

# Reseña de los proyectos de investigación realizados en el Departamento de Ingeniería Mecánica de la SEPI-ESIME

G. Villa y Rabasa<sup>1</sup>

J. M. Sandoval Pineda<sup>2</sup>

A. Campos Vázquez<sup>3</sup>

A. Escamilla Navarro<sup>3</sup>

A. Luna Avilés<sup>1</sup>

J. C. de J. Balanzá Chavarría<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Instituto Politécnico Nacional. ESIME-SEPI.  
Unidad Profesional "Adolfo López Mateos" Edificio 5, 3º Piso,  
Colonia Lindavista. Gustavo A. Madero. 07738, México DF.

<sup>2</sup> Instituto Politécnico Nacional. ESIME-IPN.  
Unidad Profesional "Azcapotzalco" Av. de las Granjas 682,  
Col. Sta. Catarina 02550, México, DF.

<sup>3</sup> Instituto Politécnico Nacional. UPIITA.  
Av. Instituto Politécnico Nacional 2580. Col. La Laguna  
Ticomán. Gustavo A. Madero. 07340 México, DF, México.

<sup>4</sup> Instituto Tecnológico Superior de Poza Rica. Calle Luis  
Donald Colosio S/N. Col. Ejido Arroyo del Maíz. Poza Rica  
de Hidalgo. Ver.  
MÉXICO

Recibido el 13 de noviembre de 2006; aceptado el 7 de marzo de 2007.

## 1. Resumen

En este trabajo se resumen diversos trabajos de investigación que se han realizado en el Departamento de Ingeniería Mecánica de la SEPI-ESIME del Instituto Politécnico Nacional durante los últimos quince años, mencionando algunos de los resultados relevantes. Éstos se han desarrollado por el personal de dicho departamento, tanto dentro como fuera del IPN en las áreas de Mecánica de Fractura, Contacto Elástico y Esfuerzos Residuales, Biomecánica, Estructuras para Transportes, Tribología, Análisis Numérico, Ahorro de Energía Térmica, Conducción de Flujos Bifásicos, Robótica y Cinética de Difusión del Boro en Recubrimientos Superficiales.

## 2. Abstract

In this paper, the research work done in the Mechanical Engineering Department of the Postgraduate Studies and Research Section of the Higher School of Mechanical and Electrical Engineering of the

National Polytechnic Institute is reported. All this research has taken place during the last fifteen years and has been performed by the personnel of the department mentioned above. The areas, which have been involved, are the following: Fracture Mechanics, Elastic Contact and Residual Stresses, Biomechanics, Transport Structures, Tribology, Numerical Analysis, Thermal Energy Saving, Two Phase Flow Conduction, Robotics and Kinetic Diffusion of Boron in Coated Surfaces.

## 3. Introducción

En el diario quehacer de la investigación, el trabajo experimental juega un papel relevante. Esto es debido a que permite hacer un análisis de cómo es el comportamiento real de los fenómenos estudiados. Su alcance está determinado por el número de parámetros involucrados en la investigación, así como el grado de detalle con el que se realiza el análisis. Esta situación no escapa en los análisis que se realizan en problemas mecánicos, en los que las evaluaciones experimentales se complementan con los análisis numéricos. En primera instancia, los modelos numéricos son validados con resultados experimentales. Una vez hecho lo anterior, es posible evaluar diversos escenarios numéricamente y seleccionar aquellos que tienen un alto grado de interés para después analizarlos experimentalmente, con el mayor grado de detalle posible. Esto reduce costos.

Por otra parte, no deben perderse de vista los notables avances que se han logrado en el área de cómputo, esto ha permitido el desarrollo de diversos métodos numéricos que simplifican estos análisis. Lo anterior es debido a que día a día, se desarrollan equipos más poderosos. Esto ha tenido un gran impacto en la generación de conocimiento.

En relación con la investigación en ingeniería mecánica, ésta es interdisciplinaria, de ahí que los análisis numéricos y experimentales jueguen un papel protagónico y se empleen los desarrollos antes mencionados. Esto ha implicado que en los diversos proyectos de investigación del Departamento de Ingeniería Mecánica de la SEPI-ESIME se utilice este enfoque. Éstos se han usado en las áreas de Mecánica de Fractura, Contacto Elástico y Esfuerzos Residuales, Biomecánica, Estructuras para Transportes, Tribología, Análisis Numérico, Ahorro de Energía Térmica, Conducción de Flujos Bifásicos, Robótica y Cinética de Difusión del Boro en Recubrimientos Superficiales. Bajo este contexto, el objeto del presente trabajo es resumir los principales logros en las diversas líneas de investigación, mencionadas anteriormente, en los últimos quince años.

## 4. Mecánica de fractura

### 4.1 Dinámica de fractura

Las cargas dinámicas en los problemas de fractura, los hace interesantes, ya que a medida que aumenta la velocidad de aplicación de la carga, el material se torna más frágil. En este contexto se requiere una menor cantidad de energía para iniciar y propagar una grieta. En [1,2] se reportan pruebas en donde una onda de explosión impacta perpendicularmente en el plano principal de una placa agrietada centralmente hecha de polimetil-metacrilato (PMMA). Este material es sensible a la velocidad de aplicación de la carga. Para este efecto, una cámara presurizada es sellada en su extremo superior con una hoja de acetato. Al romperse, se genera una explosión. Dado que la cámara está conectada en el extremo de un tubo guía, la onda expansiva se dirige hacia la placa agrietada. La longitud de este tubo es tal que cuando la onda llega a la placa, su frente plano, con lo cual carga a toda la placa simultáneamente, provocando el crecimiento de la grieta. Los resultados mostraron que a medida que la velocidad de la carga aumenta, el factor de intensidad de esfuerzos crítico disminuye.

Un aspecto importante es determinar el grado de fragilidad que adquiere el material al aumentar la velocidad de carga. Esto se puede establecer cuantitativamente mediante la determinación del valor del módulo de elasticidad a diferentes valores de rapidez de variación de la deformación unitaria (*strain rate*). Esto se hizo con pruebas de tensión, en donde se varía la velocidad de aplicación de la carga. Un análisis detallado de esta situación, con probetas de PMMA, se muestra en [3].

Con el montaje de [1,2] y la información acumulada, se procedió a evaluar la velocidad de propagación de las grietas [4]. Para este efecto se pegaron galgas extensométricas resistivas a lo largo de la trayectoria de propagación. En función de las señales registradas por el sistema de adquisición de datos, se estableció dicha velocidad.

En una fase posterior se evaluó la dirección de propagación de una grieta, cuando ésta es sometida a un estado de cargas biaxial dinámico [5,6]. Para este efecto se ensayaron placas rectangulares de PMMA, con grietas inclinadas con respecto a la horizontal. Éstas se probaron en una máquina universal variando la velocidad de carga. Mediante un análisis numérico-experimental se determinó el ángulo de inicio de propagación de la grieta. Para este efecto, se siguieron tres métodos de análisis: (1) esfuerzo circunferencial máximo, (2) criterio de la energía y (3) mediante el factor  $S$  de la densidad de energía de deformación unitaria. Si bien es cierto que con los dos primeros procedimientos se puede obtener, con una exactitud razonable, el ángulo de inicio de propagación, las evidencias experimentales indican que la evaluación con el factor  $S$ , se logra una mejor exactitud. Otro aspecto importante, mostrado en este trabajo, es que en el análisis numérico experimental es posible integrar la variación de las propiedades mecánicas del material, bajo carga dinámica, en los cálculos realizados. El análisis de propagación de ondas de esfuerzos en medios semiinfinitos utilizando el método de elemento frontera, se reporta en [7]. En este caso, una fuerza dinámica se aplicó en la frontera superior. Las ondas elásticas se propagaron al interior del cuerpo, las cuales interactuaron con una grieta interna. Se obtuvo el campo de esfuerzos transitorio, así como la respuesta elástica en diversos puntos en la superficie externa.

### 4.2 Estabilidad de la propagación de grietas en campos biaxiales de esfuerzos

En este terreno se estudió la relación entre la estabilidad de propagación de una grieta que está sometida a un estado de carga biaxial y el segundo coeficiente de la función de esfuerzos de la serie de Williams [8,9]. El análisis numérico se realizó con el método del elemento frontera, el cual se planteó energéticamente. Ésta es la base teórica del programa ANGCRK, que se empleó para este efecto. En la fase experimental se ensayaron probetas de PMMA con grietas perpendiculares a uno de sus bordes (*Single Edge*). Para este efecto, se variaron los puntos de aplicación de la carga, así como la geometría de la carga.

La técnica experimental seguida se explica en [10,11]. Se describe el montaje experimental empleado, así como el proceso de calibración seguido. El proceso de propagación fue estudiado en detalle, así como la influencia del modo II de carga. Los resultados numéricos y experimentales mostraron una buena convergencia. Las conclusiones establecen que cuando el segundo término de la serie de Williams es negativo, la estabilidad en la propagación de una grieta se mantiene. En caso contrario, la dirección del crecimiento de la grieta puede ser inestable.

