

# Evaluación mecánica y consecuencias de falla por toma clandestina en ductos de Petróleos Mexicanos

Ruperto Enrique Olivera-Villaseñor<sup>1</sup>  
Alejandro Rodríguez-Castellanos<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Universidad Nacional Autónoma de México.  
Ciudad Universitaria, Coyoacán  
CP 04510, México DF.

<sup>2</sup>Instituto Mexicano del Petróleo.  
Eje Central Lázaro Cárdenas núm. 152,  
CP 07730, México, DF.

<sup>3</sup>Instituto Politécnico Nacional.  
ESIME-SEPI Azcapotzalco.  
Av. de las Granjas núm. 682,  
CP 02550, México DF.  
MÉXICO.

Tel. <sup>1</sup>5518 6597

<sup>2</sup>8283 4913

<sup>3</sup>5934 9704

correo electrónico: <sup>1</sup> eolivera@imp.mx

<sup>2</sup> arcastel@imp.mx

Recibido el 10 de noviembre de 2005; aceptado el 13 de septiembre de 2006.

## 1. Resumen

Se utilizan dos modelos para evaluar el riesgo potencial de falla a consecuencia de las tomas clandestinas en poliductos. Primero, un modelo de elementos finitos para evaluar el comportamiento mecánico y, el segundo, un modelo de consecuencias para simular y cuantificar un escenario hipotético de falla del poliducto.

La evaluación mecánica de la tubería vulnerada por una toma clandestina, a lo que se auna la consideración de pérdida de integridad física por disminución del espesor del ducto, encontrándose que el nivel de concentración alcanzado, es cerca de diez veces el esfuerzo medio encontrado fuera de la vecindad

del orificio. Partiendo de la concentración de esfuerzos en la tubería, se esperaría una alta probabilidad de falla. Por lo cual, se realiza un análisis de consecuencias para evaluar los impactos posibles a la población, medio e infraestructura, y así poder proponer salvaguardas redundantes.

El análisis se llevó a cabo en la ciudad de Cárdenas, Tabasco, para una toma clandestina de una pulgada de diámetro y un tiempo de fuga de treinta minutos de gasolina Premium. Se muestran resultados de dispersión, inflamabilidad, sobrepresión y las afectaciones potenciales a la población e infraestructura.

**Palabras clave:** análisis de esfuerzos, elementos finitos, toma clandestina, modelo de consecuencias.

## 2. Abstract (Mechanical assessment and consequences of fault by clandestine taking in pipelines of Petroleos Mexicanos)

This work is based on the usage of two models in order to assess the potential risk in failures coming from clandestine taking in the different pipeline nets. The first is a model by means of finite element method to assess the mechanical behaviour of pipelines and the second one is a model of consequences to simulate and quantify hypothetical scenery of failures in the pipeline.

The mechanical evaluation of the pipe harmed by a clandestine taking and with pipe thickness modified by lost physical integrity, the concentration level attained, is almost ten times, the average stresses outside the hole vicinity. The stresses concentration in the pipe, would be expected a high probability of fault. Thus, an analysis of consequences is made to evaluate the possible impacts to the population, means and infrastructure, and thus to be able to propose redundant safeguards.

An analysis of consequences was done in the Cardenas City, Tabasco, for a clandestine taking of one inch of diameter and a time of thirty minutes for leaking of Premium gasoline. The next results are: dispersion, flammability, overpressure and affectations possible to the population and infrastructure.

**Key words:** stress analysis, finite element, clandestine taking, consequences model.

### 3. Introducción

Desde 1993 se tienen registros oficiales de este tipo de actividades ilícitas en el país. En 1995, Pemex-Refinación detectó 297 tomas clandestinas (usualmente roscadas), de acuerdo al Estudio del riesgo en ductos de transporte de gasolinas y diesel en México [1], en 1996 se detectaron 366, en 1997 disminuyeron a 159, en 1998 aumentaron a 240. La incidencia menor se alcanzó en 2001, con 131 casos y en 2003 se han reportado 136 [2].

