \pi/2)} + w_5 e^{(-2j\pi d \sin \theta)} e^{j(\omega_0 t)} + w_6 e^{(-2j\pi d \sin \theta)} e^{j(\omega_0 t - \pi/2)}$$

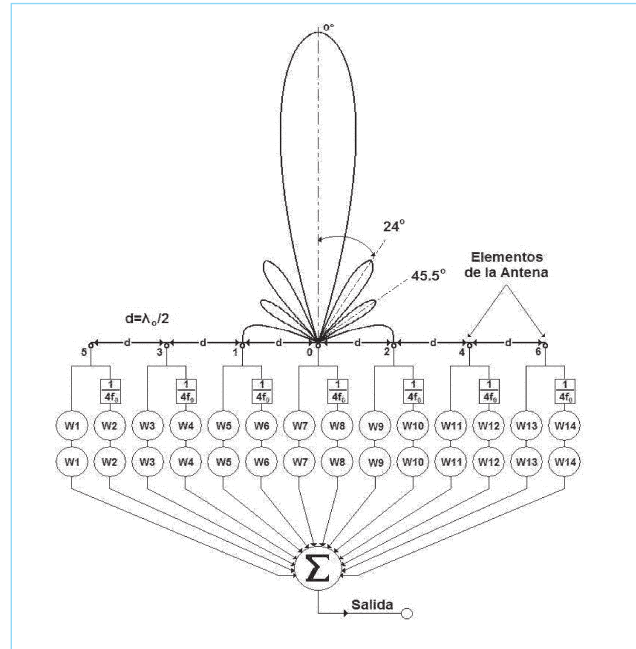


Fig. 1. Arreglo asimétrico de antenas tipo dipolo.

$$+ w_7 e^{j2\omega_0 t} + w_8 e^{(j\omega_0 t - \pi/2)} + w_9 e^{(-2j\pi d \sin \theta)} e^{j\omega_0 t} + w_{10} e^{(2j\pi d \sin \theta)} e^{j(\omega_0 t - \pi/2)} + w_{11} e^{(4j\pi d \sin \theta)} e^{j\omega_0 t} + w_{12} e^{(4j\pi d \sin \theta)} e^{j(\omega_0 t - \pi/2)} + w_{13} e^{(6j\pi d \sin \theta)} e^{j\omega_0 t} + w_{14} e^{(6j\pi d \sin \theta)} e^{j(\omega_0 t - \pi/2)} \quad (1)$$

Entonces el campo producido por el arreglo asimétrico de antenas de la figura 1 está dado por:

$$E_{\theta} = \frac{jk I_0 L e^{-jkr}}{4\pi r} \sin \theta * FA(\theta) \quad (2)$$

Donde L es la longitud del dipolo, η es la impedancia intrínseca del medio, θ es el ángulo como medida del eje z en coordenadas esféricas, r es la distancia de la antena a un punto de referencia.

Para el caso particular en este trabajo se usará el arreglo mostrado en la figura 1, con siete elementos separados por una distancia $d = \lambda_0/2$ entre elementos. En dicho arreglo, se puede apreciar el patrón de radiación formado por un lóbulo principal en 0° y lóbulos secundarios laterales a $\pm 24^\circ$ y $\pm 45.5^\circ$ con respecto al eje vertical. Los lóbulos secundarios o laterales por lo general son lóbulos no deseados, ya que radian energía electromagnética en una o más direcciones, así que es necesario reducir o eliminar dichos lóbulos.

Para el caso del factor de arreglo de la ecuación 1, se puede tomar el vector de pesos como:

$$w_u^T[n] = [[w_1, w_2, w_3, w_4, \dots, w_{14}] = [1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1] \quad (3)$$

Los valores de los pesos del vector (w) se pueden tomar como los coeficientes de la respuesta al impulso de un filtro de ventana rectangular de 14 muestras.

Al aplicar la transformada de Fourier para obtener la respuesta en magnitud del filtro:

$$|W(e^{j\omega})| = \left| \sum_{n=1}^{14} w_u[n] e^{-j\omega n} \right| \quad (4)$$

En la figura 2 se grafica la respuesta en magnitud del filtro donde se observa que se tiene un lóbulo principal y varios lóbulos secundarios dentro del intervalo de 0 a $\pi/2$. Se tiene un comportamiento de un filtro pasa-bajas con frecuencia de corte igual $\omega_c = 0.0640\pi$.

El valor de ω_c se utilizará para el cálculo de los coeficientes del filtro pasa-bajas con los que se inicializa el vector de pesos del algoritmo LMS.

4.2. Reducción de lóbulos secundarios

Una forma de reducir los lóbulos secundarios en arreglos fijos, es utilizando los coeficientes de funciones de ventanas y filtros pasa-bajas como los pesos w en el factor de arreglo [2][5]. Los pesos toman los valores de la respuesta al impulso de las funciones de ventanas y filtros. Existen un gran número de funciones de ventana y de métodos para el cálculo de éstos. En este trabajo se presentan sólo algunas funciones de ventanas las cuales se calculan por las siguientes expresiones:

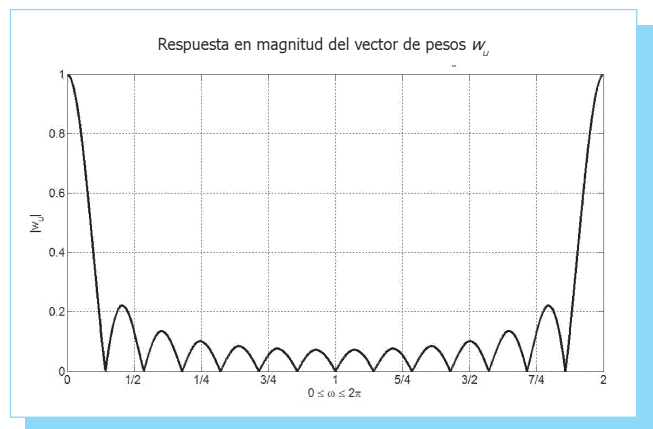


Fig. 2. Respuesta en magnitud $|W(e^{j\omega})|$.

$$Hamming(n) = 0.54 - 0.46 \cos(2\pi n/N), 0 \leq n \leq N \quad (5)$$

$$Hann(n) = 0.5 [1 - \cos(2\pi n/N)], 0 \leq n \leq N \quad (6)$$

$$Triangular(n) = \begin{cases} \frac{2n}{N+1}, & 1 \leq n \leq \frac{N+1}{2} \\ \frac{2(N-n+1)}{N+1}, & \frac{N+1}{2} \leq n \leq N \end{cases} \quad (7)$$

$$Tukey(n) = \begin{cases} 1.0, & 0 \leq |n| \leq \alpha \frac{N}{2} \\ \frac{1}{2} [1 + \cos(\pi \frac{n - \alpha N/2}{2(1 - \alpha) N/2})], & \alpha \frac{N}{2} \leq n \leq N \end{cases} \quad (8)$$

De las ecuaciones anteriores se obtienen los coeficientes de la respuesta al impulso para cada función de ventana, se puede notar que para obtenerlos no se requiere conocer la frecuencia de corte ω_c . Cada ventana reduce los lóbulos secundarios del factor de arreglo, pero hacen un poco más ancho el lóbulo principal. Además, dependiendo del número de coeficientes (que es igual al número de elementos de antena) el ancho del lóbulo principal en el espectro de magnitud cambia.

Tomando como referencia la respuesta al impulso de la ventana rectangular de la ecuación 3 y conociendo que se comporta como un filtro pasa-bajas se propone calcular los coeficientes de un filtro pasa-bajas tipo FIR truncado. Ya que a diferencia de las funciones de ventana es posible controlar la frecuencia de corte y por lo tanto el ancho en el lóbulo principal. La respuesta en frecuencia de un filtro ideal pasa-bajas tiene una respuesta en fase lineal [6]. El filtro truncado solo toma algunos valores de los coeficientes de la respuesta al impulso en el intervalo de $-M \leq n \leq M$ y fuera del intervalo son igual a cero [6], así se llega a una longitud finita de $N = 2M + 1$, teniendo:

$$h_{pb}[n] = \begin{cases} \frac{2 * \text{sen } \omega_c (n - M)}{\pi(n - M)}, & 1 \leq n \leq N - 1 \\ 0, & \text{para otro caso} \end{cases} \quad (9)$$

De la ecuación anterior se puede notar que los coeficientes se han multiplicado por dos, lo que proporciona un mejor resultado en la inicialización del vector de pesos.

De acuerdo a lo anterior, para sistemas con arreglos de antena adaptivos se propone inicializar el vector de pesos utilizando los filtros mencionados, con el propósito de reducir el número de iteraciones que consume el proceso de adaptación.

En la figura 1 se tiene un lóbulo secundario a 45.5° en el patrón de radiación, se puede suponer una señal de interferencia o ruido incidiendo en esta misma dirección y que se desea eliminar. Para conseguir anular este lóbulo se usan filtros adaptivos, en este trabajo se utiliza el algoritmo LMS. Se tomará el caso cuando la interferencia se encuentra a 45.5°, al igual que el utilizado por Widrow [1].

4.3. Algoritmo LMS

Comprende dos procesos principales, un proceso de filtrado que implica el cálculo de la salida generada por un coeficiente y la generación de una estimación del error comparando esta salida con la respuesta deseada. Un proceso adaptativo realiza el ajuste automático de los coeficientes del filtro de acuerdo con la estimación del error. En la figura 3 se presenta el esquema modificado del sistema adaptivo el cual usa el algoritmo LMS como ajuste. Entonces el algoritmo LMS se puede resumir en los siguientes pasos:

Inicialización del vector de pesos $w_F(n)$

1. Calcular el filtro de salida $s(n) = w^T(n) x(n)$
2. Calcular la estimación del error $\epsilon(n) = d(n) - s(n)$
3. Calcular el siguiente filtro de vector de pesos $w(n+1) = w(n) - 2\mu\epsilon(n)$
4. Repetir el proceso desde el paso 2 hasta que los pesos converjan.

Donde μ es el factor de convergencia el cual se propone que sea 1/12 por el inverso del valor propio máximo:

$$\mu = \frac{1}{12e_{\max}} \quad (10)$$

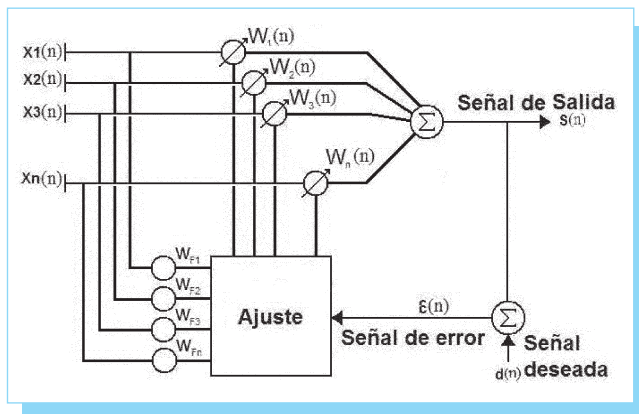


Fig. 3. Algoritmo LMS modificado.

Donde $s(n)$ es la salida del sistema, $d(n)$ es la señal deseada del sistema, $x(n)$ es la entrada del sistema y $\epsilon(n)$ es el error.

Los valores iniciales de los pesos $w(n)$ de acuerdo a Widrow son iguales a cero [1] (W_{Widrow}). En este trabajo el vector de pesos se tomará de acuerdo a los coeficientes de las funciones de ventana ($W_{WHamming}$, W_{WHann} , $W_{WTriangular}$ y W_{WTukey}) y el filtro truncado (W_{2FPb}). En la figura 4 se presentan de forma gráfica los valores de los coeficientes de las funciones de ventana así como del filtro pasa-bajas.

En la tabla 1 se muestran los valores que el vector de pesos tomará para cada caso.

Utilizando el algoritmo LMS se introduce un nulo en el lóbulo secundario a 45.5°, calculando la relación señal a ruido y el error cuadrático medio en cada iteración. Para verificar la reducción en el número de iteraciones, se hace una comparación del error cuadrático medio y la relación señal a ruido cuando se inicializan los pesos de acuerdo a la tabla 1, en la tabla se presenta w_{Widrow} (1), $w_{WHamming}$ (2), w_{WHann} (3), $w_{Wtriangular}$ (4), w_{WTukey} (5), w_{2FPb} (6).

$$SNR = \frac{w^H E[x_s x_s^H] w}{w^H E[x_r x_r^H] w} \quad (11)$$

$$MSE = \epsilon^2(j) = [d(j) - w^T(j) X(j)]^2 \quad (12)$$

Donde w^H es la transpuesta conjugada de w , $E[x_s x_s^H]$ es la matriz de correlación de la señal deseada x_s , $E[x_r x_r^H]$ es la matriz de correlación de la señal con ruido x_r [3]. Donde el ruido es generado en Matlab con la función random y almacenado para tener las mismas características en cada prueba.

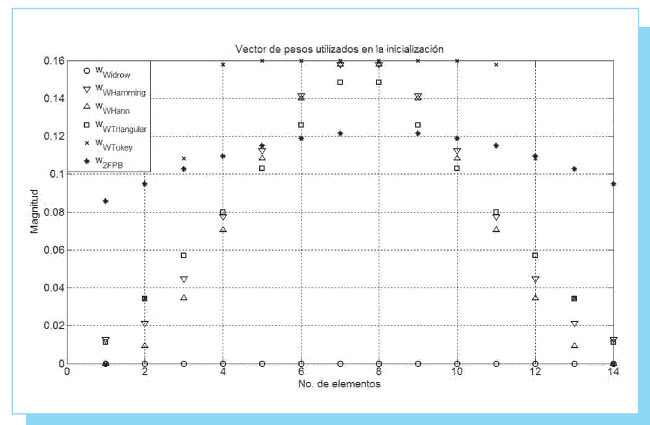


Fig. 4. Vector de pesos propuestos para la inicialización.

Tabla 1. Coeficientes usados para la inicialización del filtro espacial LMS.

1	2	3	4	5	6
0	0.0144	0.0000	0.0129	0.0000	0.0857
0	0.0239	0.0103	0.0386	0.0389	0.0947
0	0.0502	0.0389	0.0643	0.1219	0.1027
0	0.0872	0.0792	0.0900	0.1774	0.1095
0	0.1266	0.1219	0.1157	0.1800	0.1150
0	0.1592	0.1574	0.1414	0.1800	0.1190
0	0.1776	0.1774	0.1671	0.1800	0.1214
0	0.1776	0.1774	0.1671	0.1800	0.1222
0	0.1592	0.1574	0.1414	0.1800	0.1214
0	0.1266	0.1219	0.1157	0.1800	0.1190
0	0.0872	0.0792	0.0900	0.1774	0.1150
0	0.0502	0.0389	0.0643	0.1219	0.1095
0	0.0239	0.0103	0.0386	0.0389	0.1027
0	0.0144	0.0000	0.0129	0.0000	0.0947

Tabla 2. Relación señal a ruido (*SNR*).

Núm. Iter.	5	9	11	13
unitarios	15.9899	15.9899	15.9899	15.9899
$W_{LMS\ Zero}$	17.3988	18.5788	16.4999	22.1462
$W_{LMS\ WHam}$	56.0708	43.7306	37.2030	40.4285
$W_{LMS\ WHan}$	53.2198	40.9912	34.5887	37.9133
$W_{LMS\ WTri}$	55.4901	43.2137	36.7069	39.9491
$W_{LMS\ WTuk}$	69.1994	57.1094	50.1589	53.0299
$W_{LMS\ 2FPb}$	66.0217	54.1158	47.3477	50.3756
Núm. Iter.	17	20	24	50
unitarios	15.9899	15.9899	15.9899	15.9899
$W_{LMS\ Zero}$	22.2966	35.2996	29.2026	88.7817
$W_{LMS\ WHam}$	37.5467	49.1223	42.3988	101.6309
$W_{LMS\ WHan}$	35.1990	46.8746	40.2000	99.4606
$W_{LMS\ WTri}$	37.0958	48.6887	41.9737	101.2108
$W_{LMS\ WTuk}$	49.5031	60.6631	53.7268	112.8319
$W_{LMS\ 2FPb}$	47.1435	58.4996	51.6657	110.8325

4.4. Resultados

En la tabla 2 se presentan los resultados de la relación señal a ruido para diferente número iteraciones. De la tabla 2 se puede observar que al aumentar el número de iteraciones en general la relación señal a ruido también aumenta. Sin embargo, cuando se pasa de la iteración número 9 a la 11, la *SNR* disminuye y comienza a aumentar hasta llegar a la iteración 20. De la iteración 20 a la 24 se vuelve a presentar este mismo efecto. Finalmente, en la iteración 50 se tiene una *SNR* mayor a todas las demás, pero no se tomará en cuenta ya que en este trabajo lo que se desea es disminuir las iteraciones. De acuerdo a los resultados mostrados en la iteración 5 se tiene una *SNR* mayor que en las demás iteraciones, excepto en la iteración 50. Desde este punto de vista, podría considerarse que éste es el momento adecuado para detener el LMS, pero debe considerarse que los pesos apenas comenzarán a estabilizarse. Por lo que se tomará como referencia el caso de nueve iteraciones.

En la iteración número 9 se tiene una *SNR* de 57.1 y 54.11 para la ventana de Tukey y el filtro truncado respectivamente. Estos valores son de los más altos entre la iteración 9 a la 24. Estas *SNR* podrían representar una buena opción para

detener el algoritmo LMS. Sin embargo, hasta ahora no es suficiente este criterio para establecer en qué momento los pesos obtenidos ya han introducido un nulo en la dirección deseada.

En la tabla 3 se presentan los resultados del error cuadrático medio a diferentes iteraciones. En la tabla se puede observar que en la iteración número 9 en los casos de Tukey y el filtro truncado los valores del MSE son pequeños comparados con los demás casos. De acuerdo a estos resultados y a los de la tabla 2 las funciones de ventanas mencionadas proporcionan los mejores resultados y reducen el número de iteraciones comparadas con las otras funciones de ventanas y la inicialización del vector con ceros.

En la figura 5 se presenta el comportamiento del error cuadrático medio cuando se inicializa el LMS con las funciones de ventana. Se puede observar que en todos los casos la forma de la curva es similar, pero de magnitud muy diferente. De la figura 5 se observa que se tienen valores menores del MSE cuando se utilizan las funciones de ventana comparados cuando se inicializa con un vector de pesos iguales a cero.

Tabla 3. Error cuadrático medio (MSE).

Pesos/ Núm. Iter.	5	9	11	13
$W_{LMS\ Zero}$	0.0499	0.2267	0.3443	0.2332
$W_{LMS\ WHam}$	0.0033	0.0118	0.0179	0.0121
$W_{LMS\ WHan}$	0.0018	0.0195	0.0296	0.0200
$W_{LMS\ WTri}$	0.0073	0.0130	0.0198	0.0134
$W_{LMS\ WTuk}$	0.0227	0.0009	0.0014	0.0009
$W_{LMS\ 2FPb}$	0.0323	0.0014	0.0022	0.0015
Pesos/ Núm. Iter.	17	20	24	50
$W_{LMS\ Zero}$	0.1579	0.0663	0.0138	4.34970e-9
$W_{LMS\ WHam}$	0.0082	0.0035	0.0007	0.22663e-9
$W_{LMS\ WHan}$	0.0136	0.0057	0.0012	0.37342e-9
$W_{LMS\ WTri}$	0.0091	0.0038	0.0008	0.24963e-9
$W_{LMS\ WTuk}$	0.0006	0.0003	0.0001	0.01721e-9
$W_{LMS\ 2FPb}$	0.0010	0.0004	0.0001	0.0272e-9

En la figura 6 se observa que la forma de las curvas de la SNR para las funciones de ventana es muy similar en comparación con la gráfica en negro (vector de inicialización igual a cero). Se aprecia que para Tukey y el filtro truncado, después de la iteración número 5 se obtienen valores de la SNR mayores a los demás casos.

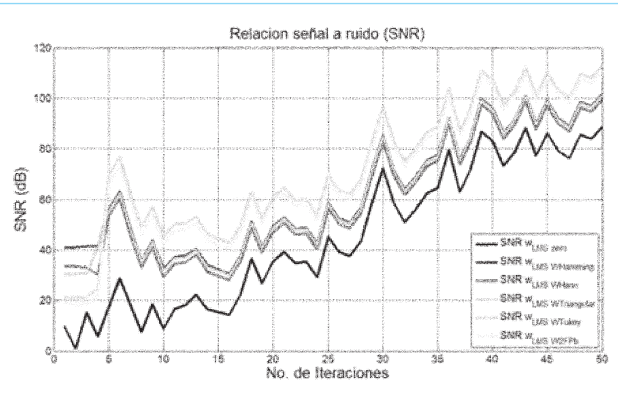


Fig. 6. Relación señal a ruido.

En la figura 7 se observa el patrón de radiación obtenido a nueve iteraciones, en color negro se tiene el patrón de radiación original y en color azul cuando los valores de los pesos del vector de inicio son iguales a cero, propuestos por Widrow [1].

En la figura 7 se aprecia que a nueve iteraciones, cuando se inicializa con valores iguales a cero no se puede colocar un nulo sobre el ángulo deseado, sin embargo conserva la forma del lóbulo principal y de los lóbulos laterales. Cuando se inicializa con los coeficientes de las funciones de ventana de Hamming, Hann y Triangular se logra minimizar todos los lóbulos y se coloca el nulo en la dirección de 45.5°. Sin embargo, se altera la forma del patrón de radiación original al minimizar todos los lóbulos laterales. También se observa que el

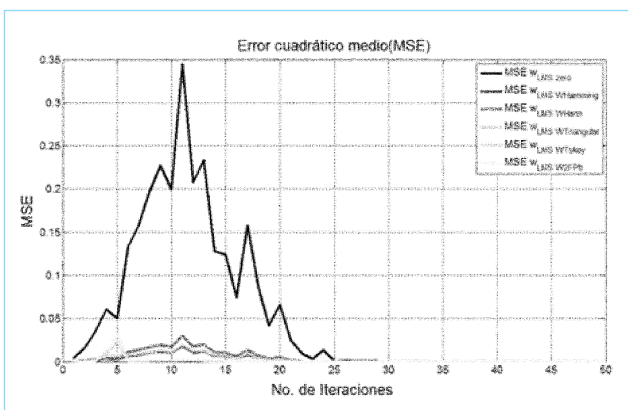


Fig. 5. Gráfica del error cuadrático medio (MSE).

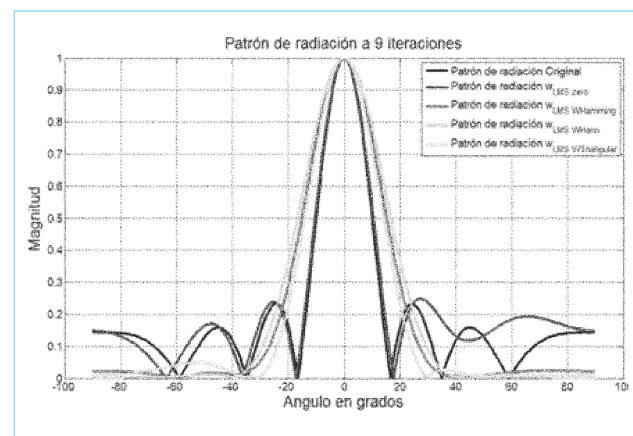


Fig. 7. Patrón de radiación a nueve iteraciones.

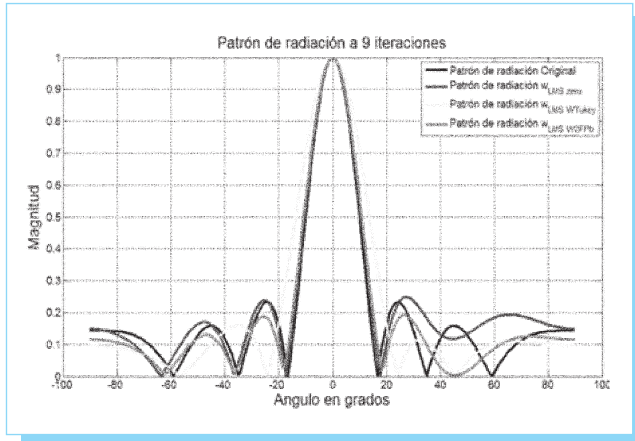


Fig. 8. Patrón de radiación a nueve iteraciones.

lóbulo principal al utilizar Hamming, Hann y Triangular es ensanchado, y no conserva la forma del lóbulo principal original.

En la figura 8 se presenta el patrón de radiación a 9 iteraciones para los pesos iniciales con la función de ventana Tukey y el filtro pasa bajas truncado, estas propuestas tienen el menor MSE y un mayor SNR. Se observa que con Tukey se coloca un nulo en la dirección deseada, pero aumenta el ancho del lóbulo principal, es decir no conserva la forma del patrón de radiación original. Además, desplaza los lóbulos laterales y reduce el número de éstos. Por lo que no es una buena alternativa para la inicialización del vector de pesos.