### 4.3 Interacción de campos de esfuerzos de grietas

Desde el punto de vista estático y con la técnica de fotoelasticidad, se evaluaron factores de intensidad de esfuerzos [12] y se estudió, desde un punto de vista numérico y experimental, la interacción del campo de esfuerzos en [13]. Esto se realizó para el caso en que las grietas son colineales y escalonadas, evaluando la influencia de la separación de dichas grietas.

En el terreno dinámico, se analiza la interacción de ondas elásticas que se propagan en placas agrietadas [14]. Para este efecto, se estudia el problema de Chen, el cual consiste en determinar el comportamiento dinámico del factor de intensidad de esfuerzos (FIS) de una placa centralmente agrietada, a la cual se le aplica una carga tipo escalón en uno de sus extremos. Se considera que el material es elástico. El fenómeno transitorio es debido a que las superficies de la grieta y los bordes de la placa reflejan las ondas. Esto hace que el FIS alcance un valor máximo y luego retorne a cero, lo que indica que la grieta se abre y se cierra.

Continuando en la línea de mecánica de la fractura, y con vinculación con la Comisión de Seguridad Nuclear y Salvaguardias. Urriolagoitia-Calderón *et al.* [15] desarrollaron una metodología numérica para obtener la vida remanente de una probeta "tipo C" sometida a carga de fatiga. Los resultados obtenidos por medios numéricos son comparados con los teóricos y muestran una buena convergencia en la determinación del rango de vida remanente de la probeta.

### 4.4 Mecánica de fractura probabilística

Se desarrollaron procedimientos de mecánica de la fractura probabilística aplicados a reactores nucleares en el fenómeno de endurecimiento por radiación, así como para oleogasoductos en casos elastoplásticos. En primera instancia se realizó la evaluación probabilística de mecánica de la fractura de una vasija nuclear tipo BWR, como parte del desarrollo del programa de Inspección Informada en el Servicio, la cual adoptó la planta nuclear "Laguna Verde"

en el 2001. En cuanto a ductos, el procedimiento se fundamenta en el análisis de riesgo y puede usarse para inspecciones más eficientes, mejores reparaciones y programas de mantenimiento [109].

## 5. Contacto elástico y esfuerzos residuales

Urriolagoitia-Sosa, *et al.*, inician el desarrollo de una serie de trabajos de investigación analítico referente al fenómeno de contacto mecánico elástico enfocado al diseño de una flecha o vástago empotrado y sujeto a diversas cargas. El primer trabajo reportado [16] es el referente a una flecha o vástago empotrado bajo la acción de cargas de flexión y cortante. En este estudio se ha considerado un análisis plano y condiciones elásticas de simetría del medio plano. A la flecha se le aplica un esfuerzo de flexión como aquella que se aplicaría para sacarla de su empotramiento y se analizan las condiciones de separación y deslizamiento a lo largo de la interfase de penetración en el agujero. Este tipo de estudio permite establecer diagramas para eliminar separación entre la pared del agujero y la flecha, así como evitar el deslizamiento interfacial entre los componentes y prescindir el frotamiento. Posteriormente, y como continuación, se presenta la solución analítica [17] para el mismo problema, pero cambiando las condiciones de carga. En este caso se revisan los efectos que tendrían la carga de flexión, con su respectiva descarga, recarga y caída de fricción en los diagramas, para eliminar separación entre la pared del agujero y la flecha, así como, evitar el deslizamiento interfacial entre los componentes para el diseño de éstos.

Además de lo anterior, Hills y Urriolagoitia-Sosa [18-19] presentaron estudios relacionados con la mecánica de contacto elástico, y muy en especial a cuestiones de fatiga por frotamiento. En [18] se establecen las soluciones conocidas, en ese tiempo, para los problemas de contacto, sus orígenes y como se presenta el deslizamiento parcial. El objetivo era el proveer al investigador con una colección de diferentes tipos de soluciones para el diseño en contra del frotamiento y la fatiga por frotamiento. Mientras que en [19] se establecen las variables externas que controlan a las pruebas de fatiga por frotamiento de contacto hertziano, donde se demuestra que las tracciones superficiales están en relación directa con la fuerza cortante, mientras que el desplazamiento superficial depende del contacto normal producido por la presión. Este tipo de conclusiones ayuda a una mejor interpretación de los resultados experimentales en pruebas de fatiga por frotamiento.

Sin embargo, el diseño de elementos y componentes mecánicos no sería posible sin la caracterización del material con el cual va a ser fabricado. En este tema, Urriolagoitia-Sosa *et al.* entre 2003 y 2006, presentaron un nuevo e ingenioso método [20-22] para caracterizar a un material y cuantificar la inducción de esfuerzos residuales por medio de las deformaciones obtenidas de una prueba de flexión. El método se fundamenta en la teoría de flexión pura y utilizando una mínima cantidad de datos que se obtienen de la prueba de flexión de cuatro puntos. El nuevo método desarrollado fue evaluado por medio del MEF (ANSYS y ABAQUS) y experimentalmente, además de que se consideraron diversas reglas de endurecimiento en el material (anisotropía) y el efecto Bauschinger. Este estudio demuestra la utilidad que tiene la prueba de flexión para la caracterización de los materiales, siendo mucho más económico y sencillo de realizar que una prueba axial de tensión.

Posteriormente, y también dentro de la investigación sobre flexión, se realizó un estudio que tenía como objetivo la medición de la recupera-

ción elástica (*springback*) [23]. Para esta investigación se desarrolló una metodología por medio del MEF para determinar y evaluar la cantidad de recuperación elástica de una viga sometida a cuatro puntos de flexión, donde el material se consideró en primera instancia como isotrópico y perfectamente plástico, para después variar esta situación a diferentes condiciones de anisotropía y efecto Bauschinger. Por último, la metodología numérica propuesta fue corroborada por medios experimentales y se obtuvieron resultados similares en todos los casos entre ambas técnicas.

Recientemente, Urriolagoitia-Sosa *et al.* [24] utilizaron el método de respuesta de grieta (*Crack Compliance Method*) para determinar y evaluar la inducción de esfuerzos residuales en vigas con historia previa. Es importante mencionar que dentro del diseño de elementos mecánicos, la evaluación de los esfuerzos remanentes después de un proceso de manufactura es muy importante, ya que es importante determinar con un alto grado de exactitud la vida útil de un componente. Claro, siempre y cuando se considere que el material no está en su estado óptimo (isotrópico, continuo, lineal y homogéneo), sino en condiciones reales de anisotropía y esfuerzos que tienen después de cualquier proceso de manufactura.

## 6. Biomecánica

### 6.1 Fémur

El primer caso tratado por el grupo de Análisis de Esfuerzos de la SEPI-ESIME, fue la determinación del campo de esfuerzos en un fémur humano intacto en su parte proximal. Para este efecto, se realizó un análisis numérico con el MEF mediante un modelo tridimensional [25]. Esto se profundizó en [26], en donde se evaluó el efecto combinado de las cargas de compresión y flexión. Este estudio se realizó bajo un enfoque numérico y experimental, encontrándose convergencia en los resultados obtenidos. Asimismo, se analizó el caso cuando el tercio superior del fémur es remplazado por una prótesis no convencional. Ésta es unida por medio de dos tornillos al hueso con el vástago insertado en el canal medular. Los objetivos fueron evaluar los campos de esfuerzos resultantes y establecer la rigidez resultante del sistema hueso prótesis resultante, variando la localización de los tornillos [27].

Posteriormente se evaluó el comportamiento mecánico de una prótesis tipo Charnley cuando ésta es cementada en la parte proximal del fémur [28]. Esto se complementó con una evaluación del efecto del espesor de capa cementada en el sistema hueso prótesis [29]. Estos estudios se hicieron con el MEF.

### 6.2 Distractores

Damián *et al.* [30] describen el desarrollo de un distractor externo para artrodiastasis de la rodilla. Este dispositivo consiste de una barra distractora y dos soportes para tornillo de Schanz de 6 mm de diámetro; respecto a la barra, los dos tornillos tienen rotación y angulación ( $\pm 25^\circ$ ) y desplazamiento en sólo uno. Se colocó el distractor a la rodilla izquierda de un paciente de 26 años con ambas rodillas contracturadas en flexión ( $100-110^\circ$ ) desde los dos años de edad por secuelas de poliomielitis, del lado externo, previa capsulotomía posterior; durante trece semanas se dio distracción articular consiguiéndose 20 mm y una deflexión total con tracción esquelética, aplicando carga gradualmente (9.8 a 49 N) a un tornillo transfixivo insertado en la parte distal de la tibia (paciente en decúbito dorsal). Por otra parte, en la rodilla derecha se colocó un

distractor y un tensor para dar distracción congruente (18 mm durante doce semanas) y con tracción esquelética, la extensión fue sólo hasta 120°, ya que el paciente manifestaba dolor intenso a nivel de la rodilla al aplicarle más de 29.4 N de carga en el tornillo distal transfectivo de la tibia. Hubo luxación posterior de ésta al retirar el distractor y tensor.