La red de ductos petroleros del país tiene un promedio de antigüedad en operación de 26 años, de la cual ocho por ciento tiene una vida menor a los 10 años; 65 por ciento tiene entre 11 y 30 años, mientras 27 por ciento tiene más de 31 años [3].

La infraestructura petrolera tiene una red de poliductos de 8 944 kilómetros, que permite transportar 1.66 millones de barriles al día para surtir de combustibles al país [4].

En estas circunstancias, prevalece un riesgo latente, por el sobretrabajo de ductos, es decir, el problema de esta infraestructura es más grave de lo que parece, entre otros aspectos tienen que ver: la falta de inversiones para mantenimiento preventivo y correctivo; ocho de cada diez metros de tendido de ductos a nivel nacional trabajan al máximo de su capacidad, según se desprende de información de la propia paraestatal [5].

Por el nivel de actividad de las principales zonas productoras, la red de ductos de Veracruz, Campeche y Tabasco son los que llegan a operar prácticamente al 100% de su capacidad, en muchas ocasiones sin margen de reserva o de seguridad, con el subsecuente riesgo que ello representa.

La problemática principal radica en que Pemex ha incrementado su producción de petróleo 13.3% en los últimos siete años con la misma infraestructura de ductos, y por tanto, éstos están sometidos a operar a su máxima capacidad.

Aunado a estas condiciones de trabajo, se suman los problemas ocasionados por el efecto de la corrosión, sobrepresión, fatiga, fisuras, errores humanos, y daños por terceras partes, de entre los que se destacan, por su número, los golpes por maquinaria y principalmente los relacionados a las tomas clandestinas.

El hurto de gasolinas por tomas clandestinas se destaca por su impacto en pérdidas económicas, ambientales, afectaciones a la población, pérdidas de producción y de imagen de la propia paraestatal.

Dentro de este contexto, es menester estudiar con mayor profundidad estos hechos para su control y erradicación, además generar sugerencias que ayuden a la gestión del mantenimiento de poliductos en Pemex, y evitar en lo posible accidentes en los derechos de vía por la práctica de estas actividades ilícitas en lo futuro.

### 4. Desarrollo

Derivado de esta problemática imperante en la red de ductos de Pemex, y las constantes emergencias suscitadas en el Sureste mexicano, donde se ha registrado una serie de accidentes y derrames reportados en un periodo de 8 meses [4, 5], diciembre 26 de 2004 a julio 13 de 2005 en los estados de Veracruz y Tabasco. Surge la necesidad de evaluar detalladamente el comportamiento mecánico estructural al ser vulnerados los poliductos por las prácticas ilícitas, y cómo éstas pueden generar accidentes, además la grave contaminación por hidrocarburos en esta región [12]. Para estimar la magnitud de los posibles efectos se emplean los análisis de consecuencias para identificar los diferentes puntos de riesgo relativo y, por supuesto, las áreas sensibles de afectación en los derechos de vía.

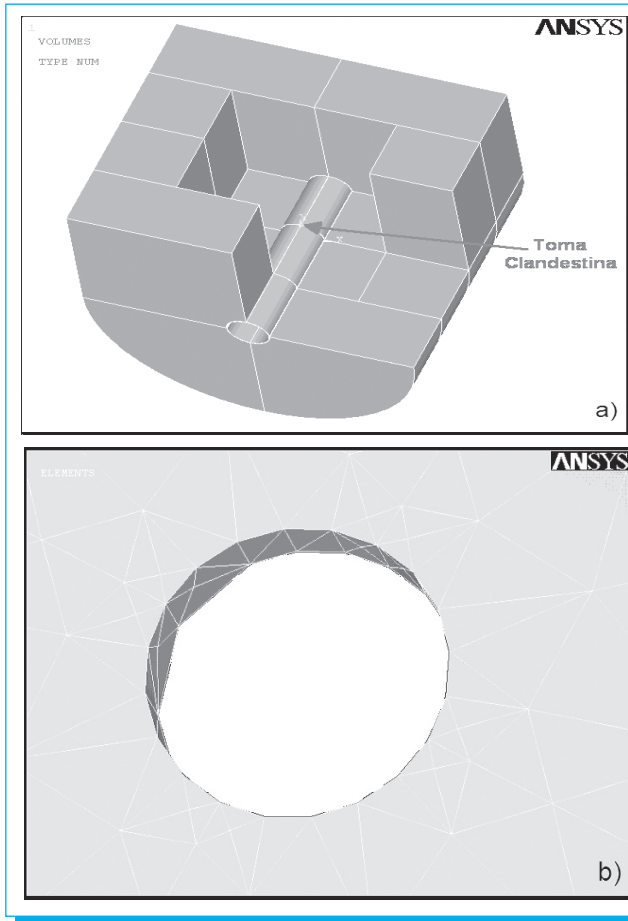
Se propone desarrollar un modelo para su análisis por medio de elementos finitos, en las perforaciones que son practicadas en la tubería de acero al carbón para la extracción ilícita de combustibles, tales como gasolinas y diesel.