Inicializando con el filtro pasa-bajas se observa que conserva la forma y el ancho del lóbulo principal original y coloca el nulo en el lóbulo secundario a 45.5° . No altera demasiado la forma y el número de los lóbulos secundarios del patrón original.

5. Conclusiones

De acuerdo a los resultados presentados el utilizar funciones de ventana y el filtro pasa-bajas truncado proporcionan una buena alternativa para la inicialización del vector de pesos en el algoritmo LMS. Ya que reducen el número de iteraciones que se requieren para adaptar el patrón de radiación.

Los mejores resultados de la SNR y el MSE con un número de nueve iteraciones se obtienen cuando se utiliza la ventana de Tukey y el filtro truncado pasa-bajas. Sin embargo, el filtro pasa-bajas conserva mejor la forma del patrón de radiación original al tener el mismo ancho sobre el lóbulo principal y al poner el nulo en la dirección deseada de 45.5° . Esto se debe a que con el filtro pasa-bajas es posible controlar la frecuencia de corte y con ello el ancho del lóbulo principal.

Al observar los resultados de patrón de radiación, SNR y MSE con la inicialización del vector de pesos con el filtro pasa-bajas truncado se puede asegurar que el proceso de filtrado del LMS se realizará en un menor tiempo que cuando se inicializa el vector de pesos con cero.

6. Referencias

- [1] Widrow, B., Mantey, P. E., Griffiths, L. J. y Goode B. B., "Adaptive Antenna Systems", *Proceedings of the IEEE*, vol. 55 núm.12, 2143-2159, diciembre, 1967.
- [2] Gross, F. B., *Smart Antennas for Wireless Communications*, McGraw-Hill, 1995.
- [3] Godara, L. C., *Smart Antennas*, CRC press, 2004.
- [4] Lau, Y. S., Hussain, Z. M. y Harris, R. J., "A Weigh-vector LMS algorithm for adaptive beam-forming", *Proceedings Analog and Digital Techniques in Electrical Engineering*, 21-24 noviembre 2004, Chiang Mai, Thailand.
- [5] Sung, S., Ham F. M. y Shelton, W., "A New Robust Neuronal Network Method for Coherent Interference Rejection in Adaptive Array Systems", *International Joint Conference on Neural Networks*, pp. 119-124, 17-21 junio 1990, San Diego CA, USA.
- [6] Mitra, S. K., *Digital Signal Processing*, 2a ed., McGraw-Hill, 2001.
- [7] Brookner, E., "Trends in Array Radars for the 1980s and Beyond," *IEEE Antenna and Propagation Society Newsletter*, abril, 1984.
- [8] Steyskal, H., "Digital Beamforming Antennas-An Introduction", *Microwave Journal*, pp. 107-124, enero, 1987.
- [9] Liberti, J., y Rappaport, T., *Smart Antennas for Wireless Communications: IS-95 and Third Generation CDMA Applications*, New York, Prentice Hall, 1999.
- [10] Margerum, D. L., "Self-Phased Arrays" (Chap. 5) in *Microwave Scanning Antennas*, New York: Academic Press, 1964.

ACE-X 2011

5th International Conference on Advanced Computational Engineering and Experimenting

Abstract Submission Deadline:
15 March 2011

AREAS:

- Material modelling and constitutive relationships
- Homogenisation and localisation
- Plasticity
- Impact and crash
- Damage and fracture
- Transport phenomena
- Fluid-structure interaction
- Nanomechanics
- Dynamics
- Biomechanics

3, 4, 5 & 6 July 2011, Algarve, Portugal.

www.ace-x2011.com/

Análisis de tuberías de acero A-35 gr. B expuesto a fluidos geotérmicos

Israel Saucedo-Meza¹
Carlos A. Miranda-Herrera²
Guillermo Cine-Páez¹
Orlando Susarrey-Huerta³
Antonio Corona-Guzmán¹

¹ Universidad Autónoma de Baja California,
Facultad de Ingeniería,
Mexicali, Baja California, CP 21900.
MEXICO.

² Campo Geotérmico Cerro Prieto,
Comisión Federal de Electricidad (CFE),
Mexicali, Baja California.
MEXICO.

³ Sección de Estudios de Posgrado e Investigación,
Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica,
Instituto Politécnico Nacional,
Unidad Profesional 'Adolfo López Mateos',
México, DF, CP 07738.
MEXICO.

correo electrónico (email): israelsauceda@hotmail.com

Recibido el 18 de marzo de 2010; aceptado el 27 de septiembre de 2010.

1. Resumen

El presente trabajo se enfoca en la problemática de la red de tuberías de la geotérmica de cerro prieto, por donde se transporta un gran porcentaje de ácido sulfhídrico, dióxido de carbono y gases incondensables, lo cual produce una mezcla altamente corrosiva ocasionando dureza superficial y pérdida del material. Debido a lo anterior y con el fin de evaluar la vida remanente de las tuberías en operación, se obtienen las curvas de fatiga del material A-53 gr. B, antes y después de ser expuestos al medio.

Palabras clave: corrosión, tuberías de acero, fatiga, dureza.

2. Abstract (Analysis of Steel Pipes A-53 gr. B Exposed in Geothermal Fluid)

In this work a pipeline network problem of Cerro Prieto geothermal was analysed. On this pipeline network is transported a large percentage of hydrogen sulphide, carbon dioxide and no condensable gases, which produces a highly corrosive mixture causing surface hardness and loss of material. Due to above mentioned, and in order to assess the remaining life of pipes in operation, the fatigue curves of material A-53 gr. B were obtained before and after exposure to the environment.

Key words: corrosion, pipeline, fatigue, hardness.

3. Introducción

El campo geotérmico de Cerro Prieto, desarrollado y operado por la Comisión Federal de Electricidad (CFE), inició operaciones de generación de energía eléctrica en 1973 y en la actualidad cuenta con 720 MW de capacidad instalada. El yacimiento es de tipo líquido dominante con fluidos de características clorurado-sódicas y pH básico a las condiciones de separación. Este campo se localiza a 30 km al sureste de la ciudad de Mexicali en Baja California y el área de alteración hidrotermal se extiende a 32 km². El campo geotérmico se aloja a lo largo de un sistema activo de la falla de San Andrés [1].

El campo geotérmico consta de dos yacimientos de los cuales se alimentan los pozos de extracción de fluido geotérmico. Para la extracción se cuenta con instalaciones subsuperficiales y superficiales que mandan vapor a las centrales generadoras. Las instalaciones subsuperficiales son la tubería de extracción de vapor (ademe o ranurada) en la parte inferior (aproximadamente entre 3 y 6 km de profundidad) y la tubería cementada de conducción (*casing*) API L-80 que va hacia las instalaciones superficiales, ambas colocadas con equipo de perforación. El equipo superficial es el que conduce el vapor a las centrales generadoras; este equipo consta de una plataforma donde se encuentran los ciclones (separadores de vapor), válvulas de esfera, silenciadores y arreglos de tu-

berías ASTM A-53 gr. B), las cuales se dividen en ramales de vaporductos y colectores.

Existen cuatro centros de máquinas donde se alojan las turbinas, las cuales se denominan: Cerro Prieto Uno (CPI), Cerro Prieto Dos (CPII), Cerro Prieto Tres (CPIII) y Cerro Prieto Cuatro (CPIV). En la tabla 1 se enumeran sus respectivas producciones.

El 1.5% del peso del vapor extraído corresponde a gases incondensables, de los cuales, el 96% es CO₂, el 3% es H₂S y el 1% otro tipo de gases; además, 3/4 partes del yacimiento es mezcla saturada a 300°C @ 900 psi, con una profundidad de 3-9 km.

Existen dos problemas principales en el transporte de fluido geotérmico desde el área de extracción en los pozos hasta las centrales generadoras de electricidad; uno es la incrustación y el otro es la corrosión. Por ser el segundo de naturaleza más destructiva, este trabajo se enfoca en estudiar el daño que produce el fenómeno de corrosión al acero A-53 gr. B.

El acero A-53 gr. B, es un material económico y adecuado para las tuberías y los recipientes sujetos a presión con fluidos geotérmicos, debido a la inmunidad total de este metal al ataque del H₂S en ausencia de oxígeno. La inmunidad del acero A-53 gr. B, se deriva de una película autoprotectora de sulfuro de hierro (producto de corrosión) que rápidamente recubre las paredes internas de las tuberías, producida por la acción del H₂S sobre el acero común arriba de 30°C (bajo esta temperatura el material se vuelve vulnerable) y un pH>4[2]. El fenómeno de corrosión en estos casos, ocurre cuando entra en solución CO₂ y H₂S con el agua condensada que hay en las paredes de las tuberías, esto sólo ocurre en las tuberías donde no hay concentraciones de sílice incrustada (vaporductos).

El presente trabajo de investigación se enfoca en la zona de CPIII, específicamente en el colector de vapor que va a la central generadora. Esta zona, al igual que la de CPII, tienen un pH neutro con un valor promedio de 5.68 (+ 1.21), aunque en

algunos pozos se nota un carácter ácido, sobre todo en la zona norte correspondiente a CPIII en pozos de alta entalpía. La entalpía de descarga de estos pozos es mayor que la entalpía de la fase líquida a la temperatura de yacimiento, lo que indica un proceso de ebullición (*flasheo*) en esta zona, producido por la pérdida de presión en el yacimiento. Esto favorece el transporte o arrastre de especies ácidas hacia las líneas de vapor, ya que los valores más altos de CO₂ y H₂S se encuentran en las zonas con mayor ebullición.

La mezcla producida por los pozos es separada en vapor y en salmuera por medio de separadores ciclónicos de vapor tipo Weber (véase figura 1).

La mezcla ingresa al separador por una entrada tangencial y produce una evaporación instantánea (*flasheo*) por el diferencial de presión. El agua separada (salmuera) cae por gravedad y el vapor viaja a la parte superior por diferencia de densidades, donde es extraído por un tubo concéntrico y a través del cual se envía a las centrales generadoras de energía. La salmuera (con pH alto) sale del separador como desperdicio con sílice como principal sólido en suspensión, el cual es altamente incrustante.

El flasheo en la separación (véase figura 2) remueve los componentes ácidos hacia la fase de vapor y precipita los sólidos en suspensión hacia la fase líquida aumentando su pH, lo que lo vuelve sumamente incrustante. Por lo que en un caso extremo, si la evaporación es total los sólidos quedarán incrustados en el punto exacto donde ocurra el *flasheo*. La presencia de los componentes arrastrados en la descarga total provoca una disminución en el pH (se vuelve ácido).

Tabla 1. Producción de energía en Cerro Prieto.

CPI	4X37.5MW 1X30MW	180MW
CPII	2X110MW	220MW
CPIII	2X110MW	220MW
CPIV	4X25MW	100MW

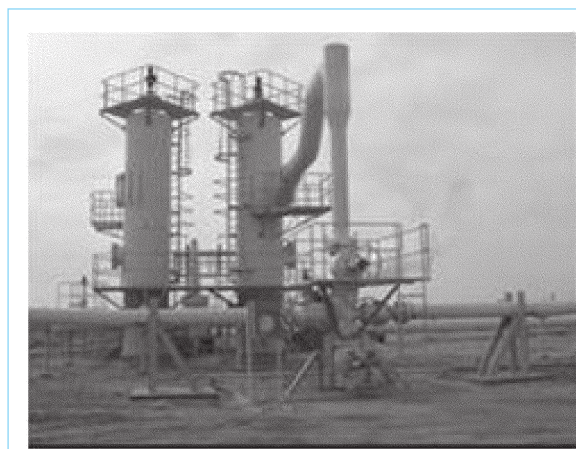


Fig. 1. Separadores ciclónicos de alta presión (derecha) y baja presión (izquierda).

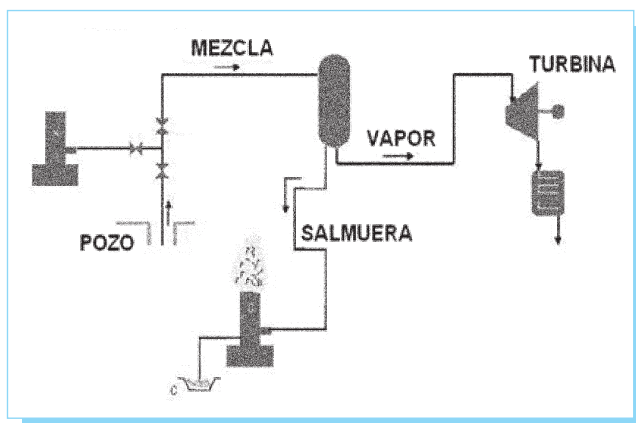


Fig. 2. Sistema de flasheo sencillo.

Los separadores ciclónicos arrastran un poco de agua hacia la fase de vapor en forma de niebla cuando las partículas de agua son pequeñas (menos de 5 micrones). Esta agua se suma al condensado de vapor en la tubería de conducción (colectores) y viaja en el fondo de la tubería.

Investigaciones previas realizadas en Cerro Prieto demostraron que el condensado de vapor utilizado como lavado de vapor genera corrosión localizada por picadura en superficies de acero A-53 gr. B. En los productos de corrosión predominaron sulfuros y óxidos hidratados de hierro, lo que infirió que la inyección de 2% de humedad a 56°C incrementará la corrosividad debido al ingreso inevitable de gases disueltos como el oxígeno en el agua de lavado.

En la actualidad, los pozos que han sufrido fallas por corrosión han sido reparados disminuyendo su profundidad, haciéndolos más someros para que exploten el yacimiento en otros estratos; lo que ha dado buenos resultados. Sin embargo, también disminuye la temperatura y la presión del pozo.

4. Definición del problema

Todos los vaporductos están sujetos a esfuerzos por los diferenciales de temperatura, presión, operación y corrosión. Cuando los materiales se exponen a este tipo de fenómeno corrosión/esfuerzos, el metal reduce su resistencia a la fatiga, y está íntimamente relacionado al tipo de picadura inducida por el medio ambiente en el cual se encuentra esforzado. El daño provocado por corrosión/fatiga es mayor que la suma del daño provocado por los esfuerzos cíclicos o por la corrosión.[3,4] Por lo tanto, en dicho campo se presentan tres factores:

- El CO_2 produce corrosión dulce (adelgazamiento del metal y formación de hojuelas).
- Aceros con suficiente esfuerzo de cedencia para soportar corrosión dulce, se vuelven susceptibles a la fractura, debido a esfuerzos por corrosión (SCC, *stress cracking corrosion*) producido por la inclusión de hidrogeno que vuelve quebradizo al acero.
- Fatiga.

Trabajos de Lichti [5,6] muestran el comportamiento de los aceros al ser sometidos a ataques de especies corrosivas contenidas en fluidos geotermales en Nueva Zelanda, presentándose la erosión-corrosión en las tuberías de vapor de acero al carbón. Además, menciona que al dejar de operar la tubería el vapor es condensado formando disoluciones acidas de la película protectora de magnetita (Fe_3O_4), la cual se desprende por el flujo/impacto del condensado cuando se pone en operación.

El objetivo principal de este proyecto de investigación, es obtener curvas de fatiga de las tuberías de los vaporductos antes y después de ser expuestos a medios corrosivos, con el fin de evaluar la vida útil de servicio.

El material utilizado para la elaboración de las probetas es de ASTM A-53 gr. B, el cual tiene un módulo de elasticidad $E=184.09\text{GPa}$ @ 316°C, una densidad $\rho=7850\text{kg/m}^3$ y un esfuerzo de cedencia $S_y=103.42\text{MPa}$. Además, el material tiene una composición química en porcentaje de 0.3C, 1.2Mn, 0.05P, 0.045S, 0.4Cu, 0.40Ni, 0.4Cr, 0.15Mb, 0.08Va; la cual corresponde a la de los aceros al bajo carbono de la serie AISI 1000.

Una vez calibrados los especímenes, se coloca el marco de prueba en la vasija contenedora (véase figura 3) donde se lleva a cabo el experimento. Esta vasija se encuentra en una toma de condensado de un subcolector que lleva vapor a la central generadora de CPIII, debido a que en esta zona se encuentra el vapor con pH más bajo y está expuesta a las mismas condiciones de corrosión y temperatura que el ducto principal, quedando éstos expuestos a las condiciones reales de operación.

5. Resultados obtenidos

En la figura 4a, se muestra la corrosión generada en 30 días de exposición al medio corrosivo en presencia de aire y en la figura 4b, están los especímenes sometidos a las mismas condiciones de carga pero en ausencia de aire; nótese que en este último no existen tantos productos de corrosión pero sí una capa autopasivadora oscura. Dichos especímenes fueron

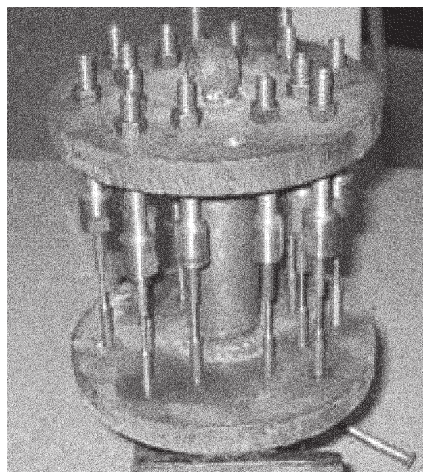


Fig. 3. Especímenes pretensados antes de ser sumergidos (2 600 N).

expuestos a un análisis de fatiga en una máquina universal de ensayos dinámicos tipo hidráulico MTS, con una capacidad de cinco toneladas. Ésta se encuentra controlada por una computadora personal que puede operar con características mínimas de 8 Mb en Ram, un disco duro de 500 Mb y una velocidad de 66 Mb. El sistema hidráulico consiste de una bomba de 10 H.P., a 2 500 Psi, la cual funciona independientemente de la computadora.

En primera instancia se obtiene la curva de fatiga del material virgen A-53 gr. B, la cual se muestra en la gráfica 1.

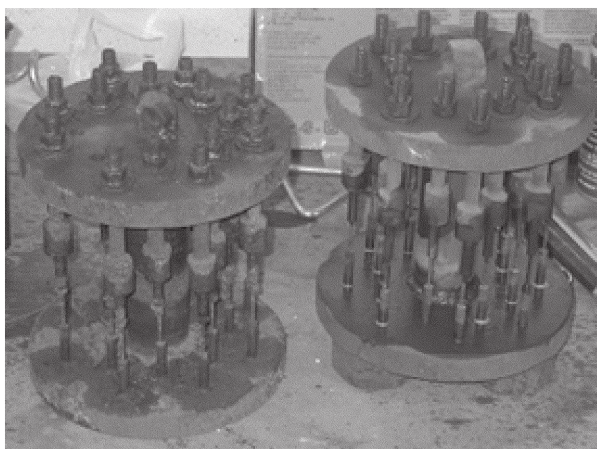
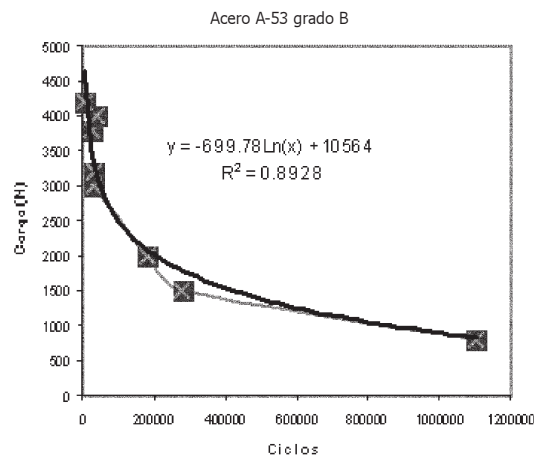


Fig. 4. Especímenes pretensados.



Gráfica 1. Curva de fatiga del material virgen.

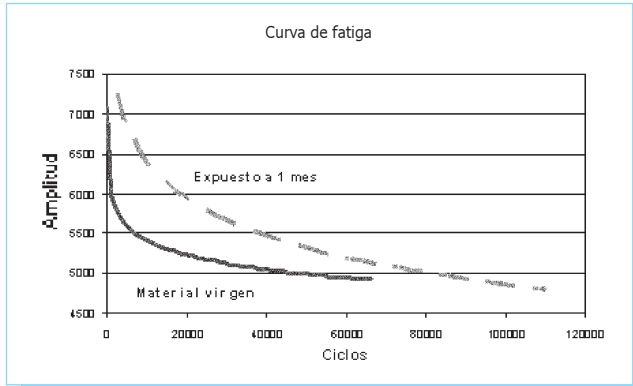
Los especímenes expuestos al medio fueron lavados con ácido clorhídrico de baja concentración para eliminar residuos de cualquier contaminante al que hayan sido expuestos durante el experimento, e inmediatamente después fueron secados. Posteriormente se les obtiene el peso, registrando una disminución en comparación del material virgen. Mientras que en la dureza se encontró un aumento, como se muestra en la tabla 2.

El análisis de desgaste reflejado en la falta de peso en los elementos mecánicos no es nuevo, se presenta en múltiples

Tabla 2. Comparación del peso y dureza en el material virgen y dañado.

	Peso gramos (mat. virg.)	Peso gramos (mat. dañ.)	Dureza Rockwell B (mat. virg.)	Dureza Rockwell B (mat. dañ.)
1	15.35	15.30	95.10	95.11
2	15.31	15.27	95.85	96.00
3	15.41	15.35	94.60	95.90
4	15.41	15.36	95.60	97.20
5	15.28	15.25	94.30	95.60
6	15.54	15.48	94.60	94.61
7	15.57	15.52	95.90	95.65
8	15.32	15.27	95.80	96.10
9	15.39	15.34	94.80	95.20

mat. virg. = material virgen; mat. dañ. = material dañado



Gráfica 2. Curva de fatiga del material virgen y expuesto 30 días.

sistemas como lo recalcan trabajos de Urriolagoitia-Calderón y asociados, y Rodríguez-Cañizo y asociados [7,8].

En la gráfica 2 se presenta una comparación de las curvas de fatiga obtenidas del material virgen y del material expuesto a una carga de 2 600 N y a 30 días en el medio corrosivo. En ésta se puede apreciar que debido al endurecimiento superficial del material al exponerse al medio corrosivo, se presentan niveles de amplitudes más altas que las del material virgen.

En la figura 5 se muestran las regiones de ruptura del material virgen, se tiene una superficie que manifiesta un material dúctil debido al cuello formado al momento de la falla por fatiga, mientras que en la figura 6 se aprecia una ruptura característica de un material frágil.

6. Conclusiones

Los resultados demuestran que a medida que el material se expone al residuo corrosivo éste pierde peso y tiende a fragilizarse por endurecimiento; cambiando de una fractura dúctil a una frágil. Los especímenes sometidos al ambiente corrosivo aireado se corroen más fácilmente debido al contacto con el oxígeno.

El material A-53 gr. B, se endurece superficialmente a medida que se expone al medio, lo que genera un incremento en la amplitud de esfuerzos al momento de obtener las curvas de fatiga del material.

Para contrarrestar los niveles de corrosión, los separadores en las plantas generadoras deben de ser solamente secadores de humedad y los ciclones en los pozos deben de separar el

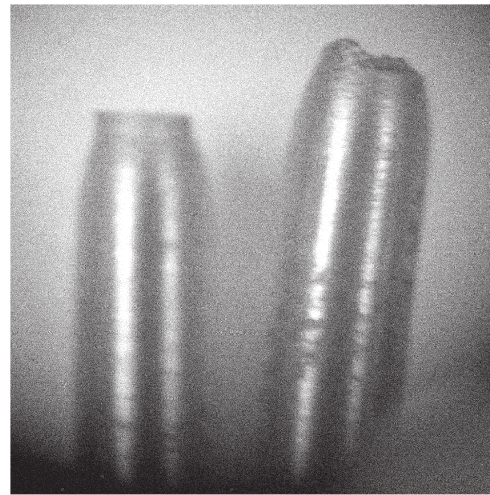


Fig. 5. Fractura por fatiga en un espécimen del material virgen.

agua que se considera un arrastre, sin embargo todos los separadores tanto de alta como de baja presión, se fabrican de dimensiones estándar para ahorrar costos.

Existe una clara tendencia del material a endurecerse y a perder peso al ser expuesto al fluido corrosivo, sin embargo es importante la obtención de más datos experimentales a tres y seis meses, para hacer esta afirmación por lo que se ampliará el número de experimentos.