Siguiendo esa línea de trabajo [31], se diseñó, manufacturó y aplicó un sistema externo de distracción mecánica, para tratar ortopédicamente a un paciente de escasos recursos económicos del Instituto Nacional de Ortopedia (INO) con ambas rodillas contracturadas más de 90° por secuelas de poliomielititis. Se construyeron dos prototipos, el primero se colocó en la rodilla izquierda y la artrodiastasis de las Superficies articulares obtenida fue de 18 mm durante trece semanas; la extensión de la rodilla (de 175°) se consiguió con tracción esquelética. El segundo prototipo se colocó en la rodilla derecha y para ésta se diseñó un tensor para dar distracción congruente, que fue de 16 mm. La rodilla se extendió sólo 120° durante 12 semanas. Las dos rodillas se artrodesaron finalmente en extensión.

En [32] se estudió mecánicamente *in vitro* al fijador interno de columna INO de placas longitudinales y tornillos pediculares, bajo carga cuasi-estática de flexocompresión anterior, para determinar: su resistencia a la flexión, rigidez y flexibilidad. El modelo experimental representó una corpectomía total, utilizándose discos de plástico como cuerpos vertebrales; los tornillos pediculares se fijaron pivotantes a las placas longitudinales. Los ensayos se hicieron en una máquina *Instron* 4502, aplicando una carga con un brazo de palanca de 39 mm. Los valores medios de resistencia a la flexión, rigidez y flexibilidad obtenidos fueron de 31.184 N.m [de (desviación estándar) = 2.73], 1.205 N.m/mm (de = 0.225) y 0.852 mm/N.m (de = 0.152) respectivamente; la falla observada fue alargamiento y flexión plástica de los cuatro tornillos pediculares.

### 6.3 Columna vertebral

Beltrán y cols. [33] generan un modelo de elementos finitos de la cervical C5 y analizan el efecto de la carga de compresión para tres casos, 80, 637.5 y 6374.3 N, sobre el cuerpo vertebral, con la finalidad de conocer el comportamiento mecánico y la distribución de los esfuerzos empleando el criterio de Von Mises. Para ello el modelo se obtiene con 16 cortes tomográficos computarizados (CT) de un paciente masculino de 55 años de edad en aparente estado sano.

Por otra parte, para evaluar el efecto disco intervertebral dañado en el proceso de la carga de la columna vertebral, se ensayaron especímenes porcinos de manera experimental y numérica. Se compararon especímenes sanos con otros en donde se introdujo un daño al disco. De esta manera se determinó la distribución de carga y los esfuerzos resultantes. La parte experimental se realizó con fotoelasticidad reflectiva, mientras que la numérica se hizo con el MEF [34].

### 6.4 Regeneración ósea

Se estudió la consolidación de huesos en fracturas con espectroscopía fotoacústica [35]. Para este efecto, se obtuvo el espectro de absorción óptica del callo de fractura en una rata macho a diversos lapsos de consolidación. Se considera que un parámetro de evaluación del nivel de consolidación es la fosfata alcalina. Los picos observados de este componente se compararon con lo reportado en la literatura abierta, encontrándose resultados alentadores. Este trabajo se continuó en [36]. Se empleó

espectroscopía fotoacústica y SEM para evaluar la consolidación ósea en las condiciones antes descritas. Asimismo, se mostró que el p-Nitrofenilfosfato se puede utilizar como un indicador del proceso de reparación de una fractura.

### 6.5 Otros

Villaseñor y cols. [37] evaluaron el comportamiento mecánico del melón, tomando en cuenta sus aspectos fisiológicos. Todo esto con la finalidad de minimizar el daño mecánico en el manejo poscosecha. Para este efecto se evaluó la variación de parámetros mecánicos y fisiológicos después de someter al fruto a diversas condiciones de carga de compresión.

## 7. Estructuras para transportes

Uno de los proyectos industriales que se realizó en forma conjunta entre los departamentos de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la SEPI-ESIME fue la certificación de los trolebuses serie 9700 y 9800. Esto se hizo para el Servicio de Transportes Eléctricos del D F para determinar si se cumplía con los parámetros especificados. Para este efecto, el trolebús se dividió en los sistemas de: carrocería, mecánico, neumático, eléctrico de alta tensión, eléctrico de baja tensión y módulo inteligente de control digital. Los principales resultados obtenidos se reportan en [38].

Una de las pruebas más importantes que se realizó en este proyecto fue en la que se impactó un automóvil lateralmente a la estructura de un trolebús [39]. Con esto se determinó que los pasajeros tienen un buen nivel de seguridad en un choque a 40 km/hr. Asimismo, el comportamiento elastoplástico de la estructura muestra que no hay un comportamiento frágil. También, en este terreno, se ha realizado el análisis estático del casco de una embarcación transportadora de sal [40]. Esto se hizo con el método del elemento finito. Para este efecto se acopló, en el modelo, a la estructura de la embarcación con las placas. Esto se hizo con elementos vigas y cascarón. Asimismo, se realizó dicho análisis, mediante la subestructuración. Esto fue debido a que no se contaba con una amplia capacidad de cómputo.

En otro orden de ideas, se analiza el soporte de un reductor de velocidad del eje trasero de un tractor agrícola, determinando el comportamiento estático, sus modos de vibración y las frecuencias. En los resultados se resalta la importancia de no utilizar de manera independiente los criterios de diseño por resistencia y por rigidez, ya que son complementarios y la finalidad del producto define si uno o ambos son importantes [96].

## 8. Tribología

En este terreno se realizó un estudio comparativo de la influencia que tienen la composición química y la microestructura en la resistencia al desgaste en condiciones húmeda y seca de las aleaciones Inconel 600 y estelita, depositadas como recubrimiento sobre un acero ASTM A36 [41]. Aunado a lo anterior, se estudió el comportamiento tribológico de un acero AISI 8620, sometido a un proceso de borurado y carbonitrurado [42]. Se realizaron pruebas de dureza y desgaste abrasivo en seco, se observó el efecto de las partículas abrasivas sobre ambas superficies y se encontró que se presenta desgaste por fractura en la superficie borurada.

En [43] se analizan las propiedades metalúrgicas de las aleaciones Inconel 600 y Stellite, depositadas mediante el proceso de soldadura

eléctrica con arco metálico y electrodo revestido sobre un acero al carbono ASTM A36. El estudio se realizó utilizando microscopía electrónica (SEM), difracción, pruebas de abrasión en seco, pruebas de dureza. Se observó la relación intrínseca entre la microestructura que presentan y las propiedades mecánicas del recubrimiento.

## 9. Análisis numérico

Urriolagoitia Calderón *et al.* [44,45] presentaron el desarrollo de un programa para el trazado del filete trocoidal de un diente de engrane. Dicho programa puede ser utilizado en aplicaciones de mecánica de la fractura y análisis del campo de esfuerzos. Lo anterior es útil en el diseño de engranes que se fabrican con una herramienta tipo cremallera. Con este programa se obtienen los parámetros ideales en cuanto a resistencia o desgaste. Este trabajo de investigación tiene una infinidad de aplicaciones; por ejemplo, la determinación del factor de intensidad de esfuerzos mediante el empleo del método de elemento finito MEF y la integral de Rice. En otro orden de ideas, Medina Velarde *et al.* [46] emplearon el MEF para el análisis de transferencia de calor en las válvulas de seguridad de reactores nucleares tipo BWR, en estado estable y transitorio. El procedimiento fue desarrollado con el programa ANSYS. Cabe mencionar que este trabajo se llevó a cabo con la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias, quien estimó la vida calificada de los componentes del reactor, así como el impacto ambiental generado por estas condiciones de operación. Los resultados numéricos están ligados directamente con el coeficiente de convección seleccionado, el cual está en el rango esperado (de 5 a 30 W/m<sup>2</sup>°C), donde el coeficiente se calibró a 30 W/m<sup>2</sup>°C.

Guerra Loeza y cols. [47] simularon el proceso de deformación plástica de geometrías cilíndricas. Para este efecto, el proceso de deformación se simuló paso a paso con el MEF, considerando la curva esfuerzo-deformación unitaria obtenida en el laboratorio del material. Los resultados obtenidos mostraron convergencia con los calculados por otros procedimientos.

En [48] se presenta la aplicación del método del elemento de frontera a problemas no lineales, independientes del tiempo (plasticidad) en dos dimensiones. Parte del dominio, especialmente la parte más crítica donde es más susceptible a la cedencia, en la cual se genera la plasticidad, es discretizada con celdas internas cuadriláteras cuadráticas continuas para obtener la deformación plástica. El análisis plástico es básicamente aplicado a metales. El criterio de cedencia de Von Mises y el endurecimiento por deformación son considerados en este análisis.