El modelo de análisis de esfuerzos de la tubería de acero al carbón, considera los datos de las condiciones de operación de un poliducto de la región sureste del país.

#### 4.1 Análisis mecánico

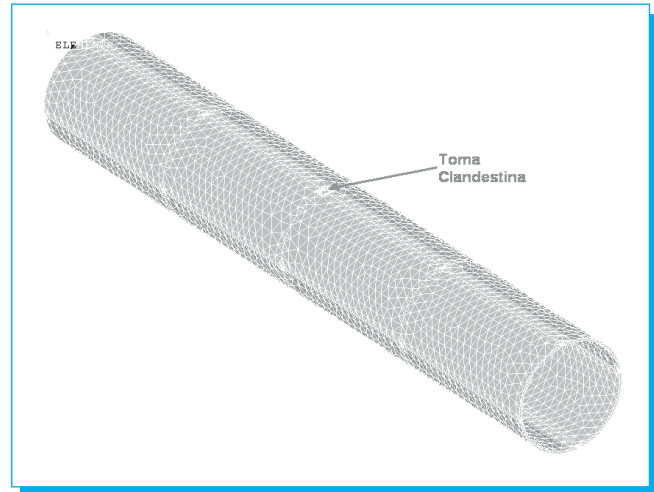
Con el propósito de realizar el análisis de esfuerzos al sistema tubería-toma clandestina (roscada), mismo que se encuentra sometido a una presión de operación de 5.91 kg/cm<sup>2</sup> (84 psi), se ha realizado un análisis numérico mediante el método del elemento finito (MEF). La tubería considerada es de API-STD-5L, grado X-52 con un diámetro nominal de 12" y un espesor inicial de 0.250", su módulo de elasticidad es de 2 100 000 kg/cm<sup>2</sup> y relación de Poisson de 0.30. También se considera un orificio de una pulgada de diámetro en la parte superior del tubo; este diámetro es comúnmente encontrado en las tomas clandestinas.

Se ha considerado además, una variación uniforme en el espesor del tubo debida a corrosión externa, reduciendo el espesor inicial en un 25% y hasta un 50%, (de acuerdo a los datos del monitoreo de corrosión consultados) [6]. Cabe mencionar que se ha planteado que el suelo circundante confina a la tubería (lo cual es una situación



**Fig. 1.** Modelo sólido para el análisis por medio del MEF; a) sistema tubería-toma clandestina-tierra, b) Detalle de la malla en el orificio de la toma clandestina.

real en este tipo de instalaciones, porque mayormente se encuentran enterradas en los derechos de vía de los sistemas de ductos instalados en el territorio nacional) y posee un módulo de elasticidad de  $509.85 \text{ kg/cm}^2$  y una relación de Poisson de 0.25, que es un valor representativo de una arcilla arenosa. El peso volumétrico del suelo es de  $1.8 \text{ ton/m}^3$  el cual es un valor típico para suelos que se someten a procesos de compactación. Los efectos impuestos por dicho suelo se consideran al modelar elementos finitos con las propiedades mecánicas del suelo, y considerando una presión resultante de dicho peso volumétrico, se considera una excavación de un metro por lado. La longitud del tubo que se ha considerado para el análisis es de dos metros (figura 1a), que es una longitud adecuada para este tipo de análisis debido a que a esta distancia se presenta nula influencia de la concentración de esfuerzos provocada por la perforación, de acuerdo el principio de Saint-Venant [7].