Fig. 6. Fractura por fatiga en un espécimen expuesto a 30 días

7. Referencias

- [1] Lira, H., "Actualización del modelo geológico del yacimiento geotérmico de Cerro Prieto, B. C.", *Geotermia*, vol. 18 núm 1, 37-46, enero-junio 2005.
- [2] Uhlig, H. H. *Iron and Steel, Corrosion Handbook*, John Wiley and sons, 1963.
- [3] Westcott Blaine, B. *Corrosion Fatigue, Corrosion Handbook*, John Wiley and sons, 1963.
- [4] Hernández-Gómez, L. H., Urriolagoitia-Calderon, G., Urriolagoitia-Sosa, G., Sandoval-Pineda, J. M., Merchán-Cruz, E. M. y Guardado-García, J. F., "Assessment of Structural Integrity of Cracked Cylindrical Geometries Applying the EVTUBAG Program", *Revista Técnica de Ingeniería, Universidad de Zulia*, vol. 32, núm. 3, pp. 190-199, diciembre 2009.
- [5] Lichti, K. A., Wilson, P. T., "Corrosion in New Zealand Geothermal Systems", *Corrosion Reviews*, vol. 17, núms. 3-4, pp. 181-203, 1999.
- [6] Lichti, K. A., Bacon, L. G., "Corrosion in Wairakei steam pipelines", *Corrosion Reviews*, vol. 17 núms. 3-4, pp. 219-236, 1999.
- [7] Urriolagoitia-Calderón, G., Urriolagoitia-Sosa, G., Hernández-Gómez, L. H., Merchán-Cruz, E. A., Vite-Torres, M., Feria-Reyes C. V. y Beltrán-Fernández, J. A., "Análisis del desgaste de la articulación cabeza femoral, copa acetabular mediante simulación experimental con máquina perno-disco", *Revista Colombiana de Biotecnología*, vol. 10, núm. 1, pp. 94-110, julio 2008.
- [8] Rodríguez-Cañizo, R. G., García-García, L. A., Vite-Torres M., Merchán-Cruz E. A., Sandoval-Pineda, J. M. "Análisis experimental del desgaste entre UHMWPE y acero inoxidable 316L empleados en la manufactura de prótesis coxofemorales". *Revista Colombiana de Biotecnología*, vol. 12, núm. 2, diciembre 2010.

Sistema de Información Científica Redalyc

Red de Revistas Científicas de
América Latina y el Caribe, España y Portugal.

www.redalyc.uaemex.mx

Experiments on One-Phase Thermally Stratified Flows in Nuclear Reactor Pipe Lines

Hugo Cesar Rezende¹
Moisés Alberto Navarro¹
Amir Zacarias Mesquita¹
André Augusto Campagnole-dos-Santos²
Elizabeth Jordão³

¹ Center of Nuclear Technology Development (CDTN),
Brazilian Nuclear Energy Commission (CNEN),
CEP: 31.270-901, Belo Horizonte, MG,
BRAZIL.

² Department of Mechanical Engineering,
Federal University of Minas Gerais (UFMG),
CEP: 31.270-901, Belo Horizonte, MG,
BRAZIL.

³ Chemical Engineering,
State University of Campinas (UNICAMP),
CEP: 13083-970, Campinas, SP,
BRAZIL.

Correo electrónico (email): amir@cdtn.br
hcr@cdtn.br

Recibido el 3 de mayo de 2010; aceptado el 28 de noviembre de 2010.

1. Abstract

The one-phase thermal stratified flow phenomenon occurs when two different layers of the same liquid at different temperatures flow separately in horizontal pipes without appreciable mixing. This phenomenon was not considered in the design stage of most of the operating nuclear power plants, but in last two decades it has become apparent due to the temperature monitoring of piping systems. The occurrence of temperature differences of about 200°C have been found in a narrow band around the hot and cold water interface in components under stratified flows. Loadings due to thermal stratification affected the integrity of safety related piping systems.

This paper presents the results of a range of experiments performed to simulate one phase thermally stratified flows in geometry and flow condition representing a nuclear reactor steam generator injection nozzle. They have the objective of studying the flow configurations and understanding the evolution of the thermal stratification process. The driving parameter considered to characterize flow under stratified regime due to difference in specific masses is the Froude number.

Different Froude numbers, from 0.018 to 0.22, were obtained in different testes by setting injection cold water flow rates and hot water initial temperatures as planned in the test matrix. Results are presented showing the influence of Froude number on the hot and cold water interface position, temperature gradients and striping phenomenon.

Key words: thermal stratification, nuclear reactor, thermal hydraulic.

2. Resumen (Experimentos de simulación de flujo monofásico térmicamente estratificado en la tuberías de los reactores nucleares)

El fenómeno del flujo monofásico térmicamente estratificado ocurre cuando dos camadas de un mismo fluido, a distintas temperaturas, fluyen separadamente en un tubo horizontal, sin mezcla significativa entre ellas. Dicho fenómeno no fue tomado en consideración en la fase del proyecto de gran parte de las centrales nucleares que hoy día están en operación. Sin embargo, en las últimas dos décadas, tal fenómeno ha aparecido frecuentemente en el monitoreo de las temperaturas de los sistemas de canalización. Diferencias de temperatura del orden de los 200°C han sido observadas en una faja bastante estrecha, en torno de la interface entre las camadas de agua caliente y fría, en componentes sometidos a la estratificación térmica. Las tensiones debido a ese grado de estratificación térmica comprometen la integridad estructural de las tuberías relacionadas con la seguridad de las centrales nucleares.

El presente trabajo presenta algunos resultados en una amplia gama de experimentos simulando el flujo monofásico térmicamente estratificado en una geometría y condiciones de flujo simulando el bocal de inyección del generador de vapor de un reactor nuclear. Tales resultados tienen el objetivo de estudiar las condiciones del flujo y la evolución del proceso de estratificación térmica. El principal parámetro utilizado en la caracterización de los flujos estratificados debido a la diferencia entre las masas específicas es el número de Froude. Distintos números de Froude, entre el 0.018 y el 0.22, fueron obtenidos en distintos experimentos, por el ajuste del flujo de inyección del agua fría y de la temperatura inicial del agua caliente, conforme planeado en la matriz de prueba. Los resultados están presentados aquí y muestran la influencia del número de Froude en la posición de la interface entre las camadas de agua caliente y fría, en los gradientes de temperatura y en el fenómeno de la oscilación de la interface (*striping*).

Palabras clave: estratificación térmica, reactor nuclear.

3. Introduction

The material fatigue of the nuclear power plants piping caused by thermal stratified flows may threaten the integrity of the pipes and limit its lifetime. Single phase thermally stratified flows occur in horizontal piping segment, where two layers of the same liquid with great temperature (and density) differences flow separately at low velocities without appreciable mixing. The colder (heavier) fluid occupies the lower position along the pipe, while the hotter (lighter) fluid occupies the upper position. This condition may lead to considerable top to bottom temperature gradient on the pipe wall, Kim *et al.* [1].

Thermal stratification has been observed in several pressurized water reactor systems for a couple of years and is crucial in the aging management and for the lifetime-extension of nuclear power plants. Piping Systems affected by stratification include pressurizer surge lines, emergency core cooling lines, residual heat removal lines and also some segments of the main piping of the primary and secondary cooling loops, like the hot and cold legs in the primary and the steam generator feed-water piping in the secondary, Häfner [2]. Temperature differences of about 200°C can be found in a narrow band around the hot and cold water interface, Schuler and Herter [3].

Bieniusa and Reck [4] describe a methodology to calculate thermal stratification stress intensity with a simplified two-dimensional model. Ross *et al.* [5] examined several technical codes of fatigue analysis. Kim *et al.* [6] investigate some conditions that could influence the thermal stratification mechanisms. Kweon *et al.* [7] studied peak stress intensity due to many loadings including thermal stratification.

The governing parameters for single phase thermally stratified flows in horizontal piping are fluid velocities, difference between specific mass of cold and hot fluids, system geometry and heat transfer in the piping system. The driving parameter considered to characterize flow under stratified regime due to difference in specific masses is the Froude number, given by:

$$Fr = \frac{u_0}{(gD\Delta\rho/\rho_0)} \quad (1)$$

where:

- u_0 is the average velocity of the injection water, in [m/s];
- g is the acceleration of the gravity, in [m/s²];
- D is the inner diameter of the tube, in [m];
- $\Delta\rho$ is the difference between the densities of the hot and cold water, in [kg/m³]; and,
- ρ_0 is the density of the cold water, in [kg/m³].

This paper summarizes an experimental methodology for the simulation of single phase thermally stratified flow in a nuclear reactor steam generator nozzle, with Froude Number ranging from 0.018 to 0.22, obtained by the cold water injection velocity from 0,0099 to 0,0989 m/s and the hot water temperature from 140°C to 219°C. The objective was to understand the evolution of the thermal stratification process.

4. Experimental facility

The Experimental Facility for Thermal Stratification (ITET) allowed characterizing stratified flow regimes for different piping system and operation conditions. Figure 1 shows a

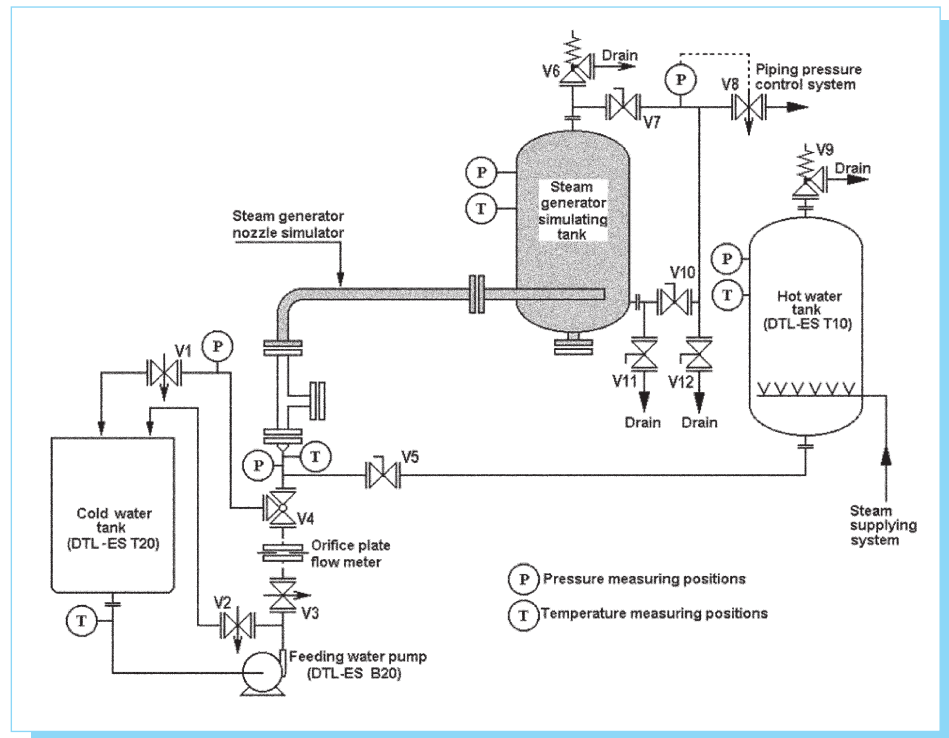


Fig. 1. Diagram of the experimental facility for thermal stratification (ITET).

diagram of the facility with the test section for the simulation of the steam generator injection nozzle in gray. This test section is made up of a pressure vessel simulating the steam generator tank and a tube simulating its injection nozzle. It simulates start up conditions at the injection nozzle.

Before the beginning of each test the whole system is filled with cold water and then it is pressurized and heated by steam. A temperature equalization pump ensures a homogeneous heating of the entire system. After the heating process, the equalization pump is turned off and the equalization lines are isolated. The steam supply is also isolated by closing valve V5. The tests began by acting on valve V4 moving the cold water flows into the nozzle simulator pipe, through its lower end. The cold water flow rate was previously adjusted at a value planned in the test matrix. This flow rate and the system pressure are maintained stable through a set of safe (V6) and relieve (V8) valves at the upper side of the pressure vessel, which controls upstream pressure. The water flows from the injection nozzle simulator pipe to the steam generator simulator vessel through 11 holes at the upper side of the extension tube placed inside the vessel.

Figure 2 detailed the test section. Type K thermocouples, 0.5 mm in diameter, were distributed in four measuring cross sections (1, 2, 3 and A) to measure wall and fluid temperatures. On the measuring cross sections 1, 2 and 3 wall thermocouples were positioned on the wall outside and fluid thermocouples

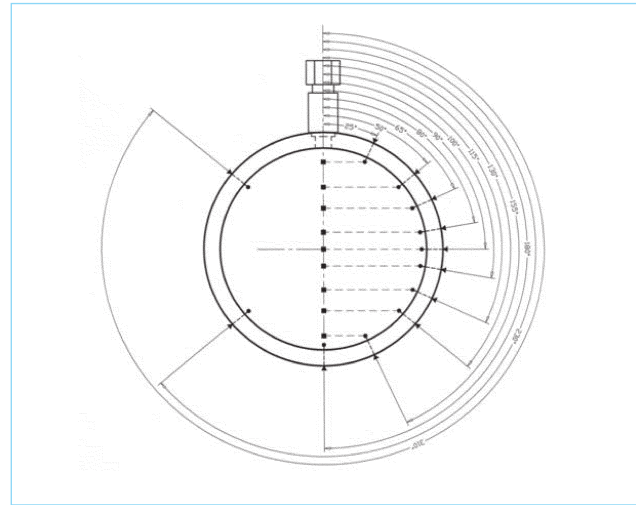


Fig. 3. Thermocouple distribution at the measuring cross section 1.

were positioned along the inside wall and along the tube vertical diameter. The fluid thermocouples positioned along the inside wall have their hot junctions positioned 3 mm away from the wall. For each one of these fluid thermocouples, a wall thermocouple was positioned at the same angular position, measuring external wall temperature. Probes were positioned along the vertical diameter of each measuring cross sections

for positioning fluid thermocouples, at the same height of most of the thermocouples along the inside wall. Measuring cross section A has just three thermocouples to determine the time when the cold water reaches their position

Figures 3, 4 and 5 show, respectively, the thermocouple distribution in the Measuring Cross Sections 1, 2 and 3. The thermocouples positioned on the probes along the vertical diameter were named as TiS_{jj} , where i is the number of the Measuring Cross Section (1, 2 or 3) and jj is the number of the thermocouple position from top to bottom (from 01 to 09 on Measuring Cross Section 1, from 01 to 10 on Measuring Cross Section 2 and from 01 to 06 on Measuring Cross Section 3). Water temperature was also measured with type K thermocouples in the injection piping.

The injection water flow rate was determined by a set of orifice plate and differential

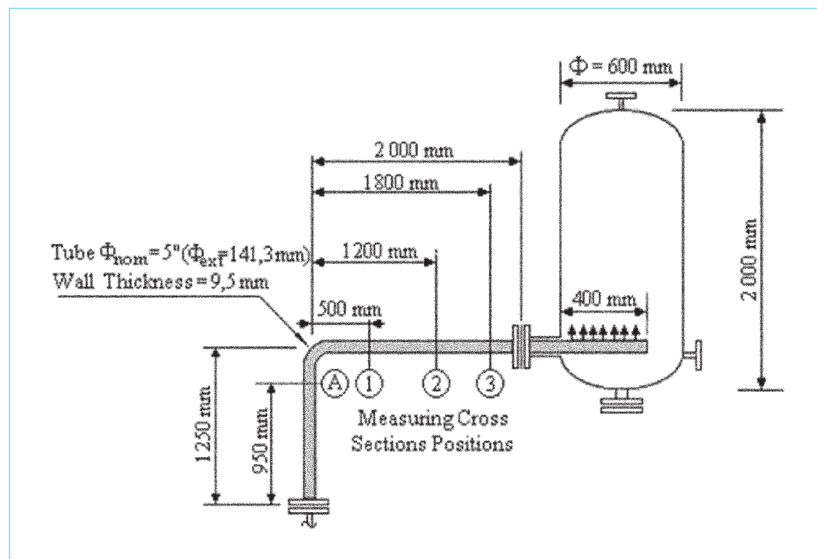


Fig. 2. Experimental test section diagram with the position of the Measuring Cross Sections 1, 2 and 3.

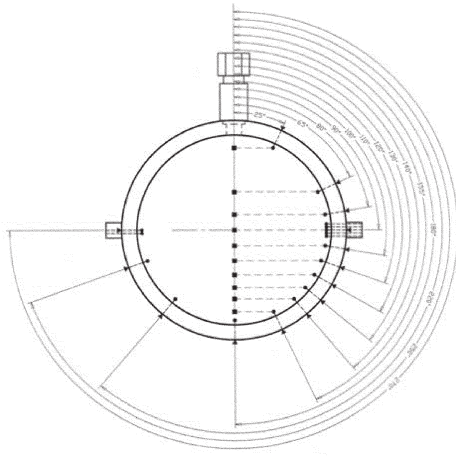


Fig. 4. Thermocouple distribution at the measuring cross section 2.

pressure transducer. The system pressure was measured with a gauge pressure transducer and, finally, the water level in the steam generator simulation tank was also measured with a differential pressure transducer.

5. Results

5.1. Temperature difference between two neighbouring thermocouples

Results of two different tests are presented below to illustrate the typical temperature distribution on the vertical probes. Table 1

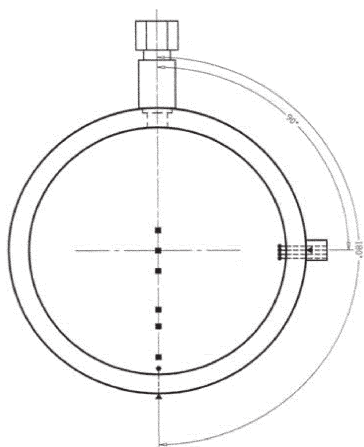


Fig. 5. Thermocouple distribution at the measuring cross section 3.

Table 1. Parameter values for the tests.

Test	Froude number	Flow rate [kg/s]	Pressure [bar]	Hot water temperature	Cold water temperature
1	0.069	0.35	21.1	223	39
2	0.146	0.74	21.3	221	32

shows the values of the main parameters for these tests, with different Froude Numbers. As both the tests were carried out at pressures close to 21 bar, and hot water temperature close to 220°C, the difference in Froude Number was mainly due to the difference in the flow rate. The pressure value in Table 1 was measured at the steam generator simulating tank and there is a loss of pressure through the exit holes from the tube simulating injection nozzle to this tank.

Figures 6-9 show some results for Tests 1 and 2, two graphics with results of each test. The graphics in figures 6 and 8 show the temperature evolution at the thermocouples on the vertical probe at the Measuring Cross Section 1 respectively for Tests 1 and 2. The graphics in figures 7 and 9 show the evolution of the temperature differences between neighbouring thermocouples also respectively for Tests 1 and 2.

The maximum temperature gradient in Test 1 was obtained at about 104 s after the beginning of the test, when the difference between thermocouples T1S06 and T1S07 reached 126°C. These thermocouples are 9.2 mm far from each other, and the maximum temperature gradient obtained was then 13.7°C/mm. During Test 2 the maximum temperature differences between neighbouring thermocouples was obtained at about 62 s when the difference between thermocouples T1S06 and T1S07

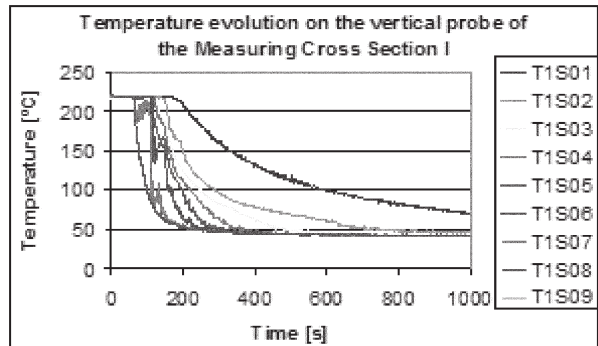


Fig. 6. Results of test 1.

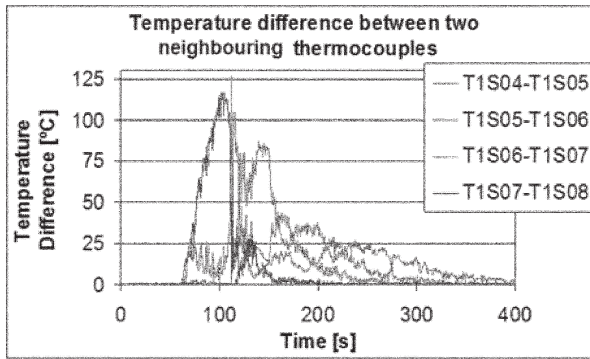


Fig. 7. Results of test 1.

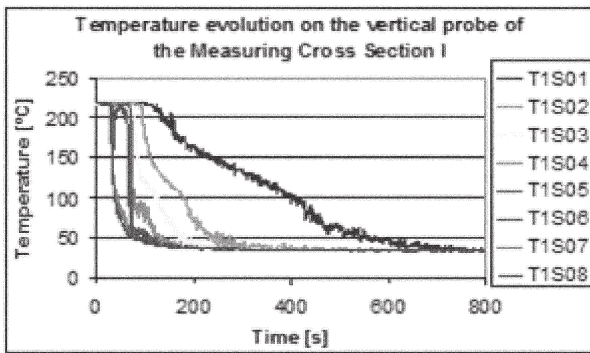


Fig. 8. Results of test 2.

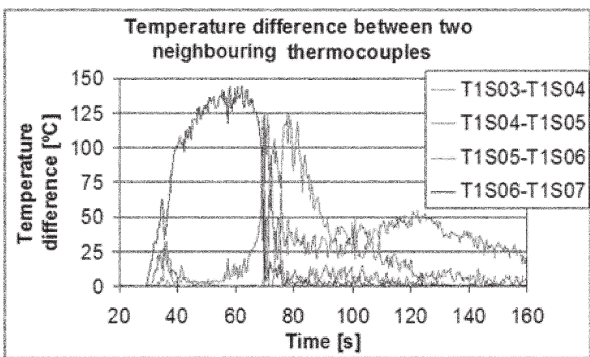


Fig. 9. Results of test 2.

reached 145°C. The maximum temperature gradient was then 15.8°C/mm.

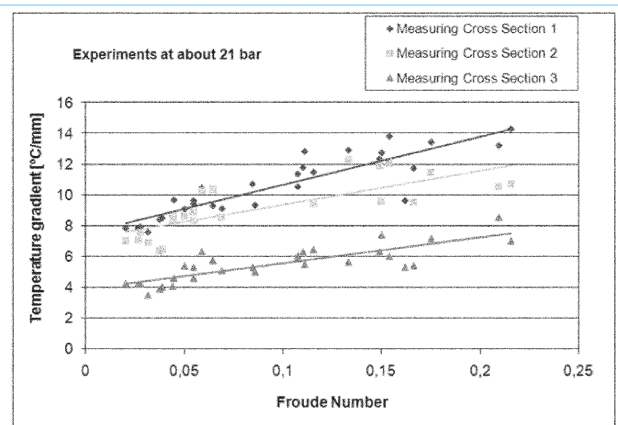


Fig. 10. Maximum measured temperature gradient as a function of Froude Number at each measuring cross section for the tests at 21 bar.

5.2. Temperature gradient as a function of froude number

The test matrix includes tests at two different pressure levels, at about 23 bar gauge ($t_{sat} = 220^\circ\text{C}$) and at about 10.5 bar gauge ($t_{sat} = 185^\circ\text{C}$). The results of these two groups of tests are presented here separately. Tests were done with Froude Number from 0.018 to 0.22. A graphic with the maximum measured temperature gradient at the vertical diameter for each measuring cross section as a function of the Froude Number is shown in Figure 10, for the tests at 21 bar. Figure 11 shows the same for the tests at 10.5 bar.

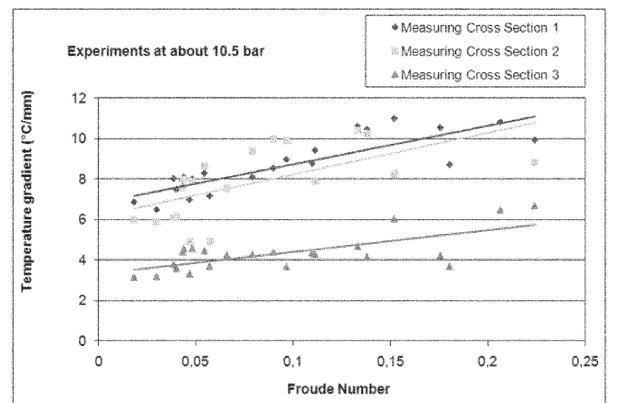


Fig. 11. Maximum measured temperature gradient as a function of Froude Number at each measuring cross section for the tests at 10.5 bar.

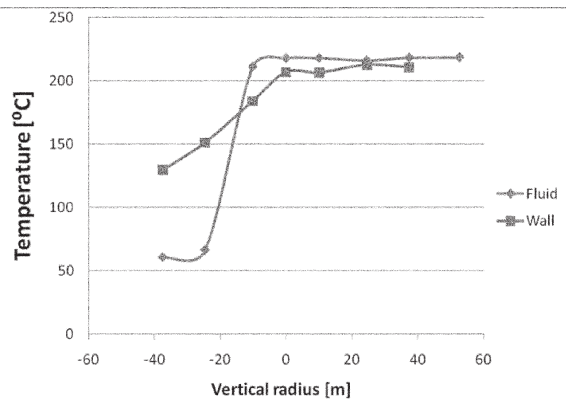


Fig. 12. Vertical temperature distribution at time 60 s of Test 2 at Measuring Cross Section 1.