Mediante un procedimiento de análisis inverso con redes neuronales artificiales (RNA) se localizaron defectos en barras con muescas o sin estas [49]. Las dimensiones de los defectos postulados son de 1mm x 1mm. Las barras eran impactadas en uno de sus extremos con una carga de impulso tipo escalón. Las ondas elásticas resultantes se propagan a lo largo de la barra interactuando con el defecto. Con el método del elemento finito se analizó el campo transitorio de deformaciones unitarias. La base de datos requerida para entrenar a las redes neuronales, se conformó con las deformaciones unitarias registradas en puntos localizados en el borde de la barra, cerca del extremo opuesto a donde se aplicó la carga de impacto. El análisis se enfocó a evaluar la exactitud de la estimación de la localización de defectos en función de la arquitectura de la red neuronal, la geometría del dominio de estudio y el tamaño de la base de datos.

## 10. Ahorro de energía térmica

Una de las líneas de investigación que tiene mayor relevancia en la actualidad es el ahorro de energía térmica. Esto se debe a que no sólo representa un beneficio económico para las empresas, sino que al implementar ciertos métodos se logran reducir las emisiones contaminantes a la atmósfera. En el Laboratorio de Ingeniería Térmica e Hidráulica Aplicada (LABINTHAP), las investigaciones en esta área se han realizado en dos vertientes principales: intensificación de la transferencia de calor por convección y el estudio de sistemas de refrigeración no convencionales.

La intensificación de la transferencia de calor por convección tiene como objetivo incrementar la eficiencia térmica de intercambiadores de calor y superficies extendidas en los cuales el flujo externo es un gas, tal como radiadores, intercambiadores enfriados por aire, recuperadores de calor, precalentadores de aire, evaporadores y condensadores para refrigeración, etc. La intensificación se logra modificando las aletas anulares al darles un perfil cónico que provoca el desprendimiento de la capa límite y la generación de flujo secundario [50-52]. En los artículos [53-55] se presentan las características térmicas y aerodinámicas de este tipo de superficie, su aplicación a diferentes equipos y la simulación numérica de la dinámica del flujo. Otro método para intensificar la transferencia de calor, que actualmente se está investigando, es el de los bancos de tubos con arreglos convergente-divergente, los cuales también tienen ciertas perspectivas de aplicación en equipos de pocas hileras de tubos [56].

En lo que se refiere al estudio de los sistemas de refrigeración no convencionales, por una parte va encaminado a aprovechar la energía térmica residual de los gases de combustión por medio de sistemas de refrigeración por absorción [57] y por otra parte, aplicando los módulos termoeléctricos de efecto Peltier, para incrementar la eficiencia de refrigeradores de tipo doméstico [58]. En ambos casos se han tenido buenos resultados que redundan en un incremento de la eficiencia de los procesos y equipos de refrigeración.

Además de estos trabajos, una contribución fundamental al diseño de equipos de intercambio de calor se da en [59], donde se presentan las metodologías para el cálculo térmico, aerodinámico, hidráulico y mecánico de intercambiadores de calor y bancos de tubos aletados. También se presenta un método para incrementar la transferencia de calor aplicando un paso óptimo entre tubos en equipos de nuevo diseño.

## 11. Conducción de flujos bifásicos

En la SEPI-ESIME-IPN, se construyó un montaje experimental para realizar estudios de la conducción de mezclas bifásicas y, sobre todo, se desarrollaron instrumentos para medir los parámetros que definen a los flujos bifásicos como: fracción volumétrica local, espesor de películas de líquidos, diámetro y velocidad de burbujas, información determinante en la elaboración de modelos adecuados para este tipo de fenómenos [60]. Estas mismas técnicas e instrumentos se utilizaron para caracterizar el flujo *slug* horizontal, donde se determinó, longitud, velocidad, frecuencia y fracción volumétrica del flujo *slug*, lo cual constituye información valiosa para comprender estos fenómenos [61,62]. También se estudiaron fenómenos transitorios como las vibraciones induci-

das por el flujo *slug* en tuberías, ya que representan un serio problema para la operación estable de los sistemas [63].

Uno de los problemas que deben resolverse para aplicar los resultados que se obtienen en el laboratorio, es determinar las leyes de escalamiento que rigen los fenómenos que se encuentran en el manejo de los flujos bifásicos. Por ejemplo, para diseñar sistemas donde aparecen los fenómenos característicos, como los patrones de flujo, se deben aplicar las relaciones adecuadas para tomar en cuenta las dimensiones del sistema [64,65].

Una aplicación de los estudios de los flujos bifásicos a través de accesorios, ha conducido a utilizarlos como separadores de fase. Se han hecho estudios numéricos y experimentales con el fin de determinar cuál es la mejor posición del accesorio y su ramal para provocar la separación de la fase líquida aprovechando la fuerza centrífuga y los gradientes de presión dentro del accesorio. Se ha probado que se puede alcanzar hasta un 40% de eficiencia con estos accesorios, lo cual indica que este sencillo elemento puede disminuir las dimensiones de los separadores de fases convencionales [66].

Aprovechando los desarrollos que se han hecho en el área de la conducción de fluidos bifásicos, se resolvieron algunos problemas tecnológicos como la medición de películas de líquidos en álabes de turbinas de gas, así como las vibraciones inducidas por flujo bifásico cuando se conduce por medio de tuberías [67,68].

También se ha iniciado el empleo de técnicas experimentales nuevas, en el estudio de las mezclas bifásicas (PIV, velocimetría por imágenes de partículas), con el fin de comprender el detalle del campo de velocidad de los flujos bifásicos y desarrollar mejores modelos matemáticos [69,70,71,72]. La técnica del PIV junto con la del SPIV (velocimetría por el análisis de sombras de partículas), ha permitido estudiar el detalle de los campos de flujo burbujeante, como diámetro de burbujas, distribución de burbujas, fracción volumétrica, concentración de este tipo de flujo [73,74,75,76].

Otra línea de investigación es la metrología de flujo tanto de líquidos, como de gases. Se pretende desarrollar productos para dar servicios de metrología a la industria, para ello se ha estudiado el desempeño de accesorios que modifican la dirección del flujo, como los codos, para medir el flujo másico que pasa a través de ellos, aprovechando el gradiente de presión radial que se forma en el codo, se han hecho estudios numéricos y experimentales para mejorar los modelos de cálculo de dichos flujos. Es un método sencillo que puede implementarse fácilmente en la industria, donde no se requiere una precisión menor al 3% [77,78,79].

En lo que respecta a la metrología de flujo de gases, se ha diseñado, construido y caracterizado un banco de toberas sónicas, en el cual las toberas se utilizarán como elementos primarios de calibración de instrumentos para medir flujo de gases, aprovechando la estabilidad del flujo cuando alcanza las condiciones críticas [80]. Se han hecho estudios numéricos y experimentales que permitieron el desarrollo de mejores modelos para determinar el coeficiente de descarga sin tener que realizar experimentos [80,81].

En la línea de ahorro de energía, se ha construido una instalación experimental para hacer caloductos y termosifones, que son elementos bifásicos de transmisión de calor, que se utilizan ampliamente en sistemas de

recuperación de calor de alta eficiencia. También se han desarrollado metodologías para el diseño de equipos de transmisión de calor utilizando estos elementos bifásicos. Dichas metodologías se han integrado en programas de cómputo [82,83]. Por otro lado, se han hecho varios estudios para mejorar los diseños de recuperadores de calor utilizando estos elementos bifásicos, los estudios han comprendido el uso de tubos aletados, la geometría, los materiales y los fluidos de trabajo, encontrándose que en aplicaciones de recuperación de calor en calderas, se puede aumentar la eficiencia del sistema hasta en un 8%, lo cual tiene un gran impacto económico sobre todo en el medio ambiente [84-87].

En lo que respecta a las fuentes no convencionales, se ha trabajado en el área de la energía solar, donde se han realizado estudios teórico experimentales sobre calentadores solares y sobre el aprovechamiento de la energía solar para utilizarse en aplicaciones domésticas del hogar [88,89].

En la línea de investigación sobre refrigeración, se han desarrollado varios estudios que tienen que ver con el mejoramiento de los sistemas de refrigeración y sobre todo con el cambio de los fluidos de trabajo para reducir el impacto en el medio ambiente. Para esto, se han utilizado las técnicas de la termodinámica que toma en cuenta la disponibilidad de la energía y su mejor utilización [90-92]. También se han desarrollado programas computacionales de cálculo del desempeño de los sistemas de refrigeración, donde se incorporaron los resultados experimentales [93].

## 12. Robótica

Flores y cols. [94] aplican la metodología: "Intercepción múltiple de trayectorias bidimensionales" para interceptar dos objetos cuyas trayectorias son descritas a través de sus modelos matemáticos. Para plantear la trayectoria seguidora se utiliza como parámetro de solución la cinemática inversa, obteniéndose el historial cinemático y dinámico del robot manipulador. El primer caso estudiado consiste en interceptar dos partículas con movimiento parabólico vía un robot manipulador de dos grados de libertad. Ambas partículas inician su movimiento desde el mismo origen con ángulos y velocidades de disparo diferentes. En el segundo caso, se implementa la metodología para generar la trayectoria del efector final de un robot industrial que intercepte dos piezas que viajan sobre la banda transportadora de un sistema de manufactura flexible, evitándose el impacto.