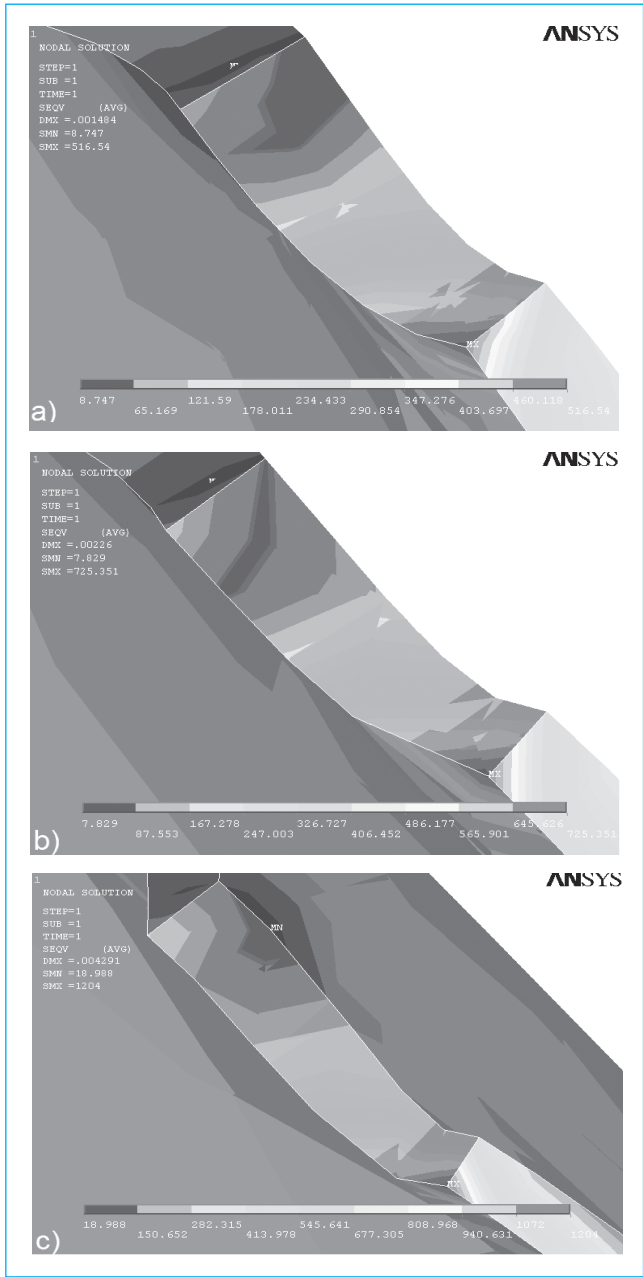
**Fig. 2.** Sistema tubería-toma clandestina, malla de elementos finitos.

El modelo sólido considerado para el análisis por el método del elemento finito del sistema tubería-toma clandestina se ilustra en las figuras 1a y 1b.

El modelo de elementos finitos (malla) puede apreciarse en la figura 2. El tipo de elemento empleado para el análisis es el Solid 92 de la librería del programa Ansys versión 9.0 [8]. Para obtener una buena sensibilidad del modelo, se ha considerado un mallado denso de la tubería, especialmente en la zona del orificio de la toma clandestina. En general se considera que el espesor del tubo es de un elemento. Dada la geometría del modelo estudiado, se establecieron condiciones de simetría en los dos planos ortogonales que intersectan al barreno. Esta condición define un estado de continuidad de esfuerzos y deformaciones en las fronteras. Dicha condición también fue aplicada a los límites del modelo; resultante en una malla de 43 771 elementos. El equipo utilizado fue una computadora con procesador *Centrino* a 1.86 GHz, 100 MB en disco duro y

**Tabla 1.** Esfuerzos von Mises para los casos estudiados.

Casos de estudio	Esfuerzo von Mises en $\text{kg/cm}^2$	
	Vecindad del barreno	Extremo del Tubo
a) Espesor nominal	516.540	128.246
b) Espesor al 75%	725.351	168.932
c) Espesor al 50%	1204.000	249.014



**Fig. 3.** Distribución de esfuerzos en el sistema tubería-toma clandestina. Esfuerzos equivalentes en la tubería con un cuarto del barreno; a) espesor nominal, b) espesor al 75% y c) espesor al 50%.