5.3. Temperature distribution on the outside wall

The abrupt vertical temperature change close to the interface between the cold and the hot water is not reproduced on the piping wall, due to the heat conductivity of the metallic wall, as can be seen in Figure 12. However, there were observed great top to bottom temperature gradients that are enough to threaten the piping structural integrity. Figure 12 compares the temperature distribution in the fluid along the vertical diameter probe with the temperature distribution along the piping wall, at time 62 s of Test 2, at measuring cross section 1. The maximum temperature gradient for Test 2 was obtained at this time (15.8 C/mm), when the difference between thermocouples T1S06 and T1S07 reached 145°C.

In dealing with top to bottom temperature differences, top temperatures for Measuring Cross Sections 1 and 2 were considered as the average temperature measured with the thermocouples at the top region, the top quarter of the pipe wall on Figures 13 and 14, and bottom temperatures were considered as the average temperature measured with the thermocouples at the bottom region, the bottom quarter of the pipe wall on Figures 13 and 14. Measuring Cross Sections 3 was not considered because there is no thermocouple at its top region.

The evolution of the top to bottom temperature difference for Test 1 is shown in Figure 15 for Measuring Cross Section 1 and in Figure 16 for Measuring Cross Section 2. The maximal temperature differences were 124°C for Measuring Cross Section 1, obtained at 94 s, and 147°C for Measuring Cross

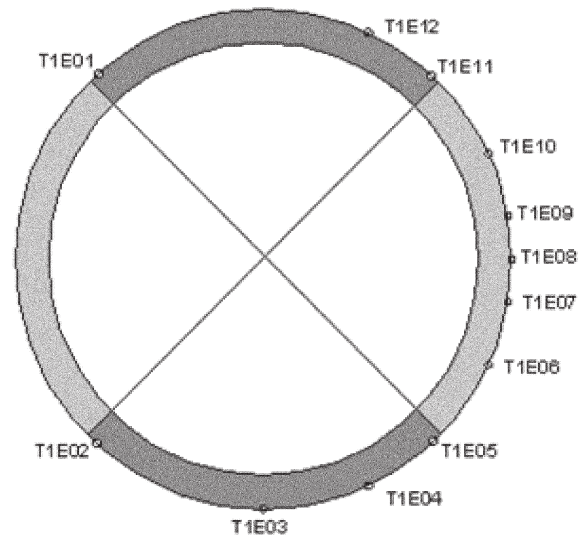


Fig. 13. Measuring Cross Sections 1 with thermocouples and top region and bottom region in dark.

Section 2, obtained at 140 s. There was not notice any clear dependence of top to bottom temperature difference with the Froude Number in the range of the experiments.

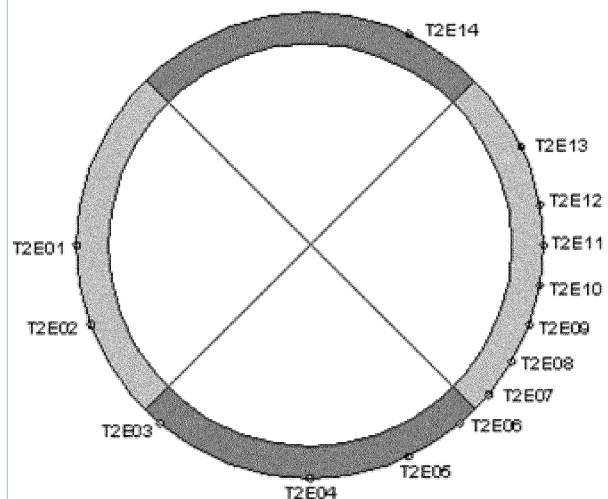


Fig. 14. Measuring Cross Sections 2 with thermocouples and top region and bottom region in dark.

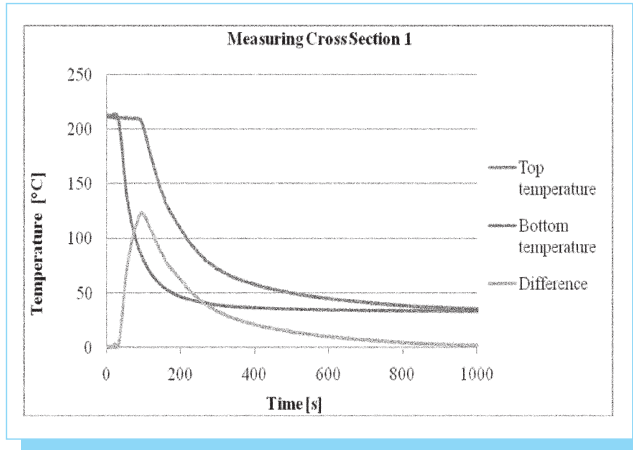


Fig. 15. Temperature evolution on Measuring Cross Section 1 for Test 2.

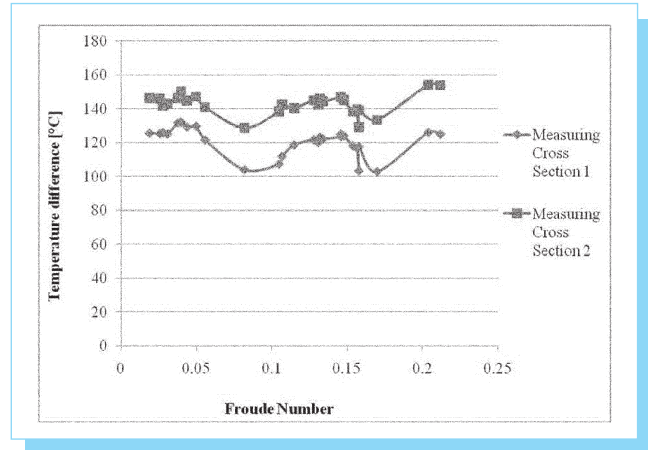


Fig. 17. Top to bottom temperature difference as a function of Froude Number.

Figure 18 shows this top to bottom temperature difference for 27 tests ranging from 0.019 to 0.212 Froude Number. These tests were carried out with the system pressure at about 21 bar, corresponding to a hot water temperature close to 220°C (saturated water temperature). Another consideration was the lasting time for a high temperature difference. It was considered arbitrarily that temperature difference over 80°C was high enough for threatening structural integrity of the piping. Silva [8] observed grain enlargement at this condition. Figure 17 presents the lasting time of top to bottom temperature difference over 80°C as a function of Froude Number. A great dependence of the lasting time with the Froude Number was observed only for $Fr = 0.05$.

6. Conclusion

The one phase thermal stratification was simulated experimentally in a piping system similar to the steam generator injection nozzle of a Pressurized Water Reactor (PWR). The test facility was filled and pressurized with hot water and then cold water was injected at low flow rate at one end of the nozzle simulator tube. The simulation was carried out with Froude number close to a nuclear reactor operation (Fr from 0.018 to 0.22). The wall and water temperatures were measured with about 100 thermocouples distributed along the horizontal part of the tube. Temperature gradients up to 14°C/mm were obtained in a narrow band around the interface between

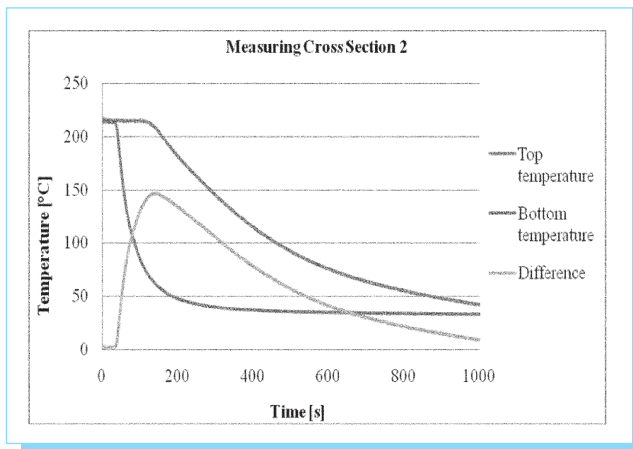


Fig. 16. Temperature evolution on Measuring Cross Section 2 for Test 2.

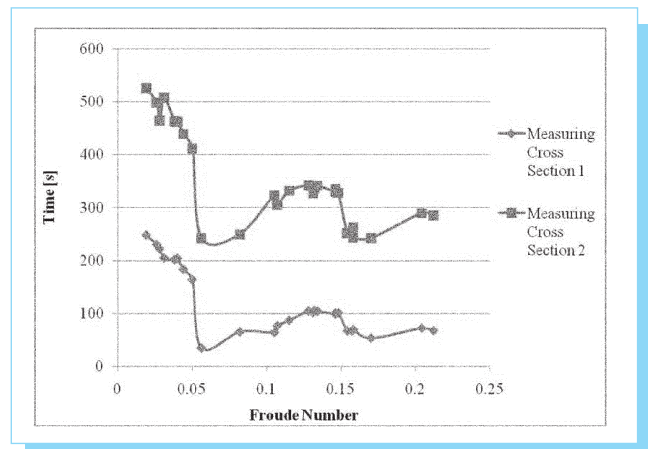


Fig. 18. Lasting time of top to bottom temperature difference over 80°C as a function of Froude Number.

the hot and cold water layer, characterizing thermal stratification. Results are presented showing the measured vertical temperature gradient in the fluid and in the piping wall as a function of the Froude Number.

7. References

- [1] Kim, J. H., Roidt, R. M. & Deardorff, A. F., "Thermal stratification and reactor piping integrity", *Nuclear Engineering and Design*, vol. 139, pp. 83-95, 1993.
- [2] Häfner, W., *Thermische Schicht-Versuche im horizontalen Rohr*, Kernforschungs-zentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe, Germany, 1990.
- [3] Schuler, X. & Herter, K. H., "Thermal fatigue due to stratification and thermal shock loading of piping", *Proceeding of the 30th MPA-Seminar in conjunction with the 9th German-Japanese Seminar*, Stuttgart, 6-7 October, pp. 6.1-6.14, 2004.
- [4] Bieniussa, K. W. and Reck, H., "Piping specific analysis of stress due to thermal stratification", *Nuclear Engineering and Design*, vol. 19, pp. 239-239, 1999.
- [5] Roos, E., Herter, K.-H., Issler, S., "Remarks to the different factors influencing fatigue analysis and design curves", *EPRI, U. S. NRC, OECD/NEA/CSNI, International Conference on Fatigue of Reactor Components*, May 2000.
- [6] Kim, S. N., Hwang, S. H., and Yoon, K. H., "Experiments on the thermal stratification in the branch of NPP", *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 19 no. 5, pp. 1206-1215, 2005.
- [7] Kweon, D. H., Kim, J. S., and Lee, K. Y., "Fatigue design of nuclear class 1 piping considering thermal stratification", *Nuclear Engineering and Design*, vol. 238, no. 6, pp. 1265-1274, 2007.
- [8] Silva, L. L., "Experimental and Numerical Analysis on Pipe Subjected to Thermal Stratification Phenomenon" (in Portuguese). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brazil. 2009.

Latindex

Sistema Regional de Información en Línea
para Revistas Científicas de América Latina,
el Caribe, España y Portugal.
www.latindex.org

Periódica

Índice de Revistas Latinoamericanas en Ciencias.
http://132.248.9.1:8991/F/-/?func=find-b-0&local_base=PER01

Evaluación analítico-numérica para ensambles por interferencia

Armando Pérez-Cabrera
Beatriz Romero-Ángeles
David Torres-Franco
Mauricio Aarón Pérez-Romero
Samuel Morales-Bonilla

Sección de Estudios de Posgrado e Investigación,
Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Zacatenco,
Instituto Politécnico Nacional.
Edif. 5, 2do. Piso Unidad Profesional 'Adolfo López Mateos',
Col. Lindavista, CP 07738, México DF.
MEXICO.

correo electrónico (email): armando.perez@terra.com
romerobeatriz97@hotmail.com
david_torres20@hotmail.com
prma@live.com.mx

Recibido el 21 de abril de 2010; aceptado el 29 de octubre de 2010.

1. Resumen

En este trabajo se analiza numéricamente el estado de esfuerzos y deformaciones en el ensamble de camisas y ejes con ajuste forzado con interferencia utilizando el método de elemento finito. Inicialmente, los resultados son comparados mediante un estudio analítico donde se utilizan las ecuaciones de Lamé (a lo largo de los puntos centrales del ensamble) con objeto de validar los datos obtenidos por medio de la simulación numérica propuesta. Dos características importantes son consideradas en la simulación numérica, la curva esfuerzo-deformación unitaria del material y el movimiento de inserción del eje dentro de la camisa. Con estas dos consideraciones, es posible observar los esfuerzos elásticos y plásticos presentes en la camisa y eje, de la misma manera es posible monitorear el comportamiento de esfuerzos en la zona de contacto. El principal objetivo de este trabajo, es demostrar la correlación existente entre los métodos analítico y numérico. Los resultados obtenidos en esta investigación, muestra que las zonas de contacto inicial entre la camisa y eje, experimentan esfuerzos plásticos, por lo que esta situación debe ser considerada como un parámetro de diseño. Es

importante notar que las ecuaciones de Lamé son válidas únicamente para determinar esfuerzos en el rango elástico.

Palabras clave: elemento finito, interferencia, esfuerzos, Lamé, simulación.

2. Abstract (Analytical-Numerical Evaluation for Assemblies of Interference)

In this paper, the stresses and deformations in the shrink-fitted hub-shaft joint have been analyzed using the Finite Element Method. Initially, the results of the finite element method were compared against with the results obtained from of Lamé's Equation along the shrink fit. Two important points are considered in the numerical simulation, the stress-strain curve of the material and the insertion of the shaft into the hub. With these points in mind, it is possible to evaluate the elastic and plastic stresses of the shaft and hub. The main goal is to demonstrate the convergence between the analytical calculations and the numerical simulation. The results of this study show that initial contact areas of the shaft and hub experiment plastic stresses. This situation must be taken into consideration as a design parameter. On the other hand, the Lamé equations are only valid to predict stress in the elastic range.

Key words: finite element, shrink-fit, stress, Lamé, simulation.

3. Introducción

Dentro de la industria metal-mecánica el ensamble por interferencia es ampliamente utilizado, especialmente en el desarrollo de equipo pesado. Las ventajas que presenta son:

- Simple construcción.
- Buena concentricidad.
- Gran capacidad de carga.
- Alta resistencia a la fatiga.

Sin embargo, en este tipo de técnica de ensamble es muy común encontrar arreglos sistemáticos que conllevan problemas de transmisión de torques entre el eje y la camisa/cubierta [1].

En este sentido, los tipos de unión por interferencia son clasificados como:

- Ensamble forzado.
- Unión por deformación.

El principio del ensamble forzado se fundamenta en producir una presión entre el elemento externo (camisa/cubierta) y el elemento interno (barra) y de esta manera producir la fijación (figura 1).

Según la teoría de Lamé, cuando el momento de torsión es aplicado, surge un momento de fricción M_f entre las superficies de contacto, de tal forma que para proveer la trasmisión, el momento de fricción debe ser mayor al momento de transmisión M_t [2-3]. Mientras que la presión entre los elementos de contacto puede producirse por diferentes métodos. El procedimiento más utilizado es la unión por interferencia entre componentes, la cual es producida por la diferencia de tamaño entre piezas. Inicialmente, el diámetro externo de la barra D_{oi} es mayor que el diámetro interno de la camisa D_{ie} (figura 1). De esta manera se asegura que al realizar el ensamble existirá una interferencia geométrica, produciéndose consecuentemente una presión de contacto entre las piezas y por lo tanto se origina una fuerza de fricción en la interface.

En el desarrollo del ensamble por interferencia, la camisa puede ser ensamblada al eje por medio de dos métodos (radial o axial). En el ensamble radial, la camisa es calentada y se introduce el eje. Mientras en el ensamble axial, la camisa o el eje son unidas por una presión [2]. En este sentido las soluciones analíticas para el desarrollo de este tipo de ensambles se fundamentan en las ecuaciones de Lamé [2-3]. Asimismo, se han efectuado estudios experimentales para validar los resultados ob-

tenidos, aunque no siempre presentaron resultados congruentes con los obtenidos por la teoría de Lamé [4].

Existen obvias desventajas en cuanto a la confiabilidad o seguridad de ensambles por interferencia de uniones de alto uso y rendimiento, cuando se utilizan los métodos convencionales de diseño por ensamble con interferencia. Lo anterior se debe a la arbitrariedad de los parámetros mecánicos y geométricos de las partes en contacto. Por lo que los métodos convencionales de diseño no son los más adecuados para el desarrollo de las uniones más empleadas en la ingeniería, debido al pobre grado de seguridad que otorgan. La implementación del método por medio de la simulación numérica parece ser la solución a este problema.

En la implementación de soluciones numéricas, Prasad y colaboradores [5] fueron los pioneros en el análisis numérico por medio del método del elemento finito (MEF) sobre el problema de los esfuerzos producidos por el ensamble de un tubo para diferentes combinaciones de longitud y diámetro. Los resultados presentaron una cierta congruencia con los obtenidos por medio de la aplicación de las ecuaciones de Lamé en la superficie de contacto. En este mismo sentido, Zhang y asociados [6] utilizaron las ecuaciones de Lamé y para estudios tridimensionales de MEF para el ensamble de conexiones de engranes. Donde se determinó que los esfuerzos obtenidos por las ecuaciones de Lamé no proporcionan resultados adecuados para geometrías complejas. Mientras que, en otra línea de investigación, se estableció que el comportamiento de los sellos de carbón empleados en turbinas de aviación y ensamblados por interferencia, generan esfuerzos residuales [7]. Lo cual fue determinado por medio del MEF utilizando simplificaciones axisimétricas en una simulación bidimensional.

El presente trabajo está enfocado a la implementación de una metodología para el ensamble por interferencia de dos cilindros y se fundamenta en simulación numérica por medio del MEF, donde los resultados (principalmente determinación de esfuerzos) obtenidos durante el ensamble, difieren de los esfuerzos que se determinaron por la ecuación de Lamé. Es importante tomar en cuenta que los esfuerzos obtenidos por la ecuación de Lamé únicamente son válidos en el rango elástico. Asimismo, este tipo de ecuaciones consideran un análisis estático estable, es decir, no se considera el movimiento relativo de las piezas durante el ensamble.

4. Desarrollo

4.1. Ecuaciones de Lamé

La teoría de Lamé se fundamenta en el desarrollo general de las coordenadas curvilíneas, por lo que es ampliamente utili-

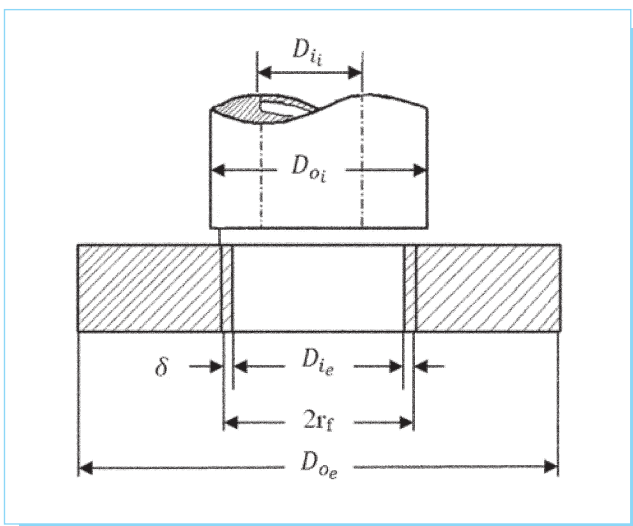


Fig. 1. Ensamble de cilindro compuesto.

zada en el desarrollo de ensambles por interferencia. Amplios detalles pueden encontrarse [8-10]. Considerando el ensamble mostrado por la figura 1, donde la interferencia diametral δ , está determinada por la ecuación (1):

$$\delta = D_{ie} - D_{oi} \quad (1)$$

Donde D_{ie} es el orificio de ensamble del cilindro externo (camisa) y D_{oi} es el diámetro mayor del cilindro interno (eje). Así, el desplazamiento radial en la parte interna del cilindro externo δ_{rie} , está dado por (2):

$$\delta_{rie} = \frac{r_{ie}}{E} (\sigma_{\theta} - \gamma_{oe} \cdot \sigma_r) \quad (2)$$

$$\delta_{rie} = \frac{P_c \cdot r_f}{E_o} \left[\frac{r_{oe}^2 + r_f^2}{r_{oe}^2 - r_f^2} + \gamma_{oe} \right] \quad (3)$$

Donde σ_{θ} es el esfuerzo tangencial, σ_r es el esfuerzo radial, E es el módulo de Young, r_{ie} corresponde al radio del orificio de ensamble, γ_{oe} es la relación de Poisson, r_{oe} corresponde al radio mayor del cilindro externo, r_f representa el radio medio de ensamble. Además, la deformación radial del cilindro interno se identifica como δ_{ri} , mientras que la presión de contacto debido a la interferencia se identifica como p_c y están determinadas por las ecuaciones (4) y (5) respectivamente:

$$\delta_{ri} = - \frac{P_c \cdot r_f}{E_i} \left[\frac{r_f^2 + r_{ii}^2}{r_f^2 - r_{ii}^2} + \gamma_{ii} \right] \quad (4)$$

$$P_c = \frac{\delta_r}{\frac{r_f}{E_o} \left[\frac{r_{oe}^2 + r_f^2}{r_{oe}^2 - r_f^2} + \gamma_{oe} \right] + \frac{r_f}{E_i} \left[\frac{r_f^2 + r_{ii}^2}{r_f^2 - r_{ii}^2} + \gamma_{ii} \right]} \quad (5)$$

Donde r_{ii} corresponde al radio del orificio del cilindro interno, γ_{ii} es la relación de Poisson del cilindro interno, γ_{oe} representa la relación de Poisson del cilindro externo, E_i es el módulo de elasticidad del cilindro interno, mientras que E_o módulo de elasticidad del cilindro externo.

4.2. Esfuerzos en el cilindro externo

Mientras que la determinación de los esfuerzos en el cilindro externo se clasifica y determina de la siguiente manera:

Esfuerzo tangencial

$$\sigma_{\theta_e} = \frac{P_c \cdot r_{ie}^2}{r_{oe}^2 - r_{ie}^2} \left[1 + \frac{r_{oe}^2}{r^2} \right] \quad (6)$$

Esfuerzo radial

$$\sigma_{r_e} = \frac{P_c \cdot r_{ie}^2}{r_{oe}^2 - r_{ie}^2} \left[1 - \frac{r_{oe}^2}{r^2} \right] \quad (7)$$

Donde r corresponde a la distancia radial de la zona de estudio.

4.3. Esfuerzos en el cilindro interno

De igual forma, los esfuerzos en el cilindro interno se clasifican y determinan de la siguiente manera:

Esfuerzo tangencial

$$\sigma_{\theta_i} = \frac{P_c \cdot r_{oi}^2}{r_{oi}^2 - r_{ii}^2} \left[1 + \frac{r_{ii}^2}{r^2} \right] \quad (8)$$

Esfuerzo radial

$$\sigma_{r_i} = \frac{P_c \cdot r_{oi}^2}{r_{oi}^2 - r_{ii}^2} \left[1 - \frac{r_{ii}^2}{r^2} \right] \quad (9)$$

4.4. Esfuerzos principales

El propósito de un criterio de falla es predecir o estimar la falla o cedencia de un componente mecánico. Un número considerable de teorías de fallas se han desarrollado [11-12]. Sin embargo, las más comunes y probadas físicamente son aplicables a materiales isotrópicos y dependen de la naturaleza del material (dúctil o frágil).

Para materiales dúctiles, las teorías más aplicables son el criterio de esfuerzo cortante y Von Mises, sin embargo esta última es la más exacta con datos experimentales [13].

Para la teoría de Von Mises, mientras el estado de esfuerzos permanezca en el área sombreada (figura 2), el material no experimentará cedencia. Consecuentemente la línea azul, representa el momento en el cual el material comienza a fluir. En el caso bidimensional es estimado por la ecuación (10).

$$\sigma_{VM} = \sqrt{(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_2)} \quad (10)$$

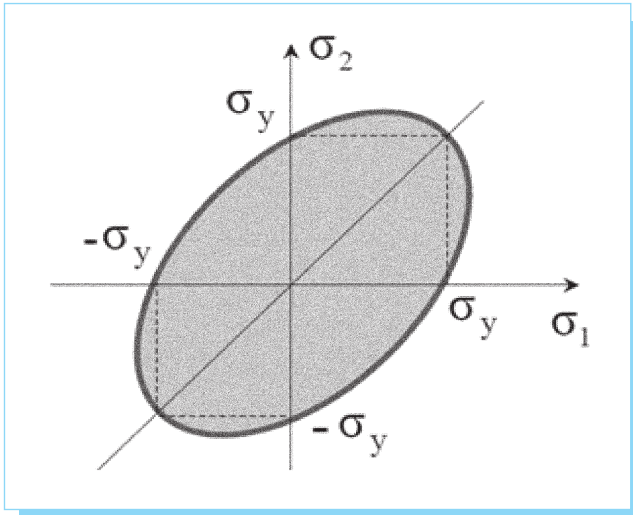


Fig. 2. Representación teórica de Von Mises del caso bidimensional.