Merchán *et al.* [95] aplican la *soft computing* para la planeación de trayectorias de sistemas multirobóticos, considerando el caso de la planeación del movimiento de manipuladores robóticos, empleando algoritmos genéticos para problemas bidimensionales.

Asimismo, mediante un algoritmo genético difuso se planea la trayectoria de dos manipuladores robóticos colaboradores que comparten el mismo espacio de trabajo [108]. En este caso se debe considerar que cada uno puede ser un obstáculo móvil. Asimismo, su trayectoria es desconocida e impredecible, dado que cada manipulador tiene metas individuales y tienen la misma prioridad. En este caso, el algoritmo genético se utiliza para obtener una estimación inicial del movimiento de las articulaciones del robot y realizar movimientos libres de coaliciones.

## 13. Cinética de difusión del boro en recubrimientos superficiales

La borurización es la saturación de boro en la superficie de metales y aleaciones con el fin de elevar la dureza, la resistencia al desgaste,

abrasión y corrosión en componentes ingenieriles cuyas aplicaciones industriales requieran la utilización de estas propiedades [97]. La borurización se realiza en mezclas de polvos, sales y óxidos fundidos, medios gaseosos y a base de pastas [98]. La borurización en pasta es un método alternativo de preparación de las muestras cuando se requiere reducir el trabajo manual utilizado en la borurización en polvo, además su ventaja radica en altos volúmenes de trabajo y en tratamientos selectivos [99].

Los estudios realizados sobre la cinética de difusión del boro en las fases boruradas han establecido la influencia del espesor de pasta de carburo de boro en el crecimiento de las fases de boruro de hierro FeB y Fe<sub>2</sub>B durante el tratamiento termoquímico de borurización en pasta en la superficie de aceros grado estructural y herramienta [100-103]. Los diferentes espesores de pasta de carburo de boro, sobre la superficie del material a temperatura y tiempo constante, indican la variabilidad del coeficiente de difusión del boro en las fases FeB y Fe<sub>2</sub>B, dependiendo fundamentalmente en el potencial de boro que rodea al material [104]. La movilidad del boro en las fases formadas es determinada por la ecuación de balance de masa que considera los perfiles de concentración en las interfases correspondientes capa-sustrato, el equilibrio termodinámico durante el crecimiento de la capa de boruro de hierro y la ley de crecimiento parabólico que cumple con los resultados experimentales obtenidos durante el proceso [105].

#### 14. Conclusiones

En este trabajo se ha hecho una revisión de los trabajos numérico-experimentales que se han realizado en la SEPI-ESIME en el área de ingeniería mecánica en los últimos quince años. Esta reseña no pretende ser exhaustiva y sólo se han reportado los resultados principales en las líneas de investigación mencionadas. Asimismo, es importante hacer notar que otra área donde se ha hecho una gran cantidad de trabajos de investigación, es en mecánica fractal. Esto no se incluyó en el presente trabajo, dado que esto se ha reportado ampliamente en dos artículos de reseña [106,107].

En cuanto al sector nuclear mexicano, se ha participado con la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardas en el desarrollo de una metodología para un programa de evaluación del abastecimiento con el fin de evaluar lo consumido con los principios componentes de un control nuclear relacionadas con seguridad [110]. Para esto se considera, entre otros factores, el daño originado por diversas condiciones de operación para establecer acciones preventivas.

Los trabajos reportados muestran que la investigación en ingeniería mecánica es interdisciplinaria. De hecho, ésta es la tendencia que también se observa a nivel internacional. Asimismo, en la mayoría de estos casos se realizó con un enfoque numérico experimental. Lo cual permite observar la convergencia de los resultados obtenidos. En aquellos casos que no se contaba con dichos resultados experimentales, se recurrió a considerar evaluaciones experimentales reportadas en la literatura abierta.

En términos generales, en el lapso considerado, ha habido grandes avances en el desarrollo de sistemas de cómputo, lo cual ha originado que en la actualidad se cuente con programas y equipos que tienen una mayor capacidad para realizar análisis numérico. Esto se ha reflejado en el alcance de los trabajos realizados.

#### 15. Agradecimientos

El desarrollo de la mayoría de los trabajos reportados en este artículo ha sido con el apoyo del CONACyT y el IPN, lo cual se agradece.

#### 16. Referencias

- [1] L. H. Hernández Gómez y C. Ruiz (1993) Assessment of data for dynamic crack initiation under shock pressure loading: Part I – Experiment. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, vol 19, 75-83.
- [2] L. H. Hernández Gómez y C. Ruiz (1993) Assessment of data for dynamic crack initiation under shock pressure loading: Part II – Analysis. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, vol. 19, 85-94.
- [3] J. A. Beltrán Fernández, L. H. Hernández Gómez, G. Urriolagoitia Calderón, G. Villa y Rabasa, R. G. Rodríguez Cañizo y M. A. Mendoza (2004) Análisis numérico-experimental de la Mecánica de la Fractura en materiales polímeros. *Científica*, vol. 8, núm. 4, 185-192.
- [4] L. H. Hernández Gómez y C. Ruiz (1993) Experimental evaluation of crack propagation velocity in PMMA under dynamic pressure loading. *International Journal of Fracture*, vol. 61, R21-R28.
- [5] L. H. Hernández Gómez, I. Saucedo Meza, G. Urriolagoitia Calderón, A. S. Balankin y O. Susarrey (2004) Evaluation of crack initiation angle under mixed mode loading at diverse strain rates. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, vol. 42, 53-61.
- [6] I. Saucedo Meza, L. H. Hernández Gómez, G. Urriolagoitia Calderón, A. Rodríguez Castellanos y G. Villa y Rabasa (2005) Crack propagation study under mixed mode loading. *Revista Mexicana de Física*, vol. 51 Suplemento 1, 1-4.
- [7] A. Rodríguez Castellanos, J. E. Rodríguez, F. J. Sánchez Sesma, L. H. Hernández Gómez e I. Saucedo Meza (2005) Diffraction of elastic waves by near surface cracks. *Revista Mexicana de Física*, vol. 51 Suplemento 1 43-46.
- [8] G. Urriolagoitia Calderón y L. H. Hernández Gómez (1996) Evaluation of crack propagation stability with the Williams stress function. Part I. *International Journal of Computers & Structures*, vol. 61, No. 4, 775-780.
- [9] G. Urriolagoitia Calderón y L. H. Hernández Gómez (1997) Evaluation of crack propagation stability with the Williams stress function. Part II. *International Journal of Computers & Structures*, vol. 63, No. 5, 1007-1014.
- [10] G. Urriolagoitia Calderón y L. H. Hernández Gómez (1997) Experimental analysis of crack propagation stability in single edge notch specimens. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, vol. 28, 57-68.
- [11] I. Saucedo Meza, L. H. Hernández. G. Urriolagoitia Calderón y A. Rodríguez (2001) Analysis of crack propagation stability under biaxial stress field. *Científica*, vol. 5, No. 3, 131-134.
- [12] M. A. Audelo, G. Villa y Rabasa, L. H. Hernández Gómez, G. Urriolagoitia Calderón, A. Kabatskaia y M. F. Carbajal Romero (2000) Determinación de factores de intensidad de esfuerzos en placas agrietadas utilizando el método fotoelástico. *Científica*, Núm. 24, 19-23.
- [13] R. G. Rodríguez Cañizo, L. H. Hernández Gómez y G. Urriolagoitia Calderón (2005) Análisis de la interacción de grietas en placas. *Revista Mexicana de Física*, vol. 51 Suplemento 1, 5-10.
- [14] A. Rodríguez Castellanos, F. J. Sánchez Sesma, L. H. Hernández Gómez y G. Urriolagoitia Calderón (2000) Evaluación del factor de intensidad de esfuerzos bajo condiciones de carga dinámica. *Científica*, 3-6.
- [15] G. Urriolagoitia-Calderón, L. H. Hernández-Gómez, G. Villa y Rabasa, G. Urriolagoitia-Sosa, J. L. Medina-Velarde, H. H. Vázquez-Mendoza, H. H. y C. León-Vega (1997) Solución conceptual del comportamiento de una probeta agrietada sometida a

- cargas de fatiga para determinar su vida remanente. *Científica*, Año 1, núm. 5, Septiembre-October, pp 39-42.
- [16] G. Urriolagoitia-Sosa, D. A. Hills y A. Sackfield (1999) A shrink-fit peg subject to bending and shearing forces. *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, vol. 34, No. 1, 23-30.
- [17] G. Urriolagoitia-Sosa y D. A. Hills (2000) A shrink-fit peg in a hole subjected to bending: unloading, reloading and frictional shakedown. *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, vol. 35, No. 5, September, 319-328.
- [18] D. A. Hills y G. Urriolagoitia-Sosa (1999) Origins of partial slip in fretting - A review of known and potential solutions. *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, vol. 34, No. 3, May, 175-182.
- [19] D. A. Hills y G. Urriolagoitia-Sosa (2000) Brief note: some observations on the parametric relationships in Hertzian fretting fatigue tests. *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, vol. 35, No. 5, September, 441-443.
- [20] G. Urriolagoitia-Sosa, J. F. Durodola y N. A. Fellows (2003) Determination of residual stress in beams under Bauschinger effect using surface strain measurements. *Strain*, Vol. 39, No. 4, November, 177-185.
- [21] G. Urriolagoitia-Sosa, J. F. Durodola y N. A. Fellows (2004) Determination of tensile and compressive stress strain curves from venid tests. *Advances in Experimental Mechanics, Applied Mechanics and Materials*, Vols 1-2, Ed. Lucas, Trans Tech Publications, 133-138.
- [22] G. Urriolagoitia-Sosa, J. F. Durodola, A. López-Castro, A. y N. A. Fellows (2006) A method for the simultaneous derivation of tensile and compressive behaviour of materials under Bauschinger effect using bend tests. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 220, No. 10, 1509-1518.
- [23] A. López-Castro, J. F. Durodola, G. Urriolagoitia-Sosa y N. A. Fellows (2005) Measurement and prediction of springback in bending beams. *Revista Mexicana de Física*, Vol. 51, No. 1, Mayo, 30-34.
- [24] G. Urriolagoitia-Sosa, J. F. Durodola y N. A. Fellows (2007) Effect of strain hardening on residual stress distribution in beams determined using the crack compliance method. *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, Vol. 42, No. 2, February 115-121.
- [25] V. M. Domínguez Hernández, M. F. Carbajal Romero, G. Urriolagoitia Calderón, L. H. Hernández Gómez, G. Rico Martínez, Z. Damián Noriega y P. A. Lomelí Mejía (1999) Biomecánica de un fémur sometido a carga. Desarrollo de un modelo tridimensional por medio del Método del Elemento Finito. *Revista Mexicana de Ortopedia y Traumatología*, Vol. 13, No. 6, 633-638.
- [26] G. Urriolagoitia Calderón, L. H. Hernández Gómez, M. F. Carbajal, C. V. Feria y Z. Damián (2003) Evaluation of the combined bending and compression stress field in a human proximal femur. *Revista Mexicana de Ingeniería Biomédica*, Vol XXIV, No. 2, 170-175.
- [27] M. F. Carbajal Romero, V. M. Domínguez Hernández, G. Rico Martínez, C. V. Feria Reyes, G. Urriolagoitia Calderón y L. H. Hernández Gómez (2000) Análisis biomecánico de un sistema hueso-prótesis para reemplazo del tercio proximal del fémur por Medio del Método del Elemento Finito. *Científica*, No. 20, 17-23.
- [28] V. C. Feria Reyes, M. Carbajal Romero, G. Urriolagoitia Calderón, L. H. Hernández Gómez, I. Saucedo Meza, E. Merchán Cruz y C. León Vega (2000) Análisis biomecánico del estado de esfuerzos de una prótesis cementada en fémur. *Científica*, No. 19, 3-9.
- [29] V. M. Domínguez Hernández, V. H. Ramos, C. V. Feria Reyes, G. Urriolagoitia Calderón y L. H. Hernández Gómez (2000) Efecto del espesor de la capa de cemento en el componente femoral de una prótesis de Charnley. Análisis biomecánico mediante el Método del Elemento Finito. *Revista Mexicana de Ortopedia y Traumatología*, Vol. 14, No. 6, 443-448.
- [30] Z. Damián Noriega, M. Hinojosa Ocampo, G. Urriolagoitia Calderón y L. H. Hernández Gómez (1998) Artrodístasis y deflexión de la rodilla contractuada en flexión. Diseño y aplicación de un distractor externo para artrodístasis. Reporte preliminar, informe de un caso. *Revista Mexicana de Ortopedia y Traumatología*, Número Especial sobre Fijadores Externos, Vol. 12, 240-245.
- [31] Z. Damián Noriega, J. P. A. Puerta, M. Hinojosa Ocampo, G. Urriolagoitia Calderón y L. H. Hernández Gómez (2004) Diseño y aplicación de un sistema de distracción mecánica para artrodístasis de rodilla. *Revista Mexicana de Ingeniería Biomédica*, Vol XXV, No. 1, 44-51.
- [32] Z. Damián Noriega, A. Reyes Sánchez, V. M. Domínguez Hernández, G. Urriolagoitia Calderón y L. H. Hernández Gómez (2000) Estudio mecánico del fijador interno de columna INO. Primera parte: comportamiento bajo carga cuasi-estática de flexo-compresión. *Revista Mexicana de Ortopedia y Traumatología*, Vol. 14, No. 1, 9-15.
- [33] J. A. Beltrán Fernández, L. H. Hernández Gómez, G. Urriolagoitia Calderón, R. G. Rodríguez Cañizo, M. Dufoo Olvera y A. González Rabatu (2005) Distribución de esfuerzos por la acción de cargas de compresión en la vértebra cervical C5, empleando el Método del Elemento Finito. *Científica*, Vol. 9, No. 3, 135-142.
- [34] M. F. Carbajal Romero, J. J. Nieto Miranda, R. G. Rodríguez Cañizo, M. Dufoo Olvera, L. H. Hernández Gómez, G. Urriolagoitia Calderón y A. Mior Martínez (2005) Analysis of compressive stresses on the spine with intervertebral disk injury: numerical-experimental study on a porcine specimen. *Acta Ortopédica Mexicana*, Vol. 19, suplemento 1, S6-S10.
- [35] P. A. Lomelí Mejía, G. Urriolagoitia Calderón, J. L. Jiménez Pérez, L. H. Hernández Gómez, H. Lecuona Butrón y A. Cruz Orea (2005) Photoacoustic spectroscopy applied to the study of bone consolidation in fractures. *Materials Science Forum*, Vols. 480-481, 339-344.
- [36] P. A. Lomelí Mejía, G. Urriolagoitia Calderón, J. L. Jiménez Pérez, A. Cruz Orea, H. Lecona Butron y H. Villegas Castrejón (2005) Photoacoustic and SEM analysis of fracture bone callus to different consolidation times. *J. Phys. IV France*, 125, 733-735.
- [37] C. A. Villaseñor Perea, S. H. Chávez Franco, C. Saucedo Veloz, A. Salazar Zazueta, L.L. Landois Palencia y L. H. Hernández Gómez (2006) Comportamiento mecánico y fisiológico de frutos de melón (*Cucumis melo* L.) bajo compresión axial. *Revista Fitotecnica Mexicana*, Vol. 29, No. 2, 157-162.
- [38] A. Nava Segura y G. Urriolagoitia Calderón (Eds.) (2007) *Trolebús de Corriente Alterna*. SEP-Instituto Politécnico Nacional.
- [39] G. Urriolagoitia Calderón, L. H. Hernández Gómez, L. A. Flores Herrera, E. A. Merchán Cruz, G. Urriolagoitia Sosa y R. Rivera Blas (2006) Análisis de impacto sobre un trolebús. 2° Congreso Internacional de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro. 14-17 de Marzo de 2006, Querétaro, Qro. 417-424.
- [40] J. C. Zarco González, L. H. Hernández Gómez, G. Urriolagoitia Calderón, G. Villa y Rabasa, L. A. Flores Herrera y R. López Martínez (2002) Análisis por el Método del Elemento Finito del casco de una embarcación transportadora de sal. *Científica*, Vol. 6, No.1, 3-8.
- [41] M. Vite, M. Castillo, L. H. Hernández Gómez, G. Villa y Rabasa y H. Cruz (2005) Dry and wet abrasive resistance of inconel 600 and stellite. *Wear*, 258, 70-76.
- [42] M. Castillo, M. Vite, L. H. Hernández Gómez, G. Villa y Rabasa y G. Urriolagoitia Calderón (2005) Desgaste por fractura en elementos mecánicos borurados. *Revista Mexicana de Física*, 51 - 1, 11-15.
- [43] M. Castillo, F. Palacios, A. Márquez, L. H. Hernández Gómez, P. Villegas y G. Villa y Rabasa. (2001) Características y propiedades de recubrimientos con aleación Inconel 600 y Stellite. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 21 - 2, 64 - 68.
- [44] G. Urriolagoitia Calderón, L. H. Hernández-Gómez, G. Villa y Rabasa, G. Urriolagoitia-Sosa, J. L. Medina-Velarde y H. H. Vázquez-Mendoza (1997) Programa para el trazado del filete trocoidal de un diente de engrane. *Científica*, Año 1, No. 2, 35-40.