El criterio de Von Mises para el estado triaxial, es mostrado por la figura 3 y la estimación del esfuerzo es calculado por la ecuación (11).

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad (11)$$

Donde σ_1 , σ_2 y σ_3 son los esfuerzos principales.

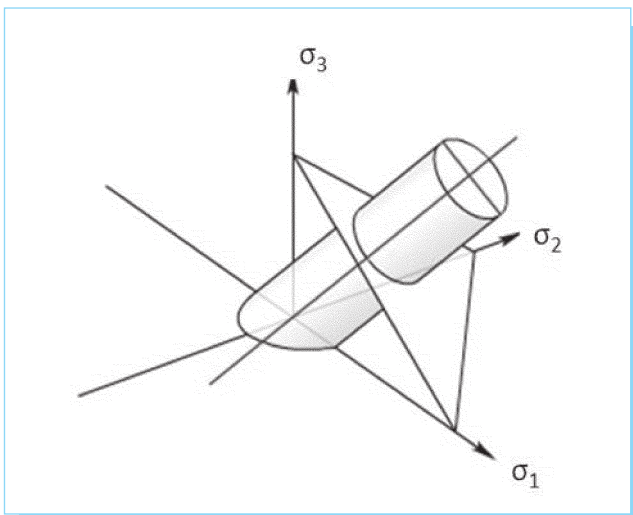


Fig. 3. Estado de esfuerzos triaxial de Von Mises.

4.5. Fuerzas requeridas para el ensamble de los componentes

La ecuación para determinar la fuerza de ensamble se establece como sigue:

$$F_{ensamble} = \pi \cdot 2 r_f \cdot L \cdot P_c \cdot \mu \quad (12)$$

Mientras el torque debido a la interferencia es:

$$Torque = F_{ensamble} \cdot r_f \quad (13)$$

Donde r_f corresponde al radio medio de la zona de ensamble, L es la longitud de agarre entre las piezas de unión, P_c es la presión de contacto, μ es el coeficiente de fricción que depende del material de los elementos de unión. De esta manera es posible determinar, de manera analítica, las condiciones de ensamble.

5. Planteamiento del problema

El objetivo de este trabajo de investigación es presentar una metodología analítica numérica para el desarrollo de ensambles por interferencia. Así como determinar los esfuerzos de ensamble entre dos elementos perfectamente cilíndricos (figura 4) fabricados con el mismo material. Los esfuerzos y deformaciones son obtenidos por dos métodos. Primeramente se cuantifican los esfuerzos y deformaciones por medio de las ecuaciones de Lamé y, posteriormente, es mediante la aplicación de simulaciones numéricas (MEF). La diferencia principal entre ambos métodos radica en que el análisis numérico toma en cuenta el tiempo de ensamble, mientras que las ecuaciones de Lamé consideran un análisis estático estable. Las características mecánicas del material utilizado en

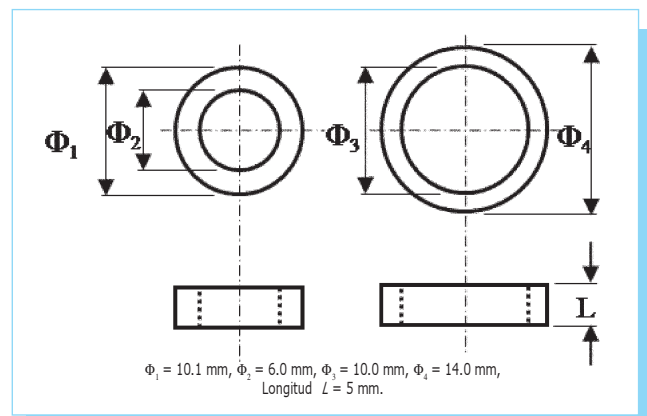


Fig. 4. Dimensiones geométricas.

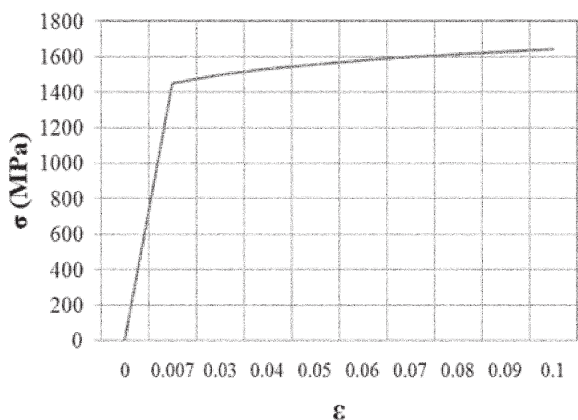


Fig. 5. Curva esfuerzo-deformación del material utilizado.

la simulación numérica son: esfuerzo último, 1650 MPa, esfuerzo de cedencia, 1450 MPa, módulo de elasticidad, 200 GPa, relación de Poisson, 0.29, coeficiente de fricción de 0.15 y densidad 7.34 grs/cm³. La curva esfuerzo-deformación del material es mostrada en la figura 5.

Para el desarrollo de la simulación numérica se aplicó el algoritmo de comportamiento del material de la regla cinemática y con endurecimiento por deformación [14-16]:

$$d\alpha = C \frac{1}{\sigma_0} (\sigma - \alpha) d\varepsilon^{pl} - \gamma \alpha d\varepsilon^{pl} \quad (14)$$

$$\sigma_0 = \sigma_{|0} + Q_\infty (1 - e^{-\varepsilon^{pl}/b}) \quad (15)$$

Donde ε^{pl} corresponde a la deformación plástica equivalente, α es el esfuerzo reversible, C es la constante inicial del módulo de endurecimiento cinemático, γ determina la relación en la cual el módulo cinemático disminuye con respecto a la deformación plástica, σ_0 es el esfuerzo de cedencia real, $\sigma_{|0}$ es el esfuerzo de cedencia inicial, Q_∞ es el cambio máximo de tamaño de la superficie de cedencia y b define la relación, en la cual el tamaño de la superficie de cedencia cambia conforme la deformación plástica se incrementa. La ecuación (14) describe la traslación de la superficie de cedencia en el espacio de esfuerzos debido a los esfuerzos reversibles α , mientras la ecuación (15) establece el cambio de los esfuerzos equivalentes definiendo el tamaño de la superficie de cedencia.

6. Resultados obtenidos por las ecuaciones de Lamé

En la tabla 1 se muestran los resultados obtenidos por la teoría de Lamé y que serán evaluados numéricamente.

Tabla 1. Resultados analíticos.

Interferencia radial (mm)	-0.1	
Fuerza de ensamble (N)	7 600	
	cilindro interno	cilindro externo
Esfuerzo radial (MPa)	-400	-400
Esfuerzo tangencial (MPa)	835	1231
Esfuerzo Von Mises (MPa)	723	1471
Deformación radial en cilindro externo/camisa (mm)		0.033
Deformación radial en cilindro interno/eje (mm)		-0.017

Por medio de la teoría de Lamé, los valores de esfuerzos tan sólo pueden ser cuantificados en la superficie de contacto.

7. Análisis con el método del elemento finito

El modelo de elementos finitos [17] es desarrollado empleando dos programas de cómputo Hypermesh y Abaqus. El programa Hypermesh V8.0 es utilizado para la generación del modelo de elemento finito, y Abaqus V7.1 para la solución del problema [14].

En la práctica, los elementos de unión con interferencia son ensamblados con la ayuda de mecanismos adicionales, para este trabajo se emplearon dos sólidos perfectamente circulares, soporte superior con diámetro de 12 mm y longitud de 2 mm, un soporte base con un diámetro de 16 mm y longitud de 2 mm, tal como se muestra en la figura 6. Los soportes adicionales empleados en la simulación numérica ayudan a disminuir la concentración de esfuerzos ocasionados por las condiciones de frontera.

El modelo de elementos finitos está compuesto por elementos sólidos (C3D8), elementos de contacto para permitir la interacción de los dos cilindros y elementos rígidos (RB3D2), que son utilizados para la aplicación de cargas y restricciones.

El análisis numérico se realiza de la siguiente forma:

- Se considera el mismo material para todos los elementos sólidos mostrados en la figura 6.
- Se desarrollaron tres pares de elementos de contacto, entre el soporte superior y cilindro interno (eje), entre el

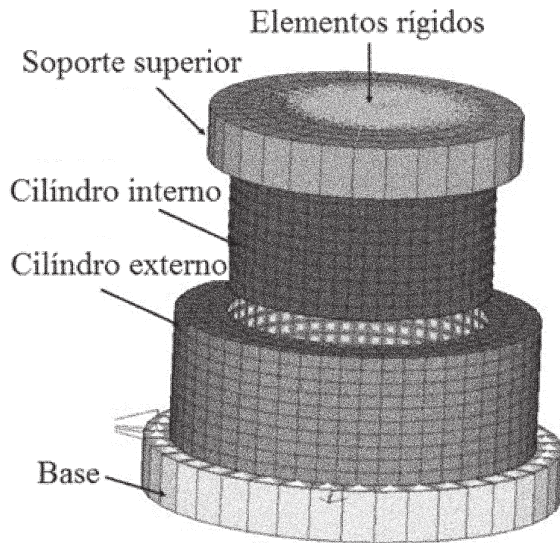


Fig. 6. Modelo de elemento finito.

cilindro externo y la base, y el contacto principal entre el cilindro interno (eje) y cilindro externo (camisa).

- c) Al soporte superior se aplica un desplazamiento de 5 mm, originando que el cilindro interno se aloje completamente dentro del cilindro externo. El movimiento es controlado gradualmente para evitar problemas de impacto [14].
- d) En la parte inferior de la base, se aplican restricciones en todos los grados de libertad para evitar movimiento de cuerpo rígido.
- e) Se seleccionan ciertos nodos (figura 7) de cada cilindro, con el objeto de monitorear el comportamiento de esfuerzos durante el tiempo de ensamble (figuras 8 y 9).
- f) Se gráfica el comportamiento de esfuerzos de Von Mises, de los puntos seleccionados para obtener una mejor claridad en la variación de esfuerzos.

La figura 7 muestra los puntos (nodos) de medición de esfuerzo y deformación en los cilindros interno y externo.

7.1. Resultados del análisis numérico

Debido a que el MEF considera un ensamblaje en el cual el cilindro interno se desplaza dentro del cilindro externo, es importante observar el comportamiento de esfuerzos en los puntos mostrados en la figura 7.

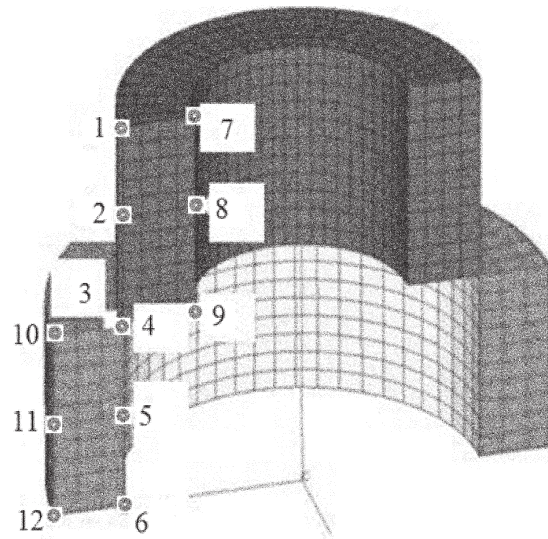


Fig. 7. Nodos de medición de resultados.

Las figuras 8 y 9 muestran la variación de los esfuerzos equivalentes de Von Mises durante el proceso de ensamble para el cilindro externo (camisa) e interno (eje) respectivamente.

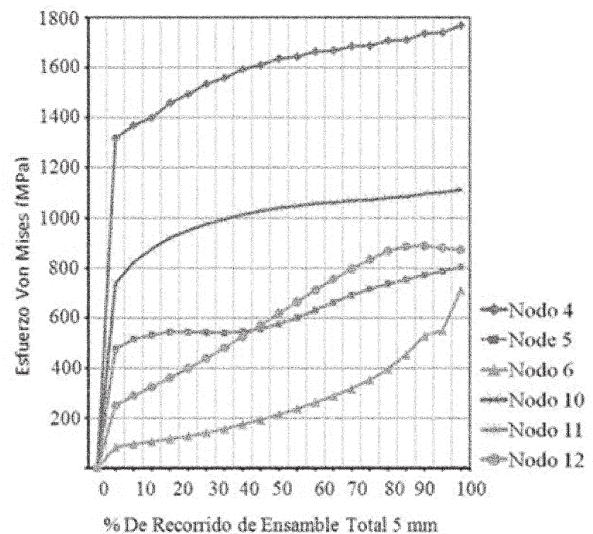


Fig. 8. Esfuerzo Von Mises en cilindro externo.

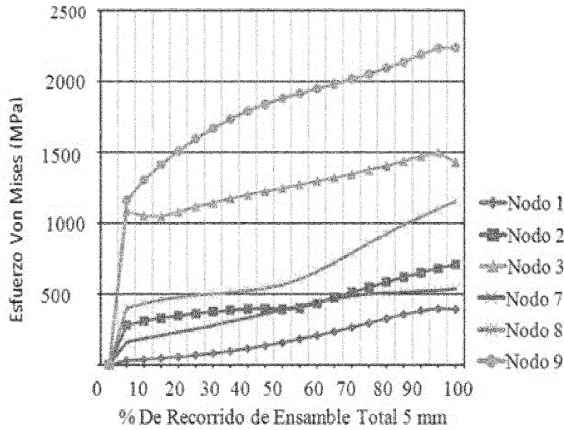


Fig. 9. Esfuerzo Von Mises en cilindro interno.

En la figura 8, el esfuerzo de Von Mises de 800 MPa corresponde al nodo 5, sin embargo el esfuerzo máximo es de 1768 MPa en el nodo 4. En la figura 9, el esfuerzo en el nodo 2 es de 707 MPa, para el nodo 3 el esfuerzo es de 1426 MPa.

Puede observarse que los esfuerzos máximos se presentan en los nodos de los cilindros donde ocurre el contacto inicial. Otra característica importante a resaltar es que los esfuerzos en todos los puntos de medición tienden a incrementarse conforme se desarrolla el ensamble, aunque al inicio el aumento del esfuerzo es abrupto, la curva tiene una pendiente pequeña en la parte final del proceso.

Las figuras 10, 11 y 12 muestran los esfuerzos principales, mientras que la figura 13 muestra la distribución del esfuerzo de Von Mises en el tiempo final de ensamble.

La figura 14 muestra la distribución de presión de contacto, se observa que en la parte media, el valor es de 410 MPa. Sin embargo, el valor máximo de la presión equivale a 1038 MPa.

Las figuras 15 y 16 muestran los resultados del MEF, en el cual se elimina el desplazamiento relativo de los elementos (eje y camisa); puede observarse que la distribución de esfuerzos a lo largo de la unión de ensamble es constante (figura 15). La distribución de presión de contacto tiene una variación pequeña de 407 a 415 MPa (figura 16).

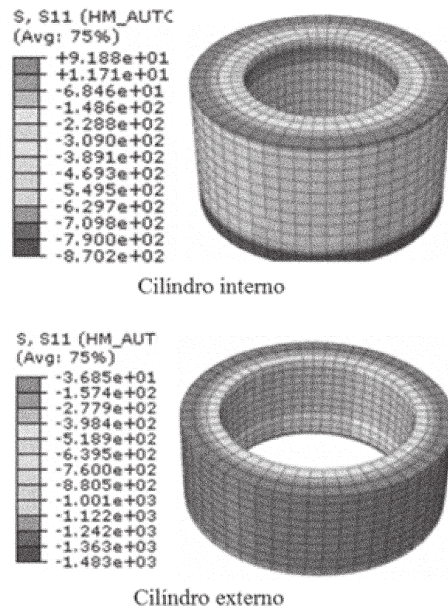


Fig. 10. Esfuerzo principal σ_1 en MPa.

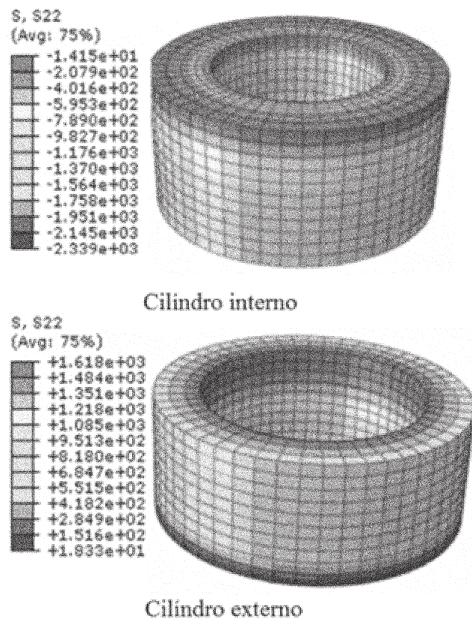


Fig. 11. Esfuerzo principal σ_2 en MPa.

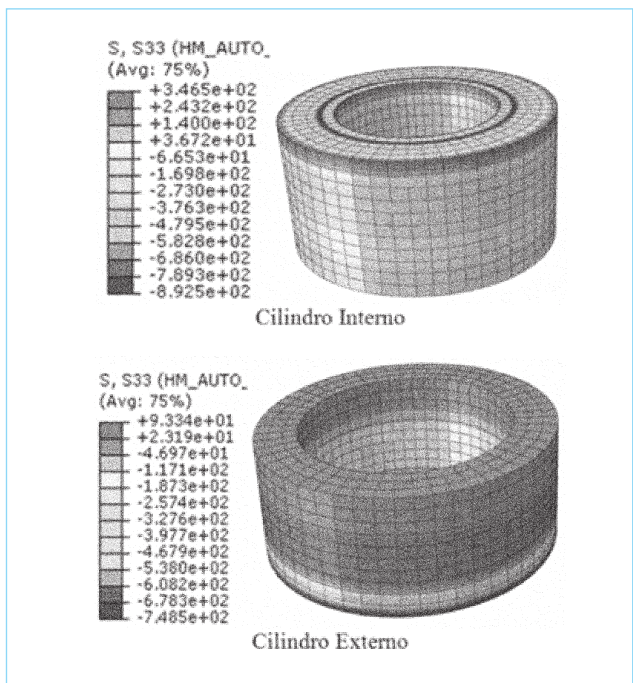


Fig. 12. Esfuerzo principal σ_3 en MPa.

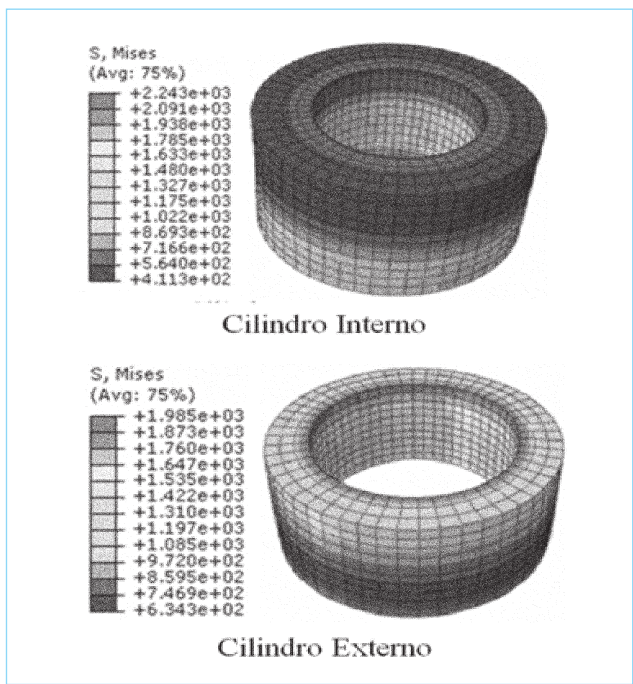


Fig. 13. Distribución de esfuerzos Von Mises en MPa.

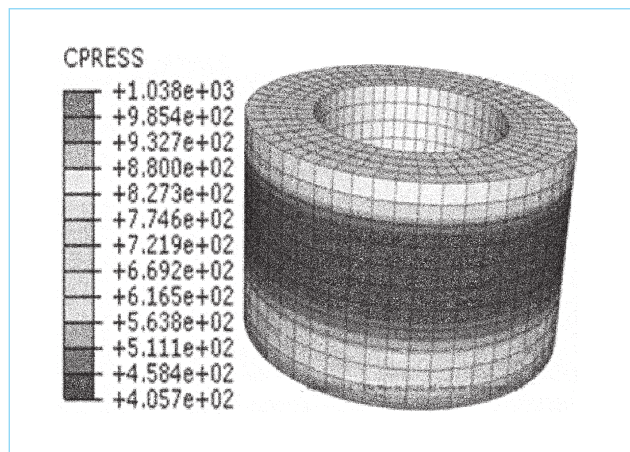


Fig. 14. Distribución de contacto en MPa.

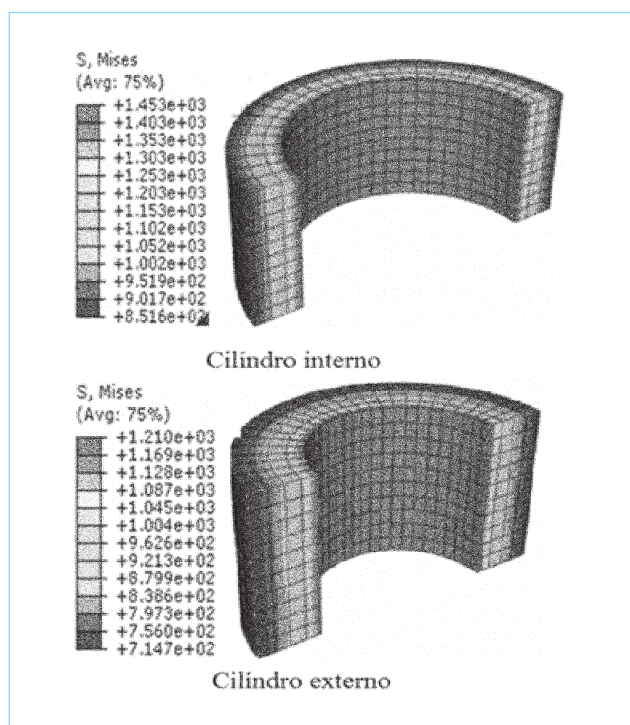


Fig. 15. Distribución de esfuerzos Von Mises en MPa.

8. Análisis de resultados

La tabla 2 muestra la comparación de los resultados analíticos y los valores obtenidos por el MEF con y sin desliza-

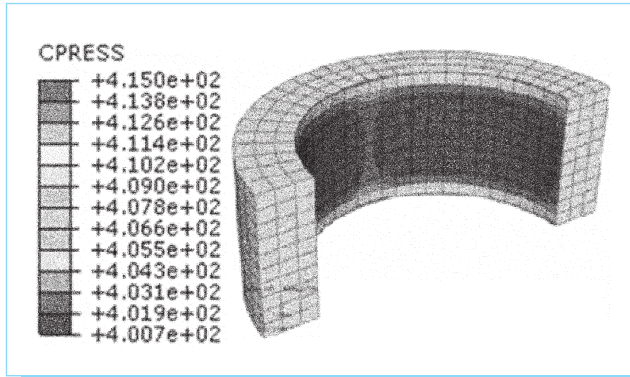


Fig. 16. Presión de contacto máxima de 415 MPa.

miento relativo de los elementos unidos por interferencia. Se puede observar que los resultados analíticos y los del MEF, sin tomar en cuenta el deslizamiento relativo, convergen. Sin embargo el estudio del MEF, considerando el deslizamiento relativo, muestra esfuerzos más altos, y éstos ocurren en puntos de concentración de esfuerzos, los cuales no pueden determinarse por las ecuaciones analíticas comunes.

9. Conclusiones

De acuerdo al análisis y resultados que se presentan en este trabajo de investigación, se puede concluir lo siguiente:

- Este trabajo de investigación ha mostrado una comparación analítica-numérica para desarrollos de ensamble por

Tabla 2. Comparación de resultados.

Elemento	Análisis teórico	MEF sin desplazamiento	MEF con desplazamiento
Cilindro interno	VM 723 MPa	VM 715 MPa (<1.1 %)	VM 1426 MPa (>192.2 %)
Cilindro externo	VM 1471 MPa	VM 1453 MPa (<1.2 %)	VM 1768 MPa (>20.2 %)
Presión contacto	400 MPa	415 MPa (> 3.75 %)	1038 MPa (> 259.5 %)
Fuerza ensamble	7.6 KN	—	10 KN (>31.5%)

interferencia. Donde el hecho de considerar el fenómeno real de intrusión del eje dentro de la camisa, causa concentración de esfuerzos, los cuales pueden observarse por medio de la simulación numérica utilizando el MEF. Mientras que las ecuaciones analíticas de la teoría de Lamé no tienen el alcance de mostrar estas variaciones.