- [45] G. Urriolagoitia Calderón, L. H. Hernández Gómez, G. Villa y Rabasa, J. L. Medina Velarde y H. H. Vázquez (1997) Aplicación de elementos finitos al diseño de engranes y algunos aspectos fundamentales relativos a la Mecánica de Fractura. *Científica*. Año 1, núm. 4, 1-7.
- [46] J. L. Medina Velarde, L. H. Hernández Gómez, G. Urriolagoitia Sosa, G. Villa y Rabasa, H. H. Vázquez Mendoza y G. Urriolagoitia Calderón (1997) Análisis tridimensional de transferencia de calor en componentes mecánicos de reactores nucleares por el método del elemento finito. *Científica*. Año 1, No. 3, Mayo-Junio, 33-40.
- [47] J. O. Guerra Loeza, L. H. Hernández Gómez, G. Urriolagoitia Calderón, G. Villa y Rabasa, R. López Martínez y L. A. Flores (2001) Análisis de la deformación plástica mediante el Método del Elemento Finito. *Científica*. Vol. 5, No. 1, 31-37.
- [48] E. Pineda León y M.H. Aliabadi (2007) Boundary element analysis of elasto-plastic problems. *Científica*. Vol. 11, No. 1, 17-20.
- [49] L. H. Hernández Gómez, J. F. Durodola, N. A. Fellows y G. Urriolagoitia Calderón (2005) Locating defects using dynamic strain analysis and artificial neural networks. *Applied Mechanics and Materials*. Vols. 3-4, 325-330.
- [50] I. Carvajal Mariscal, F. Sánchez Silva y P. Quinto Diez (2001) Flow dynamics between the inclined fins of a finned tube. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. Vol. 22, No. 5, 519-524.
- [51] I. Carvajal Mariscal, F. Sánchez Silva, M. Toledo Velázquez y V. A. Pronin (2001) Experimental study on the local convective coefficient distribution on a pipe surface with inclined fins. *Experimental Thermal and Fluid Science*. Vol. 25, No. 5, 293-299.
- [52] I. Carvajal Mariscal, F. Sánchez Silva, G. P. Polupan y V. A. Pronin (2001) Experimental Study of the flow dynamics and the local heat transfer on a pipe surface with inclined fins. *International Journal of Industrial Heat Engineering*. Vol. 23, No. 1-2, 15-23.
- [53] I. Carvajal Mariscal, F. Sánchez Silva, E. A. Nuñez Alfaro y J. Abugaber Francis (2004) Comparación de la eficiencia térmica de tubos aletados inclinados y tubos con aletas inclinadas. *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica*. Vol. 8, No. 1, 31-38.
- [54] I. Carvajal Mariscal, F. Sánchez Silva, P. Quinto Diez y G. Tolentino Eslava (2003) Nuevo perfil de aletas para intercambiadores de calor enfriados por aire. *Revista Internacional Información Tecnológica*. Vol. 14, No. 3, 67-72.
- [55] I. Carvajal Mariscal, J. R. García Figueroa, G. Polupan, J. G. Barbosa Saldaña y F. Sánchez Silva (2006) Comparación del comportamiento de diferentes modelos de turbulencia al simular la dinámica del flujo en un tubo con aletas cónicas. *Mecánica Computacional*. Vol. XXV, No. 1, 1-12.
- [56] I. Carvajal Mariscal, P. Quinto Diez P, M. Toledo Velázquez y J. Abugaber Francis (2003) Transferencia de calor en bancos de tubos aletados con arreglos convergente y divergente. *Revista Internacional Información Tecnológica*. Vol. 14, No. 5, 75-80.
- [57] I. Carvajal Mariscal, G. Polupan, F. Sánchez Silva, P. Quinto Diez y A. Zacarias Santiago (2005) Heat transfer study in the elements of an absorption refrigeration system operating in partial heat loads. *International Journal of Industrial Heat Engineering*. Vol. 27, No 5, 58-65.
- [58] J. E. Márquez Tavera e I. Carvajal Mariscal (2006) Aplicación de la termoelectricidad para aumentar el COP de refrigeradores convencionales. 9º Congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas SEPI-ESIME. 1-4.
- [59] Ye Pysmennyy, G. Polupan, I. Carvajal Mariscal, F. Sánchez Silva (2007) *Manual para el Cálculo de Intercambiadores de Calor y Bancos de Tubos Aletados*. Editorial Reverté, pág. 197.
- [60] F. Sánchez Silva, M. Toledo Velázquez y P. Quinto Diez (1997) Transit time technique for simultaneous measurement of diameter and velocity of bubbles using a conductance probe. *Instrumentation and Development. Journal of Mexican Society of Instrumentation*. Vol. 3, No. 7, 52-58.
- [61] F. Sánchez Silva, M. Toledo Velázquez, P. Quinto Diez y J. A. Cruz Maya (1997) Experimental slug flow characterization in a horizontal pipe. *Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics*. Bruselas, Bélgica del 2 al 6 de Junio.
- [62] F. Sánchez Silva, A. Hernández Gómez y M. Toledo Velázquez (1999) Experimental characterization of air water slug flow through a 90° horizontal elbow. *Two Phase Flow Modeling and Experimentation*. Edizioni Ets. Vol 2, Pisa, Italy. 827-834.
- [63] F. Sánchez Silva, M. Toledo Velázquez y A. Hernández Gómez (1998) Slug flow momentum transfer analysis to determine the forces acting on a 90° elbow in a horizontal pipe. *3th International Conference on Multiphase Flow ICMF'98*. Lyon, France, June 8-12.
- [64] F. Sánchez Silva, A. Gómez Mercado, P. Quinto Diez, V. Zurita Ugalde y M. Toledo Velázquez (2000) Scaling and modeling arguments for a two-phase slug flow. *International Symposium on Multi-Phase Flow and Transport Phenomena, ICHMT*. Antalya, Turkey, November 5-10, 361-365.
- [65] F. Sánchez Silva, A. Gomez Mercado, M. Toledo Velázquez, I. Carvajal Mariscal y P. Quinto Diez (2001) Scaling laws study for curved horizontal two-phase flows. *International Conference on Multiphase Flow (ICMF-2001)*. New Orleans, Louisiana USA, May 27 to June 1, 2001, paper 878.
- [66] P. Valente Hernández, F. Sánchez Silva, M. Toledo Velázquez y G. Polupan (2003) Study of the 90° elbows performance as phase separators in an air-water two-phase flow. *4th ASME-JSME Joint Fluids Engineering Conference FEDSM2003*. Honolulu, Hawaii USA, July 6-10, Paper FEDSM 2003-45018.
- [67] F. Sánchez Silva, P. Quinto Diez, y V. Zurita Ugalde (1994) Vibraciones en tuberías inducidas por flujo de mezclas bifásicas. *VIII Conferencia Científica de Ingeniería y Arquitectura*. La Habana, Cuba del 29 Noviembre al 2 de Diciembre.
- [68] F. Sánchez Silva, M. Toledo Velázquez. y J. Abugaber Francis (1994) Determinación del flujo másico en películas de líquido que se forman en abugaberías de alimentación a turbinas de vapor. *XVII Congreso Internacional en Calderas, Recipientes a Presión y Temas Afines*. Puebla, Puebla, Agosto.
- [69] D. R. Todd, J. Ortiz-Villafuerte, W. D. Schmidl, y. A. Hassan and F. Sánchez Silva (2001) Analysis of bubbly flow using particle image velocimetry. *International Conference on Nuclear Engineering (ICONE 9.) ASME en Nice Acropolis - France*, April 8-12, 1-12.
- [70] Y. A. Hassan, J. Ortiz-Villafuerte, W. D. Schmidl, F. Sánchez Silva, D. R. Todd y Fatma Yilmaz (2001) Three dimensional turbulence measurements in bubbly two-phase flows with particle image velocimetry. *International Conference on Multiphase Flow (ICMF-2001)*. New Orleans, Louisiana USA, May 27 to June, paper 534.
- [71] D. R. Todd, J. Ortiz-Villafuerte, W. D. Schmidl, Y. A. Hassan y F. Sánchez Silva (2001) Phasic discrimination in two-phase flow measurements using PIV. *ANS Annual Meeting. Milwaukee, WI, USA*, June 17-21, 2001, ANS Transactions 84, 187-188.
- [72] J. Ortiz-Villafuerte, E. Dominguez-Ontiveros, Y. A. Hassan y F. Sánchez Silva (2002) Structure and dynamics of turbulent bubbly flow using PIV techniques. *ANS Annual Meeting*. Hollywood, FL, U.S.A., June 9-13, ANS Transactions 86, 261-262.
- [73] F. Sánchez Silva, H. Martinez y E. López (2002) Void fraction and bubble oscillation analysis in a vertical bubbly flow using PIV and SPIV techniques. *Third International Conference on Transport Phenomena in Multiphase Systems, HEAT 2002*. Baranow, Sandomierski, Poland, June 24-27, 449-454.
- [74] F. Sánchez Silva, H. Martinez, J. Ortiz-Villafuerte y Y. A. Hassan (2002) Void fraction and bubble oscillation trajectory analysis in vertical bubbly flow using the SPIV technique. *10th International Symposium on Flow Visualization*. August 26-29, Paper F0230 Kyoto, Japan.
- [75] H. Martinez Cepeda, F. Sánchez Silva, Y. Hassan y J. Ortiz Villafuerte (2004) Phase distribution in vertical bubbly flow using shadow image velocimetry technique. *5th ICMF*. Yokohama, Japan May 30-June 4.