- Los esfuerzos mayores en un ensamble por interferencia ocurren en los extremos de los elementos de contacto y de acuerdo a los valores de interferencia. Éstos pueden presentarse en una zona con una deformación plástica, lo cual debe tomarse muy en cuenta para el diseño de una unión de este tipo.
- En este artículo se muestra el potencial del método de elemento finito para determinar esfuerzos reales en uniones por interferencia y cuantificar los esfuerzos plásticos que las ecuaciones de Lamé no son capaces de predecirlos.
- Asimismo, en este trabajo de investigación se presentó una nueva metodología con corroboración numérica para el desarrollo de ensambles por interferencia. El tipo de estudio numérico con consideraciones de movimiento que aquí se presenta puede ser muy bien utilizado en cuestiones de biomecánica, como el desarrollo de prótesis de cadera y endobronquiales [18-19]. Por otra parte, se puede generar fatiga con alto y bajo número de ciclos. Una alternativa de análisis puede ser con la teoría del daño acumulado dado que existen condiciones elastoplásticas [20].

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo de recursos financieros y equipo al Consejo Nacional de Ciencias y Tecnología y al Instituto Politécnico Nacional para la realización de esta investigación.

10. Referencias

- [1] Xiu, S. C., Feng, Q., Gao, S.Q., "Reliability Design Method for Interference Joint in Mechanical Engineering", *Advanced Materials Research*, vol. 44-46, pp. 773-778, 2008.
- [2] Ugural AC, Fenster SK, *Advanced Strength and Applied Elasticity*, 4ª ed., Prentice Hall, 2005.
- [3] Norton, R. L., *Machine Design An Integrated Approach*, Prentice Hall, 1996.
- [4] Attia, M. H., Kops, L., "A method for generating desired contact pressure distributions in experimental interfacial studies", *J Eng Industry*, vol. 107, pp 241-246, 1985.
- [5] Prasad NS, Sashikanth P, Ramamurti V, "Stress Distribution in Interference Joints", *Computers Struct*, vol. 51, no. 5, pp. 535-540, 1994.

- [6] Zhang, Y., McClain, B., Fang, X. D., "Design of Interference Fits Via Finite Element Method", *Int J Mech Sci*, vol. 42, pp. 1835-1850, 2000.
- [7] Samant, R. N., Phelan, P. E., Ullah, M. R., "Finite Element Analysis of Residual-Stress-Induced Flatness Deviation in Banded Carbon Seals", *Finite Elem Anal Des*, vol. 38, pp. 785-801, 2002.
- [8] Özel, A., Temiz, S., Aydin, M. D., "Stress Analysis of Shrink-Fitted Joints for Various Fit Forms Via Finite Element", *Materials and Design*, vol. 26, no. 4, pp. 281-289, 2005.
- [9] Urriolagoitia-Sosa, G., Hills, D. A., Sackfield, A., "A Shrink-Fit Peg Subject to Bending and Shearing Forces", *J. Strain Ana. Eng. Des.*, vol. 34, no. 1, pp. 23-29, 1999.
- [10] Urriolagoitia-Sosa, G., Hills, D. A., "A shrink-fit peg in a hole subjected to bending: unloading, reloading and frictional shakedown", *J. Strain Ana. Eng. Des.*, vol. 35, no. 5, pp. 319-327, 2000.
- [11] Megson, T. H. G., *Structural and Stress Analysis*, Butterworth-Heinemann, 1996.
- [12] Hernández-Gómez, L. H., Urriolagoitia-Calderón, G., Urriolagoitia-Sosa, G., Sandoval-Pineda, J. M., Merchán-Cruz, E. A., Guardado-García, J.F., "Assessment of the structural integrity of cracked cylindrical geometries applying the EVTUBAG program", *Rev. Tec. Ing. Univ. Zulia*, vol. 32, no. 3, pp. 190-199, 2009.
- [13] Dowling, N. E., *Mechanical Behavior of Materials*, 2^a ed., Prentice Hall, pp. 252, 1998.
- [14] *Abaqus Documentation Manual v6.7*. Abacus, Inc, USA.
- [15] Urriolagoitia-Sosa, G., Urriolagoitia-Calderón, G., Hernández-Gómez, L. H., Romero-Ángeles B., Torres-Torres, C., Rodríguez-Martínez, R., "Evaluación numérica del proceso de granallado y determinación del campo de esfuerzos residuales por medio del método de respuesta de grieta", *Rev. Int. Mét. Num. Calc. Dis. Ing.*, vol. 26, pp. 203-206, 2010.
- [16] Urriolagoitia-Sosa, G., Urriolagoitia-Calderón, G., Sandoval-Pineda, J. M., Hernández-Gómez, L. H., Merchán-Cruz, E. A., Rodríguez-Cañizo, R. G., Beltrán-Fernández, J. A., "Residual stresses in beams (with and without prior history) numerical assessment by the crack compliance method", *Strain*, 2010.
- [17] López-Castro, A., Durodola, J. F., Urriolagoitia-Sosa, G., Fellows, N.A., Measurement and prediction of springback in bending beams, *Rev. Mex. Fis.*, vol. 51, No. 1, pp 30-34, 2005.
- [18] Torres-San-Miguel, C. R., Urriolagoitia-Calderón, G., Urriolagoitia-Sosa, G., Hernández-Gómez, L.H., "Numerical Analysis of Intrabronchial Prosthesis Used for the Treatment of Lung Cancer", *Rev. Col. Biotec.*, Vol. XII, pp 32-38, 2010.
- [19] Morales-Bonilla, S., Torres-Torres, C., Urriolagoitia-Sosa, G., Hernández-Gómez, L. H., Urriolagoitia-Calderón, G., "Interferometric laser detection of nanomechanical perturbations in biological media under ablation conditions", submitted to the *Journal of Physics*, 2011.
- [20] Granda-Marroquín L. E., Hernández-Gómez, L. H., Urriolagoitia-Calderón, G., Urriolagoitia-Sosa, G. y Merchán-Cruz, E. A. "Cumulative Damage Evaluation under Fatigue Loading", *Applied Mechanics and Materials*, vols. 13-14, pp. 141-150, 2008.

DOAJ

Directory of Open Access Journals

20% of peer-reviewed articles
across all disciplines
are now freely available

<http://www.doaj.org/>

El enfoque de sistemas para la aplicación de la manufactura esbelta

Yolanda Juárez-López¹
Jorge Rojas-Ramírez²
Joselito Medina-Marín¹
Aurora Pérez-Rojas¹

¹Centro de Investigación Avanzada en Ingeniería Industrial,
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo,
Mineral de la Reforma, Hidalgo,
MEXICO.

²Posgrado en Ingeniería de Sistemas,
Sección de Estudios de Posgrado e Investigación,
Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica,
Instituto Politécnico Nacional,
Unidad Profesional 'Adolfo López Mateos',
México DF, CP 07738,
MEXICO.

correo electrónico (email): yolandaj@uaeh.reduaeh.mx
jrojasr@ipn.mx
jmedina@uaeh.edu.mx
auropr@uaeh.edu.mx

Recibido el 13 de mayo de 2010; aceptado el 30 de noviembre de 2010.

1. Resumen

El enfoque de sistemas, por su potencial para apoyar conceptualmente la solución de problemas complejos en los dominios más diversos, es considerado de gran utilidad para guiar la aplicación de propuestas de mejora en organizaciones reales. Los sistemas de producción han evolucionado en los criterios de operación, de las decisiones del propio sistema a las que toman en cuenta a los usuarios de la producción, como en el pensamiento esbelto. En este contexto, se presenta el estudio de un sistema de manufactura, que se simula y se analiza para mostrar las relaciones entre parámetros y medidas de desempeño. Con él se comprueban los aspectos de complejidad en elementos y en interacciones del sistema. Se verifica así que es necesari-

rio el enfoque de sistemas para la formulación de un modelo de mejora dirigido a la empresa mexicana sobre bases esbeltas.

Palabras clave: enfoque de sistemas, manufactura esbelta, medidas de desempeño, simulación, sistemas de producción.

2. Abstract (The Systems Approach for Lean Manufacturing Application)

The systems approach, due to the potential to conceptually support the solution of complex problems in the most diverse fields, is very useful to guide the application of improvement proposals of actual organizations. In production systems an evolution in operational criteria has occurred, from the system-centered decisions to those taking into account the product customers, as lean thinking. With this background, the study of a manufacturing system is presented. It is simulated and analyzed to show the relationships between parameters and performance. This illustrates complexity aspects in system elements and interactions. A conclusion is stated about the need to include the systems approach in the proposal of a lean-based improvement model for Mexican enterprises.

Key words: lean production, manufacturing systems, performance criteria, simulation, systems approach.

3. Introducción

En este artículo se lleva a cabo un análisis de la administración del proceso en los sistemas de manufactura, con el objeto de resaltar los beneficios que el enfoque de sistemas aporta para mejorar la toma de decisiones. Esta aportación es necesaria, puesto que se trata de una organización de alta complejidad, con fuertes interacciones entre sus elementos, una amplia diversidad de puntos de decisión y variedad en la definición de las medidas para calificar su desempeño.

El trabajo proviene de un proyecto de investigación sobre la aplicación del paradigma de la manufactura esbelta a empresas en México, por la necesidad de precisar las ideas sistémicas de la propuesta sobre generalización y complejidad [1]. El valor de las soluciones está en función de lo espe-

cífico o general de los sistemas estudiados, de las relaciones de linealidad y recursividad entre los elementos de aquéllos y de la aplicación de los puntos de control de los procesos.

El pensamiento esbelta, de origen japonés y actualmente a disposición del mundo occidental [2], se fundamenta en la eliminación de todo desperdicio a lo largo del proceso de producción. Esta característica ofrece un gran interés para ser analizada bajo el enfoque de sistemas y volverla operativa en una guía de aplicación.

Como ilustración de las modificaciones potenciales para volver esbeltos a los procesos, se describe un ejemplo de sistema de producción de vehículos, que al inicio exhibe los desperdicios y su modificación mediante la propuesta, se experimenta en un simulador de procesos de manufactura, con cuyos resultados se evalúa su impacto.

4. El enfoque de sistemas y la producción

El conocimiento de los sistemas de producción no es fácil de generalizar, pues cada organización real posee características propias, de manera que se justifica profundizarlo bajo el enfoque sistémico [3].

A pesar de lo sencillo que es comprender un proceso de transformación como el de la Fig. 1(a), mediante el cual se obtiene un producto útil al conjugar materiales, maquinaria, personal, energía e información tecnológica, la expresión que adquiere un conjunto interconectado de estos procesos introduce nuevos elementos, con lo que aparece un aumento en la complejidad [4]. Uno de estos casos, por ejemplo el de la Fig. 1(b), es la secuenciación de dos procesos productivos. Si el primero suministra de manera continua a lo largo del año una materia que el segundo ocupa para entregar un producto de naturaleza estacional, que sólo es demandado la mitad del año, entre ambos aparece un desfase del flujo. La manera de hacerle frente es desacoplar las dos velocidades con un inventario de producto intermedio. Mientras el segundo proceso no tiene demanda, se acumula el material de entrada, para utilizarse en su periodo de funcionamiento. En consecuencia, las nuevas decisiones incluyen a los dos elementos productivos iniciales, más el elemento de inventario, requerido para la operación conjunta, con un aumento en complejidad.

Otro ejemplo se encuentra al estudiar un proceso en el que no se fabrica un solo tipo de producto, sino que es capaz de programarse para varios. El acondicionamiento requerido para cambiar de un tipo de producto a otro, genera un tiempo llamado de preparación, durante el cual el proceso no es productivo. El tratamiento de este periodo nuevamente da lugar a

una situación adicional a la del sistema original. El caso se ilustra en la Fig. 1 (c).

Además de lo anterior, en los sistemas reales aparecen fallas en las máquinas, productos inaceptables en calidad, ausencia de personal y otros, al grado de que el esquema inicial es difícilmente logrado. Como señala Churchman [5] al describir un sistema, existen objetivos, ambiente, recursos, componentes y administración, que es el aspecto que decide sobre los otros.

En la evolución mundial de los sistemas de producción, la manera de definir y aplicar la administración ha marcado su grado de avance. En este sentido, es necesario señalar las características de los paradigmas predominantes a lo largo de la historia [6, 7].

5. Cambio de paradigmas en los sistemas productivos

La aplicación del enfoque de sistemas a la producción tiene una evolución desde la administración científica, con criterios del máximo aprovechamiento, a la producción en masa, pretendidamente llevada por la eficiencia de las operaciones de la cadena, de ahí a la automatización y la informatización por las facilidades de procesamiento y almacenamiento de volúmenes de datos, y algunas alternativas, como la producción justo a tiempo y la teoría de las restricciones.

5.1. El paradigma de empujar la producción

La época de la administración científica de Taylor buscaba sentar el proceso de producción sobre bases numéricas rígidas y era el empresario quien imponía los ritmos y normas de fabricación a conveniencia del sistema y no del mercado [6], de donde se deriva la denominación de sistema de empujar. Se identifica con la cadena de montaje, la medida de tiempos y movimientos, la producción de artículos estandarizados y en grandes series. La economía del tiempo y las tecnologías de medición y control del trabajo caracterizan al modo de producción en masa.

Durante la primera mitad del siglo XX se despertó el interés por este sistema de producción, adoptado por los fabricantes estadounidenses de automóviles y convertido en el modelo a seguir por las demás empresas [7]. Su principal exponente fue el sistema Ford de fabricación de autos *Modelo T*, de color negro. La idea de que los consumidores sólo preferían esta opción no llegó más allá del año 1927, cuando se hizo patente que el cliente es también capaz de expresar sus necesidades.

En los años sesenta y setenta se observó que producir en masa requería que el sistema no sólo contara con elementos de producción, sino que adicionaba los de inspección, de trans-

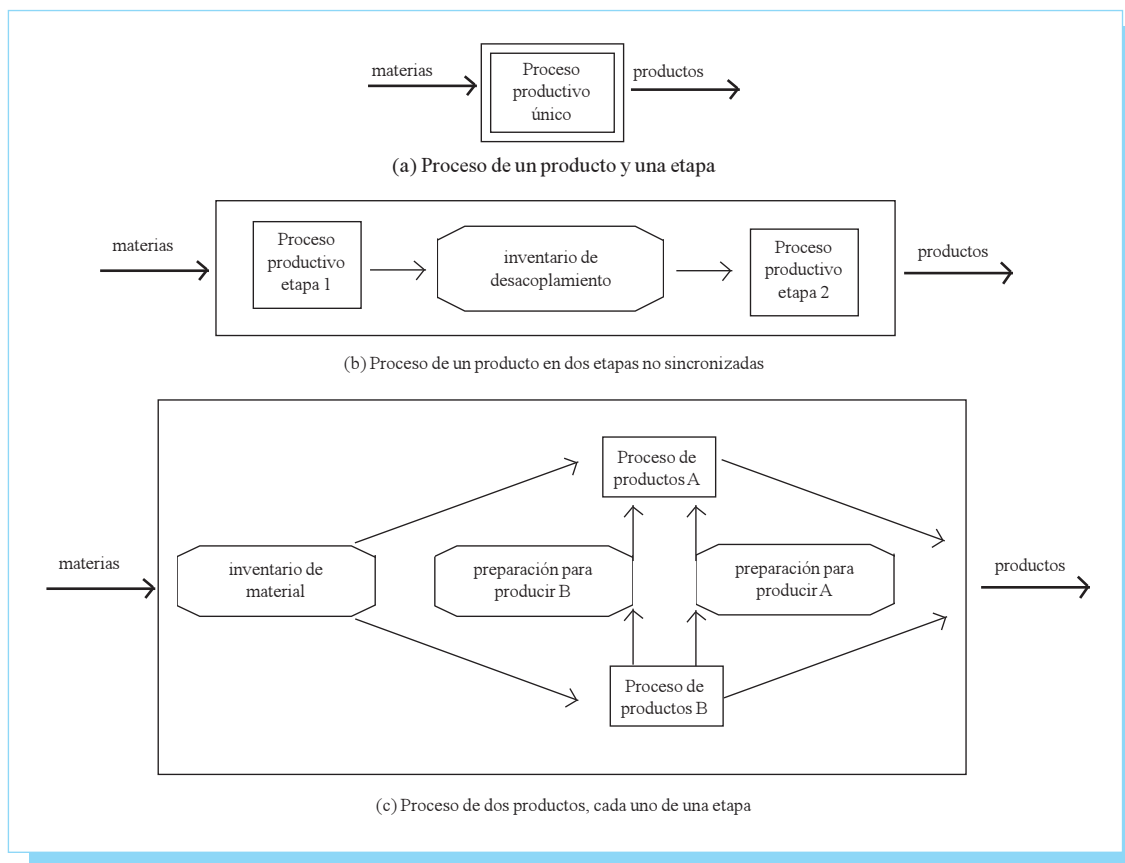


Fig. 1. Aumento de complejidad en un sistema de manufactura por la adición de elementos.

porte, de almacenamiento, de mantenimiento y de administración, lo que implicaba enormes inventarios, tanto de producto terminado, como de materia prima.

En épocas más recientes, una de las tendencias en la fabricación de empujar, que a veces se establece como único paradigma, es la que se inclina por la automatización [8]. En este tema es muy importante señalar que los sistemas altamente automatizados sólo pueden justificarse cuando la demanda es de cantidades muy grandes y no hay cambios de preparaciones, o sea, fabrican un solo tipo de producto. En el renglón tecnológico son de gran interés por las oportunidades de informatización que ofrecen, pero no se apegan a muchos mercados, que requieren de variedad.

5.2. El paradigma de jalar la producción

La designación como sistemas de jalar les es dada por ser el cliente, al pedir las especificaciones, las cantidades y las variantes de los productos, quien define las decisiones de pro-

ducción, con lo que "jala" las decisiones internas del proceso [6]. La consideración de la calidad y de las preferencias del cliente se manifestó en los sistemas japoneses después de la Segunda Guerra Mundial, al observar los sistemas de producción americanos y adecuarlos a su manera de pensar [9].

Uno de los primeros en hacer operativas estas ideas fue el Sistema de Producción Toyota (TPS) [10, 11] y al extender su aplicación a otros procesos fue conformando lo que se conocería como la producción Justo a Tiempo (JIT). Ésta llamó la atención del mundo occidental y el problema por resolver se centró en la adecuación hacia una aplicabilidad más generalizada [12, 13]. Convencidos los países de Occidente de las ventajas de coordinar las decisiones de producción con las necesidades del mercado, mediante la eliminación de los elementos no productivos con el adelgazamiento del proceso, ha promovido la nueva designación de manufactura esbelta (*Lean Production*) [7]. Su cualidad es la de cumplir los objetivos del sistema sin cargar con actividades superfluas a la producción, al tiempo que consumen recursos del mismo.

6. El pensamiento esbelto en manufactura

La manufactura esbelta se fundamenta en la reducción del desperdicio y en la calidad de los productos a través del compromiso de cada uno de los integrantes de la organización, así como de una fuerte orientación a la participación en las tareas [8]. Con estos principios, el desempeño se traduce en mayor productividad, menor tiempo invertido, mayor calidad, mayor satisfacción del cliente, mayores ventas y, consecuentemente, mayores utilidades.

Dentro de la finalidad de mejorar el desempeño del sistema, anteriormente comentada, de cubrir los verdaderos objetivos productivos con el mecanismo de suprimir las actividades innecesarias, catalogadas como desperdicios, la definición del paradigma de la manufactura esbelta aparece como un dominio de estudio que ofrece grandes perspectivas de buen éxito. Sistémicamente se muestra coherente, al poseer en común la eliminación de los desperdicios en todas sus herramientas, con lo cual se espera que la aplicación de una de ellas no genere un impacto negativo en otra.

Si bien reúne una colección de herramientas dirigidas a la eliminación de la variedad de los tipos de desperdicios, la manufactura esbelta no constituye en sí un método definido. Por esta razón, la investigación en curso, en función de un conjunto de empresas mexicanas analizadas, busca definir un procedimiento de aplicación que aproveche sus fundamentos y estructura, en función de aquéllas, la mejor manera de seleccionar las herramientas.

Una de las maneras de explicar el funcionamiento en la práctica de los principios esbeltos se hace a través de su desglose en herramientas. Así, cada una se dedica a un aspecto particular de eliminación del desperdicio en cada parte del proceso. Como ilustración, algunas de las citadas herramientas se describen en seguida:

- Control autónomo de defectos. Son técnicas que disminuyen las posibilidades de cometer errores en el proceso, controlan la calidad en el origen y no al final de la línea de producción y facultan al operario para detenerla en caso de problemas, frecuentemente con señalizaciones visuales y sonoras, evitando la propagación de fallas en la producción. En la terminología japonesa se identifica con *jidoka*, *poka-yoke* y *andon*.
- Mantenimiento productivo total. Abreviado como TPM (*Total Productive Maintenance*), se destina a eliminar las pérdidas del sistema por tiempos muertos en las máquinas y la generación de productos defectuosos por las máquinas.
- Reducción de las preparaciones. Conocido como SMED (*Sim-*

gle Minute Exchange of Die), es el cambio de tiempos de preparación a un dígito en minutos, es decir, menos de 10.

- Distribución de planta eficiente. Bajo el término de *shojinka*, se refiere a la disposición física del proceso en que se origina el acortamiento de las distancias recorridas por el producto.
- Mayor participación del elemento humano. Es una de las expresiones del concepto *soikufu*, en que se motiva la acción humana para sugerir las mejoras al proceso y extenderlas a las de preparación, supervisión y mantenimiento, en vez de asignarlas a personal especializado.

Los cuatro últimos conceptos se eligen para llevar a cabo una prueba de impacto sobre el desempeño del sistema total, resultante de promover ajustes razonables en los parámetros del proceso relacionados con ellos. Lo anterior proporcionará información sobre las interdependencias y la sinergia en el sistema de manufactura.

7. Definición del problema

Por las condiciones ventajosas que implica la simulación en computadora y la orientación de esta investigación a la identificación de herramientas esbeltas aplicables, es esta técnica la que se utiliza. El simulador seleccionado para la experimentación es *ProModel* [14].

La ubicación del problema en el caso analizado requiere un acercamiento progresivo. En su generalidad, la empresa estudiada refleja baja competitividad internacional y altos índices de costos. La organización no sabe cómo llegar a resolver estos problemas por desconocimiento de técnicas de aplicación. Las soluciones se plantean a corto plazo y en entornos locales, con lo que un problema desaparece a costa de dejar que aparezcan otros.

Comprendiendo la complejidad que conlleva este tipo de sistema, una organización industrial está sujeta a eventos cambiantes y está formada por factores humanos, técnicos y ambientales. Al concretar los problemas de producción, resaltan: la mala calidad, los retrabajos, las interrupciones y los tiempos y esfuerzos perdidos, lo que impide un flujo continuo de productos, y todos tienen en común que constituyen desperdicios. Resalta entonces la oportunidad de aplicar la manufactura esbelta.

7.1. El modelo utilizado

Para las empresas estudiadas, objeto de las propuestas de mejora, se ha conformado un caso representativo de la industria de fabricación de material ferroviario. Entre un pro-

ceso previo de montaje metálico y uno posterior de vestidura, se ubica el proceso de pintura, que se subdivide en cinco etapas productivas con almacenes entre ellas.

El proceso se ilustra en la Fig. 2, en donde se observan:

- a) El material recibido del proceso previo;
- b) Las etapas de limpieza a presión por granalla y aplicaciones de primario, de plaste, de pintura intermedia y de pintura final;
- c) La inspección al producto, con tres resultados posibles;
- d) Si es aprobado, lo que ocurre en el 60% de los casos, se envía a vestidura;
- e) Si es valorado para retrabajo, cuya tasa es del 28%, se lleva a repetir la pintura final;
- f) Si es evaluado como rechazado, en que sólo se aprovecha su contenido metálico, se devuelve al inicio de este proceso, situación que se presenta en el 12% restante de los casos;
- g) En cada uno de estos tres casos, el producto no entra para ser trabajado directamente, sino a un almacén temporal.

7.2. Corridas de simulación

Las herramientas bajo prueba se conformaron en una disposición para la realización de un experimento factorial completo que, con cuatro factores y dos niveles, abarca 16 casos por las

combinaciones binarias, como se ilustra en la Tabla 1. El modelo de simulación [15], que en su expresión de inicio presenta al sistema con sus problemas, se modifica en sus parámetros para cada una de las 15 variantes, de acuerdo con lo anterior.

Éstas son las modificaciones incluidas:

- 1) Reducción de preparaciones. El cambio en el modelo implica ajustar el tiempo de preparación de las instalaciones de pintura final, al pasar de 25 a 9 min.
- 2) Reducción de recorridos. En la programación, el periodo para pasar de una estación o almacén a otro cambia de 30 min. a sólo 20.
- 3) Capacitación del operario. La variación al ejecutar las etapas se reduce, con el cambio de 24 min. a 6 en la desviación estándar del tiempo de proceso de distribución normal, para el caso de la primera etapa, y de 6 a 2, en el de la segunda, respectivamente.
- 4) Agilización del mantenimiento. Son dos los parámetros que sufren modificación: el tiempo medio entre fallas, que aumenta de 500 a 1500 min., y el tiempo medio para reparar, que se reduce de 120 a 60 min.

Por cada experimento se realizaron 500 réplicas en la simulación, para mayor representatividad.

7.3. Resultados obtenidos

Las corridas de simulación permiten recolectar una enorme cantidad de datos, con los que se pueden analizar muy variadas estadísticas, sobre todo en cuanto a relaciones de causa y efecto, por lo que se reseña sólo una parte de la información obtenida.

Se elige presentar, como medidas del desempeño del sistema, una indicadora del uso del equipo y otra de la calidad del producto. Para representarlas, en las variables del modelo se definen a Q_a , Q_b y se combinan en Q .

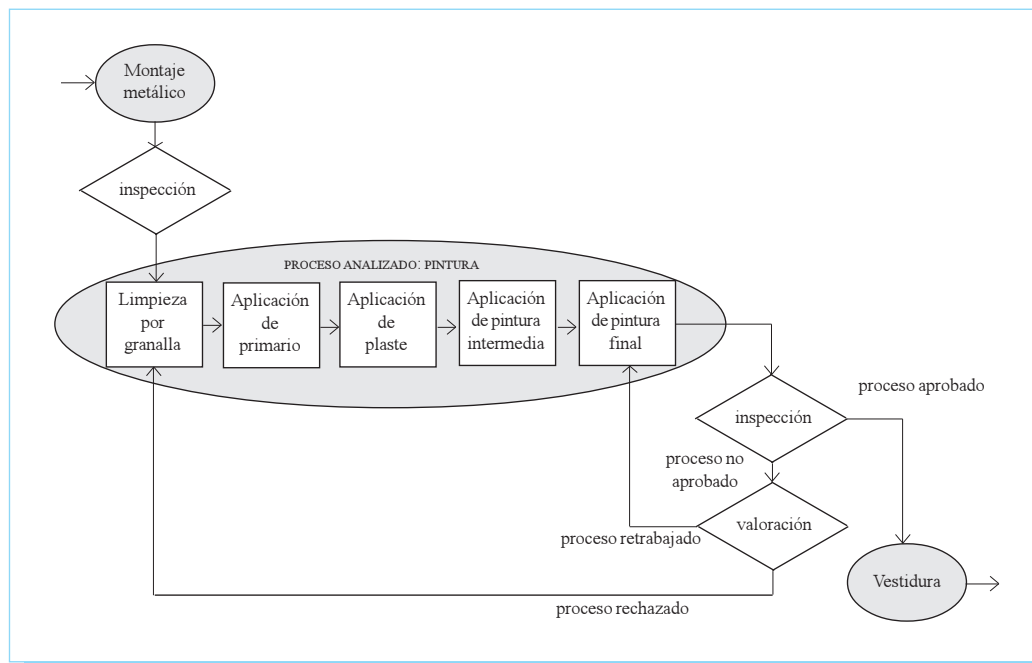


Fig. 2. Representación esquemática del proceso bajo estudio.

Tabla 1. Resultados de los experimentos con el simulador.

Experimento	Reducción de preparaciones	Reducción de recorridos	Capacitación del operario	Agilización del mantenimiento	Disponibilidad Q_a	Calidad Q_b	Global Q (media)	Global Q (desv. est.)
1	-	-	-	-	0.8931	0.9013	0.8052	0.0414
2	+	-	-	-	0.8935	0.9018	0.8060	0.0434
3	-	+	-	-	0.9041	0.9038	0.8174	0.0427
4	+	+	-	-	0.9041	0.9014	0.8152	0.0407
5	-	-	+	-	0.8928	0.9022	0.8057	0.0416
6	+	-	+	-	0.8940	0.9038	0.8083	0.0422
7	-	+	+	-	0.9039	0.9007	0.8145	0.0413
8	+	+	+	-	0.9047	0.9035	0.8176	0.0410
9	-	-	-	+	0.9861	0.9013	0.8889	0.0395
10	+	-	-	+	0.9862	0.9072	0.8947	0.0394
11	-	+	-	+	0.9868	0.9015	0.8896	0.0392
12	+	+	-	+	0.9867	0.9036	0.8917	0.0391
13	-	-	+	+	0.9868	0.9015	0.8896	0.0392
14	+	-	+	+	0.9861	0.9024	0.8896	0.0390
15	-	+	+	+	0.9865	0.9031	0.8910	0.0403
16	+	+	+	+	0.9865	0.9019	0.8898	0.0382

La variable Q_a se emplea para representar la disponibilidad del equipo, medida para la etapa de pintura final. Se obtiene dividiendo el tiempo del estado de falla de la instalación entre el total de los tiempos de los demás estados y restando el resultado de uno. Para el caso de un equipo con pocas descomposuras, su indisponibilidad tenderá a cero y su complemento tenderá a uno.

Por su parte, para la calidad de la producción, Q_b se obtiene del cociente de productos correctos, sobre la suma de productos correctos, retrabajados y rechazados. No se requieren ajustes al indicador, pues una producción sin fallas genera un valor uno y, conforme crece el número de productos con cualquier tipo de error, tiende a cero.

Finalmente, el indicador de desempeño global Q , es obtenido con el producto directo de los dos anteriores, también con rango de 0 a 1,

$$Q = Q_a \times Q_b \quad (1)$$

Realizadas las pruebas de simulación, los desempeños del sistema resultantes se ilustran, para cada uno de los 16 experimentos, en la tabla 1.

Una primera observación conduce a confirmar que cada una de las modificaciones propuestas efectivamente mejora el desempeño global Q . Los experimentos 5, 2, 3 y 9, que corresponden a las mejoras por capacitación, preparaciones, recorridos y mantenimiento, alcanzan valores de 0.06, 0.1, 1.51 y 10.3%, respectivamente, sobre el experimento 1. El mantenimiento supera notoriamente a los demás.

Sin embargo, la aplicación de dos o más modificaciones al sistema no provoca mejoras proporcionales. Como un ejemplo, se cotejan los experimentos 3, 4 y 7. El primero corresponde a una sola mejora, que es la de reducción de recorridos, mientras que los otros tienen la misma mejora acompañada de una segunda (en preparaciones o en capacitación). El resultado numérico es que ninguno de estos dos supera el

rendimiento del experimento 3, de 0.8174, al quedarse en 0.8152 y 0.8145, respectivamente.

La comparación de los experimentos 8 y 9, por su parte, señala la ventaja en rendimiento para el segundo, de 0.8889 contra 0.8176, a pesar de que en éste se ejecutaron tres acciones y en el otro, sólo una.

Si ahora la búsqueda se interesa en el sistema con el máximo desempeño global, se encuentra que lo logra el experimento 10, que, con 0.8947 es mejor que el 16, de 0.8898, aun considerando que éste se modificó en cuatro parámetros y el experimento 10, en dos.

En cuanto al indicador de desempeño global Q , contrastado con sus dos componentes, también se presentan comparaciones que denotan la complejidad de las interrelaciones. Ya se ha mencionado que el máximo desempeño correspondió al experimento 10, pero si bien el indicador parcial de calidad Q_b coincide como el máximo, no ocurre así para el indicador de disponibilidad Q_a , para el que los experimentos 11 y 13 fueron mejores.

Con estos resultados solamente se ilustra una fracción de las variadas reacciones que los factores de un sistema de manufactura tienen sobre el desempeño, pero suficientes para mostrar los aspectos de complejidad y de interrelación planteados. Un complemento en la percepción de los resultados es entregado por los gráficos. Por ejemplo, dentro de los estados de operación del sistema, el porcentaje que corresponde a la indisponibilidad de tres de los experimentos, los casos 1, 4 y 13, se muestran en la figura 3, representativos del indicador Q_a .

8. Conclusiones

Con los resultados de la simulación del caso de ejemplo de un sistema de manufactura, desarrollado con datos de una empresa mexicana, se ha comprobado que el enfoque de sistemas es ineludible para comprender los fenómenos que en él ocurren.

Queda demostrado que, por el número de elementos que lo componen, por el número de las interrelaciones entre ellos y por la naturaleza no lineal de éstas, no es razonable formular soluciones simples a su problemática.

Puesto que la pretensión de un proyecto de investigación en curso es proponer, con elementos del pensamiento esbelto, un modelo de mejora de los procesos productivos para la empresa mexicana, queda de manifiesto que necesita un sustento de enfoque de sistemas.

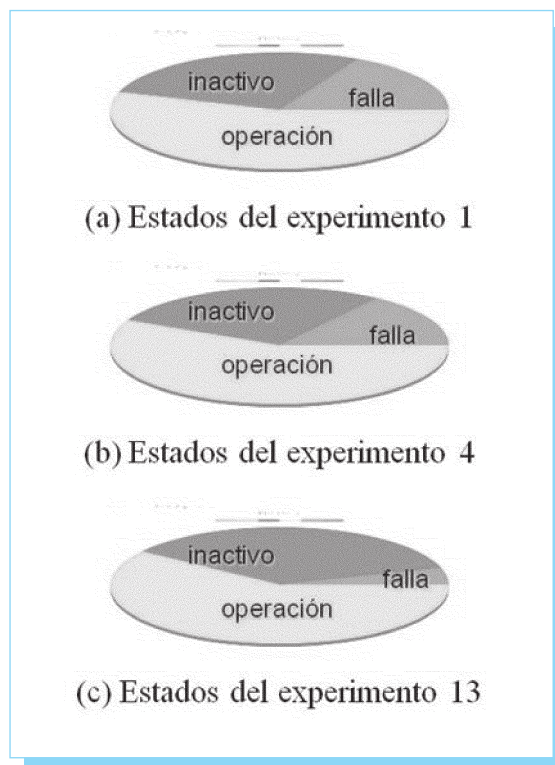


Fig. 3. Comparación del indicador de disponibilidad Q_a por estados en la etapa de 'pintura final' para tres experimentos.

Del caso analizado y simulado se han podido observar: las no linealidades de las variables, la necesidad de precisar la medida de desempeño adecuada, la correcta interpretación estadística de los experimentos en función de los aspectos aleatorios y la selección de los parámetros por someter a propuestas de mejora.

Anexo

Una versión previa de este texto fue presentada en el XI Congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas, en noviembre de 2009.

9. Referencias

- [1] Allen, J., Robinson, C. y Stewart, D. (eds.), *Lean Manufacturing: A Plant Floor Guide*, Dearborn MI: Society of Manufacturing Engineers, 2001.
- [2] Schonberger, R. J., *World Class Manufacturing Casebook: Implementing JIT and TQC*, Nueva York: Free Press, 1987.
- [3] Durand, D., *La Systématique*, 7ª ed., Paris: Presses Universitaires de France, 1996.

- [4] van Gigch, J. P., *Teoría general de sistemas*, 2ª ed., México: Trillas, 1997.
- [5] Churchman, C. W., *El enfoque de sistemas*, México: Diana, 1981.
- [6] Sipper, D. y Bulfin Jr., R. L., *Planeación y control de la producción*, México: McGraw-Hill, 1998.
- [7] Womack, J. P., Jones, D. T. y Ross, D., *The Machine that Changed the World: The Story of Lean Production*, Nueva York: Free Press, 2007.
- [8] Domínguez Machuca, J. A., et al., *Dirección de operaciones: aspectos tácticos y operativos en la producción y los servicios*, Madrid: McGraw-Hill, 1995.
- [9] Coriat, B., *Pensar al revés: Trabajo y organización en la empresa japonesa*, México: Siglo XXI, 1995.
- [10] Monden, Y., *Toyota Production System*, Norcross GA: Industrial Engineering and Management Press, 1993.
- [11] New, S. J., "Celebrating the Enigma: The Continuing Puzzle of the Toyota Production System", *Int. J. Prod. Res.*, vol. 45 núm. 16, 2007, pp. 3545-3554.
- [12] Bamber, L. y Dale, B. G., "Lean Production: A Study of Application in a Traditional Manufacturing Environment", *Prod. Plann. & Ctrl.*, vol. 11 núm. 3, 2000, pp. 291-298.
- [13] Bednarek, M. y Niño Luna, L. F., "The Selected Problems of Lean Manufacturing Implementation in Mexican SMEs", en *Lean Business Systems and Beyond*, T. Koch (ed.), Boston MA: Springer, 2008, pp. 239-247.
- [14] ProModel, *User's Guide*, v. 4.1, Orem UT: ProModel Co., 1998.
- [15] Hernández Osorio, A., "Evaluación de un Proceso Productivo Simulado bajo Criterios de Manufactura Esbelta", Tesis de Ingeniería Industrial, U. Autónoma Edo. Hidalgo, 2009.

ACE-X 2011

5th International Conference on Advanced Computational Engineering and Experimenting

3, 4, 5 & 6 July 2011, Algarve, Portugal.
www.ace-x2011.com/

Relevance of an Energy Dissipation as a Condition of a Stable Reeling Off of a Yarn from a Yarn Accumulator

Liudmila Oleynikova¹
José Antonio Gómez-Reyna¹
Alla Kabatskaia Ivanovna²

¹Department of Mechanical and Electrical Engineering, CUCEI, University of Guadalajara, Revolucion 1500, Guadalajara, Jalisco, CP 44100. MÉXICO.

²Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, ESIME Azcapotzalco, Instituto Politécnico Nacional, Av. de las Granjas 682, Col. Sta. Catarina. México DF, CP 02550. MÉXICO.

correo electrónico (email): loleinik_l@bk.ru
loleinik_l@yahoo.com.mx

Recibido el 13 de mayo de 2010; aceptado el 30 de noviembre de 2010.

1. Abstract

The problems of a yarn movement and yarn tension stabilization when a yarn is reeled off from cylindrical feeders and balloons are considered. The applications of the main laws of mechanics to a part of a moving yarn with the aim to evaluate its tension lead to different results if to assume a case of reeling off without energy dissipation. The application of momentum conservation law leads to result for yarn tension value which is more than twice bigger than correspondent result following from the application of energy conservation law. Taking into account possible energy dissipation during a yarn movement resolves this contradiction. It also shows that there is necessary level of energy dissipation to insure a stable yarn movement. It explains why in a number of situations a yarn often moves by jerks and vibrates although a speed of its end, by which it is drawn, and other conditions of reeling off are maintained constant. Stabilizing influences of air resistance and additional friction are considered and evaluated.

Key words: yarn, reeling off, balloon, jerk, yarn movement, tension, thread accumulator, weaving machine, stabilization, air resistance, friction, energy dissipation.

2. Resumen (Relevancia de la energía de disipación como una condición del enrollamiento estable de hilo del almacenador de hilo)

Están considerados los problemas de estabilización de movimiento del hilo y su tensión cuando el hilo se enrolla del almacenador cilíndrico y rueda. La aplicación de las leyes principales de mecánica hacia una parte del hilo en movimiento con la finalidad de evaluar su tensión ha llevado a diferentes resultados si asumimos el caso de enrollamiento sin disipación de la energía. La aplicación de la ley de conservación del impulso lleva al resultado para el valor de tensión del hilo que es más que dos veces mayor que el resultado correspondiente que sigue de la aplicación de la ley de conservación de energía. Tomando en cuenta la posible disipación de energía durante el movimiento del hilo resuelve esta contradicción. Esto también muestra que existe el nivel necesario de disipación de energía para abastecer el movimiento estable del hilo. Esto explica por qué en numerosas situaciones el hilo frecuentemente se mueve con tirones y vibra a pesas de la velocidad de su extremo por el cual se jala y otros condiciones del enrollamiento se mantienen constantes. La influencia estabilizadora de la resistencia del aire y la fricción adicional están consideradas y evaluadas. A pesar de los detalles de consideración provistos para máquinas de tejer los enfoques propuestos son válidos para diferentes aplicaciones de la mecánica de hilos y la mecánica de cables y cuerdas.

Palabras clave: hilo, enrollamiento, tirón, vibración, tensión, almacenador de hilo, máquinas de tejer, resistencia del aire, disipación de energía.

3. Introduction

A specific feature of textile weaving machines is the necessity of fulfillment of highly complicated operations with a yarn

that has no sufficient rigidity, moves at a high velocity and does not allow for high strains [1, 2]. For example, in filling insertion on weaving machines of projectile type, a filling yarn is taken up directly from a bobbin or cylindrical feeder (thread accumulator). A projectile transports a yarn at a velocity up to 35 m/s. Experimental studies of a weft movement and tension during its transportation in weaving looms with projectiles showed that a yarn movement was jerky [3, 4] and was accompanied by big oscillations of yarn tension (Fig. 1) even during a time when a projectile transported a yarn at constant velocity and all other conditions of transportation were unchanged. For this reason a yarn tension may reach extremely big values in its maximums and the movement of a yarn has irregular nature. These circumstances bring to increase of probability of breakdowns during filling insertion process and decrease of quality of fabrics produced.

In present article the movement of a yarn and its tension in a process of a yarn reeling off are considered. The stabilizing influences of air resistance and yarn friction are evaluated.

4. Yarn motion consideration

Some general features of ballooning yarn movement such as a balloon shape, dependence of yarn tension from a distance from axis of rotation are reviewing in [1, 5, 6, 7]. Nevertheless a problem of stability of stationary ballooning yarn movement is still, contains some unsolved questions. Besides the arguments given in these works incident to movement of a weft we point out on some important circumstances when a yarn is reeling off from cylinder feeder (Fig. 2).

Such feeder or thread accumulator is a smooth cylinder with a yarn wound regularly on it. We suppose that a friction between a cylinder and a yarn is negligible. It is usually a good assumption because of a small friction coefficient value between a yarn and

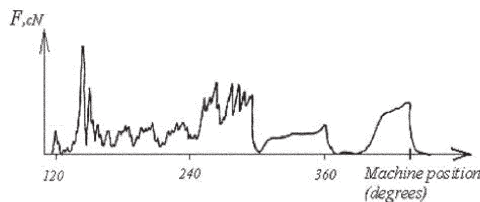


Fig. 1. Typical diagram of a weft yarn tension in a projectile weaving machine.

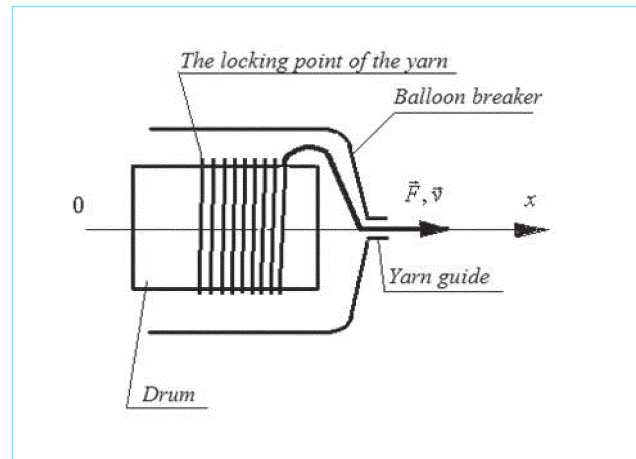


Fig. 2. Yarn reeling off from a cylinder feeder.

polished cylinder surface and absence of relative sliding motion. We also at first suppose that a yarn does not experience any friction against a balloon limiter surrounding this cylinder or against a yarn guide. We consider the problem when a yarn is pulled out from an accumulator by a loose end moving at a constant speed V along symmetry axis O_x . Then we will take into account air resistance and yarn friction forces from a yarn guide and a balloon limiter. We proceed in this consideration from the assumption that the process of reeling off is a continuous one. It means, among other things, that a yarn length from a point of its descending point from a yarn accumulating cylinder to a point of its contact with a yarn guide has a constant or unchanged in time form and it just rotates round symmetry axis O_x without changing its configuration.

5. Yarn tension

Let us determine force F which should be applied at a loose end of a yarn moving at a speed V as it is shown on Fig. 2 using for this determination the law of momentum conservation. This end will get ahead for a distance Vdt within a time dt . According to the law of conservation of momentum the impulse obtained by a yarn in O_x direction equals Fdt . As a friction force between an accumulator and a yarn is negligible, efforts from a side of accumulating cylinder surface on a yarn are perpendicular to axis O_x and so do not influence on momentum change of a yarn along axis O_x .

From other side a change in momentum of a yarn along axis O_x will amount to

$$\sum m_i V_{xi} - \sum m_j V_{xj} = V \sum m_n \quad (1)$$

where

- i, j indexes numbering yarn elements,
- $m_i V_{xi}$ component of momentum of a yarn element with its index i at a time moment $t + dt$,
- $m_j V_{xj}$ component of momentum of a yarn element with its index j at a time moment t ,
- n index numbering yarn elements what correspond a length Vdt passed by loose end of a yarn during a time dt .

Hence, if we will take into account that right side of equality (1) is equal to

$$V \sum m_n = \rho_l V^2 dt$$

we will obtain the formula

$$F = \rho_l V^2$$

where ρ_l is linear density of a yarn. Now let us note that actually a reaction force influences from a side of yarn guide on a yarn. This force is directed at approximately 135° angle to axis 0_x . This circumstance leads to an increase in force F deduced earlier. Thus, as this "neglected" force is in a direct proportion to $\rho_l V^2$ what follows from [5] and present consideration, a refined value of force at a loose end moving at a speed V will be

$$F = \rho_l V^2 (1 + k) \quad (2)$$

where k is positive dimensionless coefficient of the order of 1.

The former result is different from the result what follows from the law of conservation of energy. Owing to an ideal contact of a yarn with a yarn guide and a balloon limiter, as well as to negligible friction between an accumulating cylinder and a yarn, we can write that total work of force F_E in the point of application on loose end which moves at a speed V should be equal yarn kinetic energy increase value

$$F_E V dt = \rho_l V^3 dt/2$$

Consequently, force F_E at a loose end of a yarn moving at a speed V calculated from energy consideration equals

$$F_E = \rho_l V^2 dt/2 \quad (3)$$

which is more than twice less than force F , calculated according to the law of conservation of momentum.

6. Small influence of yarn elastic elongation on yarn tension during reeling off

In presented reasoning a yarn was considered as an inextensible one. It can be seen, though, that taking yarn elasticity and hence, a modification in yarn potential energy into account

will not lead to an explanation of deference in results for yarn tension received from momentum and energy consideration. Due to an insignificance of relative extension when $V \sim 30$ m/s, a share of yarn potential energy is small too.

During a time dt a segment of a yarn with length Vdt comes into motion. A work done by force F_E equals to a sum of kinetic dE and potential dP energies obtained with a yarn within time dt .

$$F_E V dt = dE + dP \quad (4)$$

Kinetic energy of a segment brought into movement in time dt is

$$dE = \rho_l V^3 dt/2 \quad (5)$$

Potential energy of this segment

$$dP \approx V dt \epsilon n \rho_l V^2 / 2 \quad (6)$$

where

$V dt \epsilon$ is elongation of a segment brought into movement, ϵ is relative elongation of a yarn, $n \rho_l V^2 / 2$ is approximate mean value of tension force which changes while extending from 0 up to $n \rho_l V^2$, $n \sim 1$.

At a yarn speed $V = 30$ m/s for 200 tex yarn linear density or $\rho_l = 200 \times 10^{-6}$ kg/m we obtain $n \rho_l V^2 \sim 200 \times 10^{-6} (30)(30) = 18 \times 10^{-2}$ N.

As it follows from diagrams shown on Fig. 3 a relative elongation values of threads under such tension forces are small $\epsilon \sim 0.02$, therefore dP value can be neglected in equality (4) because of $dP/dE \sim n \epsilon \ll 1$.

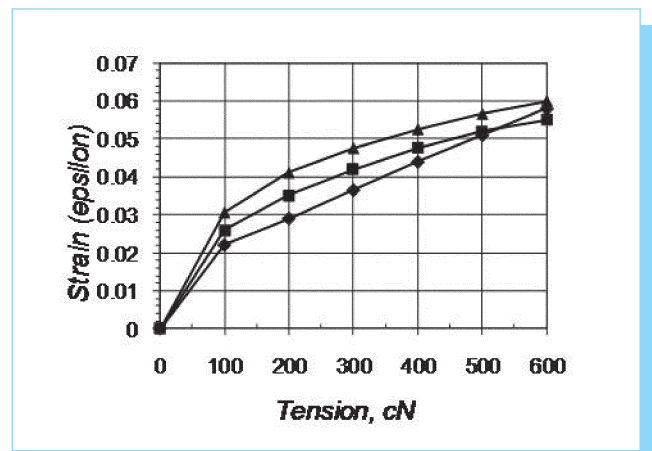


Fig. 3. Diagrams of yarn tension for different linear densities
 ◆ 105 tex; ■ 150 tex; ▲ 332 tex.