- [76] F. Sánchez Silva, I. Carvajal Mariscal, P. Quinto Diez y J. Hernández Ruíz (2005) Void distribution in a vertical bubble flow using shadow image techniques. *4<sup>th</sup> International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics*, Paper SF1, HEFAT 2005. 19-22 Septiembre, Cairo, Egipto.
- [77] F. Sánchez Silva, A. Gómez, M. Toledo Velázquez, P. Quinto Diez y V. Zurita (2003) Experimental and numerical curved flow study for metrology purposes. *Journal of Applied Research and Technology*. Vol. 1, No. 2, July, 114-126.
- [78] F. Sánchez Silva, M. Toledo Velázquez y J. Hernández Ruiz (1997) Experimental study for the use of elbows as flowmeters. Paper No. FEDSM97-3010, *ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting*. Vancouver Canada, Junio, 22-26.
- [79] F. Sánchez Silva, J. Hernández Ruiz, M. Toledo Velázquez y V. Zurita Ugalde (1998) Curved pipe flow numerical simulation for metrology purposes using CFD. 2000, Paper No. FEDSM98-5287, *ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting*. Washington D. C. June, 21 - 25.
- [80] J. A. Cruz Maya, F. Sánchez Silva, I. Carvajal Mariscal y G. Tolentino Eslava (2004) Estudio y determinación del coeficiente de descarga en toberas de flujo crítico. *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica*. Vol. 8, No. 2, 63-78.
- [81] J. A. Cruz Maya, F. Sánchez Silva y P. Quinto Diez (2006) A new correlation to determine the discharge coefficient of a critical venturi nozzle with turbulent boundary layer. *Flow Measurement and Instrumentation*. Vol. 17, 258-266.
- [82] F. Sánchez Silva, I. Carvajal Mariscal, G. Tolentino y J. Abugaber (2001) Diseño térmico y mecánico de un intercambiador de calor en base a tubos termosifones bifásicos. *Información Tecnológica*. Vol. 12, No. 3, 63-70.
- [83] F. Sánchez Silva (1995) TURTERBI Computer code for heat recovery equipment design using two-phase thermosiphons. *Numerical Methods in Laminar and Turbulent Flow '95 IX International Conference*. Atlanta, Georgia USA, 10 - 14 July.
- [84] A. Gershuni, A. Nishchik, Ye. Pysmenny, G. Polupan, F. Sánchez-Silva e I. Carvajal Mariscal (2001) Development and investigation of the ribbing heat pipes as elements of compact heat exchangers of a type gas-gas. *Pros. of the 5<sup>th</sup> World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics*, September 24-28, Thessaloniki, Grece.
- [85] A. Gershuni, A. Nishchik, Ye. Pysmenny, G. P. Polupan, F. Sánchez Silva e I. Carvajal Mariscal (2002) Compact heat exchangers based on finned heat pipes. *Proceedings of the First International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, HEFAT 2002*. Skukuza, Kruger National Park, South Africa, 8-10, 1111-1114.
- [86] Gershuni, A. Nishchik, Ye. Pysmenny, G. P. Polupan, F. Sánchez Silva e I. Carvajal (2002) Recuperator of heat in base of compact heat exchanger. *Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Symposium of Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery ISROMAC-9*, Honolulu, Hawaii, USA, February 10-14.
- [87] Ye Pysmenny, A. Gershuni, G. P. Polupan, F. Sánchez Silva e I. Carvajal Mariscal (2003) Development of effective heat exchangers based on fining thermosiphons for saving of leaving heat. *4<sup>th</sup> Baltic Heat Transfer Conference*. Begell House Inc. Kaunas, Lituania, August 25-27.
- [88] P. Quinto Diez, J. G. Barbosa, F. Sánchez Silva e I. Carvajal Mariscal (2001) Simulación numérica y diseño de sistemas solares para calentamiento de agua. *Información Tecnológica*. Vol. 12 No. 2, 143-150.
- [89] P. Quinto Diez y J.G. Barbosa Saldaña (2001) Diseño y evaluación de un sistema solar experimental para calentamiento de agua. *Científica*. Vol. 5, No. 1, 39-45.
- [90] P. Quinto Diez, J. A. Jiménez-Bernal, F. Sánchez-Silva e I. Carvajal Mariscal, (2002) Coeficiente de operación del ciclo de Carnot de refrigeración endorreversible, usando el criterio de mínima generación de entropía. *Información Tecnológica*. Vol. 13 No. 2, 139-144.
- [91] A. J. Gutiérrez, P. Quinto Diez, M. Toledo Velázquez. y F. Sánchez Silva (2003) Resultados experimentales de las entropías generadas en un sistema de refrigeración. *Información Tecnológica*. Vol. 14 No. 1, 75-82.
- [92] P. Quinto Diez, I. Carvajal Mariscal, F. Sánchez Silva y J. Abugaber Francis (2005) Evaluación de un sistema de refrigeración usando la termodinámica endorreversible. *Revista Internacional Información Tecnológica*. Vol. 16, No. 5, 49-55.
- [93] A. J. Gutiérrez, P. Quinto Diez, M. Toledo Velázquez y F. Sánchez Silva (2002) Programa de cómputo para el cálculo de las irreversibilidades en sistemas de refrigeración por compresión mecánica de vapores. *Acta Científica Venezolana*. 53: 149-155.
- [94] J. A. Flores Campos, L. H. Hernández Gómez y E. Merchán Cruz (2005) Metodología de intercepción múltiple de trayectorias bidimensionales aplicada a un sistema de manufactura flexible. *Científica*. Vol. 9, Núm. 2, 87-98.
- [95] E. A. Merchán Cruz, G. Urriolagoitia Calderón, L. H. Hernández Gómez, G. Villa y Rabasa, L. A. Flores y J. A. Flores Campos (2005) Soft-Computing techniques in the trajectory planning of multirobot manipulators systems (Part I). *Científica*. Vol. 9, núm 4, 197-208.
- [96] T. M. Reydezel, G. Urriolagoitia Calderón y T. T. David (2007) Aplicación y análisis comparativo de los criterios de diseño mecánico por resistencia a esfuerzos, rigidez y modos de vibración. *Científica*. Vol. 11, No. 1, 33-40.
- [97] I. Campos, J. Oseguera, U. Figueroa, J.A. García, O. Bautista, G. Kelemenis (2003) *Materials Science and Engineering*. A352, 261-265.
- [98] E. Meléndez, I. Campos, E. Rocha, M. A. Barrón (1997) *Materials Science and Engineering*. A234-236, 900-903.
- [99] I. Campos, M. Palomar, A. Amador, R. Ganem, J. Martínez (2006) *Surf. Coat. Technol.* 201, 2438-2442.
- [100] I. Campos, M. Islas, G. Ramírez, C. Villa Velázquez, C. Mota (2007) *App. Surf. Sci.* 253, 6226-6231.
- [101] I. Campos, G. Ramírez, U. Figueroa, J. Martínez, O. Morales (2007) *App. Surf. Sci.* 253, 3469-3475.
- [102] I. Campos, R. Torres, G. Ramírez, R. Ganem, J. Martínez (2006) *App. Surf. Sci.* 252, 8662-8667.
- [103] I. Campos, M. Islas, E. González, P. Ponce, G. Ramírez (2006) *Surf. Coat. Technol.* 2717-2723.
- [104] I. Campos, O. Bautista, G. Ramírez, M. Islas, J. de la Parra, L. Zúñiga (2005) *App. Surf. Sci.* 243, 429-436.
- [105] I. Campos, R. Torres, O. Bautista, G. Ramírez, L. Zúñiga (2006) *App. Surf. Sci.* 252, 2396-2403.
- [106] A. S. Balankin (2000) Mecánica de fractura: pasado, presente y futuro. *Científica*, No. 22, 3-17.
- [107] A. S. Balankin (2003) Fractal behavior of complex systems. *Científica*. Vol. 7, núm. 3, 109-128.
- [108] E. A. Merchán-Cruz y A. S. Morris (2006) Fuzzy-GA-Based Trajectory Planner for Robot Manipulators Sharing a Common Workspace. *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 22, No. 4, 613-624.
- [109] J. Martínez Trinidad, D. Samayoa Ochoa, E. Hernández García, J. J. Silva Lomelí, O. Susarrey Huerta y A. S. Balankin. (2005) Probabilistic fracture mechanics: Application in reactor pressure vessels and oil pipelines. *Revista Mexicana de Física*. Vol. 51, 19-29.
- [110] L.H. Hernández Gómez y P. Ruiz López (1995), Basis Criteria for an Aging Assessment Program of Major Components in Mexican Nuclear Instalations. *International Symposium on Materials Ageing and Component Life Extension*. Milán, Italia, 10-13 Octubre 1995, vol. II, 1411-1419.