7. The effect of air resistance influence on the movement of a yarn during reeling off

We will need in approximate formula expressing a yarn diameter D if linear density ρ_l (kg/m) and volume density ρ (kg/m³) of yarn material (fiber) are known. A mass of an element of a yarn with its length l may be found by two equivalent ways, so it gives the equality

$$\rho_l l = \rho l \pi D^2 / 4$$

hence,

$$D = 1.13 \sqrt{\frac{\rho_l}{\rho}} \quad (7)$$

Concerning volume density of a yarn (thread) it needs to mention that the fibers which are mostly in use have their volume density ρ about 1×10^3 kg/m³. So for example, for yarn linear density 100 tex (100 tex correspond linear density in SI units $\rho_l = 100 \times 10^{-6}$ kg/m = 1×10^{-4} kg/m) we get yarn diameter according to formula (7)

$$D = 1.13 \sqrt{\frac{1 \times 10^{-4}}{1 \times 10^3}} = 3.6 \times 10^{-4} \text{ m} = 0.36 \text{ mm}$$

This is quite reasonable.

An air resistance force is generally perpendicular to a yarn element, as a resistance acting along a yarn is much smaller than a one acting across a yarn [6]. A force of resistance acting across of a thread of its length dl equals to

$$dF_a = \frac{\rho_a V_a^2}{2} c_l D dl \quad (8)$$

where ρ_a is air volume density, V_a is speed of movement of a yarn against surrounding air, c_l is coefficient of resistance across a yarn which depends on Reynolds number $Re = DvV_a/\nu$, where ν is coefficient of cinematic viscosity of air.

While reeling a yarn off and maintaining a speed V of its end pulled out, a speed of movement of a yarn against air will be $V_a = n_1 V$, where n_1 is a coefficient which equals approximately from 1 to 3 depending on relation of a radius of an accumulating cylinder or bobbin and a size of a balloon. For example, when loose end speed is $V \approx 30$ m/s and diameter of a yarn is $D = 3 \times 10^{-4}$ m then Reynolds number Re will equal approximately 900. For Reynolds number from 200 to 10 000 coefficient c_l equals 1.1 with an accuracy which is better than 10%. For Reynolds numbers bigger than 10 000 coefficient of resistance c_l equals approximately 2 [8].

Then according to (7) and (8) a power expended by a yarn segment in a balloon having length l to overcome a force of air resistance approximately equals to

$$N_r \approx 0.57 \rho_a V_a^3 l c_l \sqrt{\frac{\rho_l}{\rho}} \quad (9)$$

A difference in powers deduced from the law of modification of momentum and from the law of conservation of energy can reach

$$N_a = n_2 \frac{\rho_l V^3}{2} \quad (10)$$

where n_2 is coefficient, which has the order of 1.

If this power representing an excess of power which needs to be absorbed for the purpose of stabilizing of the yarn movement, which is being reeled off, can be related to power spent on overcoming air resistance force, then air resistance becomes significant and it stabilizes yarn movement.

Setting equal this excess of power needed to be absorbed by air resistance and air resistance power, we obtain the equation

$$n_2 \rho_l = 1.13 \rho_a n_1^3 l c_l \sqrt{\frac{\rho_l}{\rho}} \quad (11)$$

This equation has the interpretation as follows. For any yarn linear density ρ_l there is a balloon length $l_a(\rho_l)$ that air resistance stabilizes yarn movement by absorbing excess of energy applied to a yarn of such length in a process of its reeling off. According to equation (12) at air volume density $\rho_l = 1.2$ kg/m³ and values of c_l , n_1 and n_2 as it was said above we receive this approximate dependence

$$l_a \approx 18.7 \sqrt{\rho_l} \quad (12)$$

This formula gives the value l_a equal 0.19 m and 0.32 m for yarn of linear densities 1×10^{-4} kg/m and 3×10^{-4} kg/m (100 tex and 300 tex) respectively. These estimations show that it just becomes difficult to stabilize yarn movement during its reeling off using air resistance at technically usual dimensions of yarn ballooning part for yarn linear densities more than 300 tex because a balloon needs to increase in dimensions for absorbing excess of energy described above.

8. The account of sliding friction

Taking into account friction forces acting on a yarn from sides of a yarn guide surface and a balloon limiter surface is more complicated. Such consideration leads to equations

$$Fdt - \rho_l V^2 k dt - \rho_l V^2 k_1 k_f \cos \alpha dt = \rho_l V dt V \quad (13)$$

$$F_E V dt = \rho_l V dt V^2 / 2 dQ \quad (14)$$

following after applications of the laws of modification of momentum and conservation of energy. Here $\rho_l V^2 k_1$ is a summary force of normal pressure on surfaces skirted by a yarn on a balloon limiter, $k_1 < 1$; k_f is an effective coefficient of sliding friction; $\cos \alpha$ is a mean value of cosine of an angle between friction force and axis O_x ; dQ increase in thermal energy in a yarn, balloon limiter and yarn guide owing to friction:

$$dQ = \rho_l V^2 k_1 k_f k_2 V dt V \quad (15)$$

Coefficient k_2 characterizes a speed of a yarn slippage with respect to a balloon limiter surface, $k_2 \approx 1$. Hence, the forces that follow from momentum and energy considerations are

$$F = \rho_l V^2 (1 + k + k_1 k_f \cos \alpha) \quad (16)$$

$$F_E = \rho_l V^2 (1 + 2k_1 k_2 k_f) / 2 \quad (17)$$

Thus, if we would hope to get equal forces F and F_E we would have to suppose that

$$1 + k + k_1 k_f \cos \alpha = 0.5 + k_1 k_2 k_f \quad (18)$$

or

$$k_f (k_1 k_2 - k_1 \cos \alpha) = 0.5 + k \quad (19)$$

as $k \leq 1$, $k_1 \leq 1$, $k_2 \approx 1$, then we receive

$$k_1 k_2 - k_1 \cos \alpha \leq 1, \quad 0.5 + k \approx 1 \quad (20)$$

It follows from (19) and (20) that a similar results for forces F and F_E can be obtained when effective friction coefficient k_f of a yarn on balloon limiter surface and yarn guide is near 1. Thus, when friction coefficient $k_f \approx 0.20, \dots, 0.25$, what is usually for a case of a polished balloon limiter and typical yarn guide, an assumption on a smooth stationary movement of a yarn leads to a difference of the results given by formulas (16) and (17) what says that a stationary movement is impossible.

The only way to avoid this contradiction is to conclude that a yarn motion even in such simple conditions is jerky and vibrating though speed V of a loose end is maintained constant. Large coefficients of friction and increased energy dissipation can lead to a stable nature of reeling a yarn off.

A yarn movement can be unstable after a yarn going outside of a balloon limiter through a yarn guide, Fig. 3. To stabilize

a yarn movement after a yarn guide passing it is recommended to install thin tender plates along a yarn pathway. A yarn will pass between these plates and dissipate an excess of its energy. To dissipate this excess of energy a friction force between tender plates must have the order of a quantity $F_{fr} = \rho_l V \Delta V$ where ΔV is the order of an expected velocity jerk.

9. Conclusions

In the case of a stationary reeling off of a yarn of a medium linear density from a smooth cylinder by a loose end moving at a constant speed and maintaining other permanent conditions a yarn vibrates and moves by jerks if energy dissipation factors are small.

Air resistance is able to stabilize yarn movement if a length of a yarn in its ballooning part is sufficiently long. However it leads to practically not acceptable size of a yarn balloon for linear yarn densities more than 300 tex.

To stabilize the nature of reeling off of a yarn it is advisable to increase coefficients of friction in order to dissipate excess of kinetic energy acquired when a yarn is reeling off.

Other way to stabilize a yarn movement after a yarn guide passing may consist in installation of thin plates along a yarn pathway. These plates would create a small friction force to quiet down yarn jerks.

Although the details of the consideration are provided for weaving machines the proposed approaches are valid for different applications of string and hawser mechanics.

10. References

- [1] Adanur, S. Handbook of Weaving. CRC Press, 2001.
- [2] Oleinikova, L.N. and Oleinikov, V.V., "Motion of Thread with a Jerk: Theory and Experiment". *JOTI The Journal of the Textile Institute*, vol. 96, no. 6, pp. 381-388, 2005.
- [3] Bogza, A.D. and Ornatskaya, V.A., *Investigation of Reliability of Process of Lining of Weft String on Weaver's Machine Tools*, Legkaya industriya, Moscow, 1978.
- [4] Lunenschlob, J. and Schlichter, S., "Die Fadenbelastung in Kette und Schub in Abhängigkeit von der Schubeintragsfrequenz und anderen Webmaschinenparametern", *J. Melliland Textilber*, no. 2, pp. 93-98, 1987.
- [5] Lawrence, C.A., *Fundamentals of Span Yarn Technology*. CRC Press, 2003.
- [6] Minakov, A.P., "Principles of Thread Mechanics". *Research of the Moscow Textile Institute*, vol. 9, pp. 5-88, 1941.

[7] Migushov, I.I. *Mechanics of Textile String*, Legkaya industriya, Moscow, 1980.

[8] Schlichting, H. *The Theory of a Boundary Layer*, Nauka, Moscow, 1974.

Científica

indizada en

Latindex

Sistema Regional de Información en Línea
para Revistas Científicas de América Latina,
el Caribe, España y Portugal.
www.latindex.org

Periódica

Índice de Revistas Latinoamericanas en Ciencias.
http://132.248.9.1:8991/F/-/?func=find-b-0&local_base=PER01

Redalyc

Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe,
España y Portugal.
Sistema de Información Científica Redalyc.
www.redalyc.uaemex.mx

Instituto Politécnico Nacional

Científica

La Revista Mexicana
de Ingeniería Electromecánica

Promedio de descargas mensuales de artículos en 2010:

5 049

168 artículos descargados por día en 2010

más del 67% de éstos
(índice de internacionalización)
se descargan en el extranjero

**112 artículos diarios se descargaron
fuera de México en 2010**

Fuente: Sistema de Información Científica Redalyc
<http://redalyc.uaemex.mx/>

Indicaciones para los colaboradores que deseen publicar en la revista Científica

La revista *Científica* es una publicación trimestral editada por la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME) del Instituto Politécnico Nacional (IPN) de México, que presenta trabajos de investigación y propuestas originales e inéditas de la Ingeniería Eléctrica, Mecánica, en Sistemas, Electrónica, en Telecomunicaciones, además de la Educación en Ingeniería.

Los manuscritos pueden estar escritos en español o en inglés y se reciben en formato electrónico con una copia adjunta del archivo digital del trabajo, por medio del correo electrónico revistacientifipn@yahoo.com.mx con atención al Comité Editorial (Tel. (+52) 55 5729 6000 ext. 54518; Edificio 5, 1^{er} Piso, oficina de la revista *Científica*; Sección de Estudios de Posgrado e Investigación (SEPI) de la ESIME Zacatenco, Col. Lindavista, Unidad Profesional Adolfo López Mateos, CP 07738, México, DF, México).

Los trabajos recibidos son revisados por el Comité Editorial quienes designan a un Editor Asociado (éste desconoce la autoría y procedencia de los manuscritos) de acuerdo a la disciplina que cubren los artículos. El Editor Asociado selecciona dos árbitros para que evalúen el escrito (pares ciegos), él mismo recibe las observaciones de éstos e informa al Comité sobre los resultados de la revisión. Los trabajos pueden ser aceptados para su publicación, aceptados si se realizan modificaciones necesarias o rechazados. La aceptación está sujeta a la aprobación, en todos los casos, de dos revisores; cuando no hay consenso entre los dos primeros revisores el Editor Asociado resuelve el dictamen. Los trabajos deben ser investigaciones o propuestas originales inéditas, sin excepción, sobre las áreas mencionadas y no pueden estar sujetas a revisión en ninguna otra publicación de forma simultánea; además, el resultado del proceso de arbitraje es inapelable y se sujeta, estrictamente, a las políticas dictadas por el Comité Editorial en funciones. Una vez aceptado un artículo, el autor o autores transfieren los derechos de publicación a la institución editora que está representada por el Editor en Jefe de la revista.

Estructura de los artículos

Los manuscritos se deben ajustar a los lineamientos editoriales expuestos en este apartado; la mayoría de los parámetros expuestos corresponden a las indicaciones para publicaciones científicas del *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE), considerado el organismo científico y editorial con mayor prestigio en el ámbito de la ingeniería. El manual está disponible en la página <http://standards.ieee.org/guides/style/>.

Dentro del artículo la numeración comienza a partir del 'Resumen' o el 'Abstract', según sea el caso. Ésta continúa de acuerdo a los siguientes elementos: 1. Resumen (con palabras clave en español), 2. Abstract (con palabras clave en inglés, *keywords*), 3. Introducción, 4. Desarrollo, 5. Conclusiones y 6. Referencias.

Título

El título debe ser lo más corto posible (sin utilizar abreviaciones de preferencia) y no exceder de tres líneas.

Datos del autor

Éstos muestran el o los nombres completos de los autores (los apellidos unidos por un guión), la dirección postal de la institución a la cual pertenecen, país, el teléfono (con la clave internacional de su país), fax y correo electrónico. En el caso de dos autores o más (de diversas instituciones), se deben mencionar los datos anteriores completos de cada uno.

Resumen

Debe contener 200 palabras como máximo. Consiste en una pequeña descripción de la investigación y una breve información de los resultados del trabajo que permite a los lectores identificar con rapidez los aspectos fundamentales del artículo y discernir la relevancia de éste.

Abstract

Se incluye un resumen en inglés.

Palabras clave y *keywords*

Se deben incluir de tres a cinco descriptores del trabajo con, al menos, tres de ellas pertenecientes al tesoro del IEEE, éste se puede obtener enviando un correo electrónico en blanco a keywords@ieee.org y de manera automática se recibe la lista *official keyword list from IEEE*.

Introducción

Expresa los antecedentes, límites, alcances y relevancia del problema. Plantea las premisas del mismo, y expresa el objetivo del trabajo. Se sugiere no extenderla como si fuera una exposición analítica.

Desarrollo

Se refiere al desarrollo del tema que puede ser teórico, experimental, teórico-experimental o la descripción de un nuevo diseño.

Conclusiones

Se establece la respuesta global del problema, son los objetivos alcanzados, las hipótesis comprobadas, modificadas o rechazadas.

Referencias

Es la lista de fuentes bibliográficas: libros, artículos, manuales, memorias, etcétera. Deben aparecer en el orden en el cual se mencionan dentro del artículo, señalándose con el número entre corchetes, con las siguientes especificaciones:

Artículo de revista científica:

- [1] Autor, "nombre del artículo", *Revista*, volumen, número, páginas, mes(es), año.

Ejemplo:

- [1] Boggs, S. A., y Fujimoto, N., "Techniques and instrumentation for measurement of transients in gas-insulated switchgear", *IEEE Transactions on Electrical Installation*, vol. 19, núm. 2, pp. 87-92, abril, 2004.

Artículo de revista científica electrónica:

- [2] Autor, "nombre del artículo", *Revista*, volumen, número, páginas, mes(es), año, disponible en: 'dirección en Internet'

Ejemplo:

- [2] Posada-Duque, J. A. y Cardona-Alzate, C. A. "Análisis de la refinación de glicerina obtenida como coproducto en la producción de biodiesel". *Ing. Univ. Bogotá*, vol. 14, núm. 1, pp. 9-27, enero-junio, 2010, disponible en <http://www.javeriana.edu.co/Facultades/ingenieria/revista/Iy UVol14N1/Biodiesel.pdf>

Tesis:

- [4] Autor, "título de la tesis", grado obtenido, disciplina, institución, ciudad de la institución, país, año.

Ejemplo:

- [4] Kawasaki, N., "Parametric study of thermal and chemical nonequilibrium nozzle flow", tesis de maestría, Ingeniería Electrónica, Universidad de Osaka, Osaka, Japón, 1993.

Libro:

- [3] Autor, *título*, número de edición, lugar de edición (ciudad): editorial, año.

Ejemplo:

- [3] Kays, W.M., y Crawford, M.E., *Convection Heat and Mass Transfer*, 2a ed., New York: McGraw-Hill, 1993.

Anexos

Los agradecimientos, simbología, notación y otros anexos, se consideran dentro del cuerpo del artículo y se dejan a consideración del autor. Se debe indicar si el trabajo ha sido previamente presentado en alguna institución científica o realizado con la ayuda de una subvención o fondo especial.

Consideraciones técnicas sobre el archivo electrónico

Para obtener la mejor calidad al realizar la edición de los manuscritos en el formato de la revista, se recomienda que:

- El trabajo se capture en un procesador de textos (word) con páginas en tamaño 'carta';
- El tipo de letra del texto sea 'Times' de 10 puntos, en una página con márgenes superior e inferior de 3 cm, márgenes izquierdo y derecho de 2.5 cm a dos columnas con espaciado de 1 cm entre ellas, interlineado sencillo y espacio entre párrafos sin sangría (párrafo moderno);
- Las ecuaciones y fórmulas numeradas para mayor claridad, acrónimos y abreviaciones deben definirse la primera vez que sean usados en el texto,
- Los pies de las figuras deben estar debajo de éstas con la indicación 'Fig. 1'; además, el título de los ejes de las figuras a menudo es causa de confusión, por lo que se sugiere usar palabras en lugar de símbolos. Los encabezados de las tablas deben estar arriba de éstas. Se recomienda el uso de símbolos (SI) en lugar de abreviaturas.
- Las figuras y tablas en el documento deben aparecer en el cuerpo del manuscrito y, además, entregarse en archivos por separado (.tif, .jpeg), es importante que al pasar cualquier imagen por un escáner debe hacerlo con una resolución de 300 ppp (puntos por pulgada). Se debe evitar el uso de colores en las figuras que señalen detalles o diferencias.

Científica considera que el material utilizado por los autores para su publicación está debidamente autorizado para tal propósito y le corresponde a los autores, no a *Científica*, obtener los permisos correspondientes para dicho material. La revista *Científica* se reserva el derecho de hacer modificaciones editoriales para el diseño de los manuscritos en el formato vigente. Cualquier duda o comentario se puede enviar a edicion.tecnica.cjp@gmail.com De antemano gracias.

Científica ISSN 1665-0654

Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica,
Instituto Politécnico Nacional, México.

Edificio 5, 1^{er} Piso, Oficina de la revista *Científica*,

Col. Lindavista, Unidad Profesional Adolfo López Mateos, CP 07738, México, DF, MÉXICO.

Tel. (+52) 55 5729 6000 ext. 54518,

www.cientifica.esimez.ipn.mx revistacientifipn@yahoo.com.mx

Information for Authors Submitting Papers to Científica Journal

Científica is a quarterly Journal sponsored by the Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME) of Instituto Politécnico Nacional Mexico, it publishes theoretical and experimental research on Electromechanical and Electronics Engineering, Computer Engineering, Telecommunications, and also Education in Engineering.

Manuscripts could be written in English and sent by email to revistacientifpn@yahoo.com.mx addressed to the Editorial Board (Tel. (+52) 55 5729 6000 ext. 54518; Sección de Estudios de Posgrado e Investigación (SEPI), ESIME Zacatenco, Col. Lindavista, Unidad Profesional Adolfo López Mateos, CP 07738, México, DF, MÉXICO).

Papers are reviewed by the Editorial Board and sent to an Associate Editor (AE doesn't know authors and their affiliations), he chooses two referees (blind peer review) selected for their expertise in a given field and reports to the Editorial Board the results. Authors should only submit original work that has neither appeared elsewhere for publication, nor which is under review for another refereed journal. Author accepts sending his/her paper the Editorial Board Policies. Once a manuscript has received the final approval of the reviewers and Editor-in-Chief, the author will be notified and sent a copyright form, in any event, authors must transfer copyright to *Científica*.

Manuscripts

The manuscript must be prepared in a Word format with all its section numbered starting with an abstract, as shown below:

1. Abstract
2. Resumen (Spanish abstract)
3. Introduction
4. Body of the manuscript
5. Conclusions
6. Reference list

Title

Must be concise and no longer than 3 lines using capital and lower case letters.

Authors' Name and Affiliations

The authors' name must be written below the title using a one column format starting with the given name followed

by one or two family names, if two family names applies, they should be joined by a hyphen. Below the authors names must be written the affiliation including the address quality, fax, telephone number and email.

Abstract

The abstract with about 200 words must give a brief description about the research including some comments about the experimental or simulation results and conclusion.

Resumen (Spanish abstract)

It is desirable that, if it is possible, a Spanish abstract be provided.

Key words (*palabras clave*)

All papers must contain index terms as provided by the authors. A list of keywords is available by sending a blank email to keywords@ieee.org. They must be incorporated in Spanish too.

Body of the Manuscript

The body of the manuscript must include an introduction in which the relevance of the research must be explained. A review of related research works by either, the same or another authors must be included. The body of the manuscript also must include the theoretical aspects of the research, as well as experimental or simulation results if any, together with a Conclusions Section.

Reference list

A numbered list of references must be provided at the end of the paper. The list should be arranged in the order of citation in text, not in alphabetical order. List only one reference per reference number. It is not necessary to mention the authors of a reference unless such mention is relevant to the text.

Sample correct formats for various types of references are as follows.

Periodicals:

- [1] Author, "Paper", *Journal*, volume, number, pages, month(s), year.

Example:

- [1] Boggs, S. A., & Fujimoto, N., "Techniques and instrumentation for measurement of transients in gas-insulated switchgear", *IEEE Transactions on Electrical Installation*, vol. 19, no. 2, pp. 87-92, April, 2004.

Periodicals on line:

- [2] Author, "Paper", *Journal*, volume, number, pages, month(s), year, available: 'URL'

Example:

- [2] Posada-Duque, J. A., & Cardona-Alzate, C. A. "Análisis de la refinación de glicerina obtenida como coproducto en la producción de biodiesel". *Ing. Univ. Bogotá*, vol. 14, no. 1, pp. 9-27, January-June, 2010, available: <http://www.javeriana.edu.co/Facultades/ingenieria/revista/IyUVol14N1/Biodiesel.pdf>

Thesis:

- [4] Author, "Thesis", degree, area, institution, city, country, year.

Example:

- [4] Kawasaki, N., "Parametric study of thermal and chemical nonequilibrium nozzle flow", Master Degree, Electronic Engineering, University of Osaka, Osaka, Japan, 1993.

Books:

- [3] Author, *Title*, edition, city: editorial, year, pages (if any).

Example:

- [3] Kays, W.M. & Crawford, M.E., *Convection Heat and Mass Transfer*, 2nd ed., New York: McGraw-Hill, 1993.

Preparation for publication

The following is a list of general guidelines for the submission of electronic media by prospective authors:

- a) The operating system and word processing software used to produce your document should be noted on your

e-mail (postscript and Adobe Acrobat PDF files are not acceptable because the files cannot be edited);

b) Text in 'Times New Roman' at 10, margins of page in 3 cm, two-column text, single spacing without paragraph indent;

c) Check that your files are complete. Include: abstract, index terms, text, references and figure captions;

d) Figures comments must be below them and tables comments above. It desirable use of the International Systems of Units not abbreviations;

e) In order to achieve the highest quality of reproduction, resolutions of 600 dpi (1 bit/sample) at final printed size for line art (graphs, charts or drawing) and 300 dpi (8 bits/sample) at final printed size for photographs and other grayscale images are required;

Científica assumes that material submitted to its publication is properly available for general dissemination for the readership of this publication. It is the responsibility of the authors, not *Científica*, to determine whether disclosure of their material requires the prior consent of other parties and, if so, to obtain that consent. If an author uses charts, photographs, or other graphics from previously printed material, he/she is responsible for obtaining written permission from the publisher to use the material in his/her manuscript.

These indications are based on style standards of IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), available in <http://standards.ieee.org/guides/style/> which is the most prestigious organization in Engineering field.

Científica does not provide drafting or art services. Thus, the better the quality of the material submitted, the better the published result. Try to adhere to the accepted style as much as possible. Of particular importance here is the reference list. Questions about preparation for publication can be sent to edicion.tecnica.cjp@gmail.com.

Científica ISSN 1665-0654

Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica,
Instituto Politécnico Nacional, México.

Edificio 5, 1^{er} Piso, Oficina de la revista Científica,
Col. Lindavista, Unidad Profesional Adolfo López Mateos,
CP 07738, México, DF, México.
Tel. (+52) 55 5729 6000 ext. 54518.

www.cientifica.esimez.ipn.mx
revistacientifipn@yahoo.com.mx

75 Años

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
1936-2011

XXXIX Aniversario FIL Feria Internacional del Libro POLITÉCNICA



Ciudad de México
12 al 21 de agosto 2011

Av. Wilfrido Massieu s/n esq. Luis Enrique Erro
Unidad Profesional "Adolfo López Mateos", Zacatenco
Unidad Politécnica para el Desarrollo y la Competitividad Empresarial (UPDCE)
Centro de Formación e Innovación Educativa (CFIE)

"La Técnica al Servicio de la Patria"