1 GB de memoria RAM, tiempo-máquina de solución: 1 hora 27 minutos 2.2 segundos.

Las figuras 3a, 3b, y 3c muestran la distribución de esfuerzos equivalentes (esfuerzos von Mises) para el caso de una tubería

que se encuentra sometida a la presión de operación de 5.91 kg/cm<sup>2</sup>. Se estudiaron tres casos, los cuales se muestran en la tabla 1. Los esfuerzos fueron medidos en la vecindad del barreno y en el extremo del tubo. Los casos estudiados corresponden a: a) el espesor nominal de la tubería, donde no se tiene ninguna disminución del espesor; b) y c) se considera una disminución del espesor de la tubería en un 25% y 50%, respectivamente. Se observa que en el extremo del tubo los esfuerzos varían de 128.246 kg/cm<sup>2</sup> a 249.014 kg/cm<sup>2</sup>, lo cual no es muy demandante para el caso de la tubería analizada. Sin embargo, en la vecindad del barreno en la condición más crítica, el esfuerzo alcanzado es de 1 204.000 kg/cm<sup>2</sup>, esto demuestra el efecto de la concentración de esfuerzos debida al barreno. El esfuerzo von Mises se usa para estimar el esfuerzo a partir del cual un material dúctil fluiría. El punto de referencia es la resistencia a la tensión de un material cargado uniaxialmente [9 y 10]. En todos los casos los esfuerzos encontrados son menores al esfuerzo resistente del material ( $F_y = 3\ 643\ \text{kg/cm}^2$ ).

#### 4.1 Análisis de consecuencias

Ahora bien, éste es el análisis de un evento posible como una explosión de vapores producto de la expansión de líquidos en ebullición (BLEVE, *Boiling Liquid-Expanding Vapour Explosion*), o explosiones en espacios confinados y no confinados involucrando fluidos inflamables, así como las ondas de sobrepresión generadas y su radiación, empleando para ello algoritmos matemáticos (modelos) para predecir la extensión real (consecuencias) del caso de estudio [11].

El modelo de consecuencias, es el término aplicado al uso de ecuaciones matemáticas (modelos), para predecir la extensión real (las consecuencias), de los riesgos que representan accidentes supuestos. Los accidentes típicos incluidos en un análisis de consecuencias de una instalación que maneja hidrocarburos, se indican a continuación:

**Incendios** que involucran el relevo de fluidos inflamables (incendio en recipientes, incendios de fluido a chorro e incendios por *flasheo*).

**Explosiones** (en espacios confinados y no confinados), que involucran fluidos inflamables.

Los riesgos de interés que representan los accidentes antes citados incluyen los agentes siguientes:

*Energía térmica.* Exposición a la energía térmica producida por incendios debidos a *flasheo* (incendios de nube de vapor), incendio en recipientes e incendio de fluidos a chorro.





**Fig. 4.** Trazo del D.D.V. para el poliducto de 12" de diámetro nominal (Minatitlán-Villahermosa) y especificación API-STD-5L, Grado X-52, estado de Tabasco.

*Sobrepresiones explosivas.* Exposición a las ondas de sobrepresión generadas por explosiones en espacios abiertos.

*Explosiones.* Exposición a proyectiles (fragmentos del recipiente contenedor del hidrocarburo) producidos por una explosión.

Para cada riesgo listado con anterioridad, puede haber varios «niveles de riesgo» de interés, dependiendo de las condiciones del entorno en que ocurre y además las características químicas del hidrocarburo de que se trate. Esto ha permitido a los analistas desarrollar relaciones entre estos riesgos y sus efectos potenciales sobre el entorno y la gente.

Los riesgos seleccionados para este caso de estudio son aquellos que pueden causar lesiones o incluso la muerte a las personas expuestas a dicho riesgo.

**4.2.1. Programa utilizado para el modelado de consecuencias**

El programa usado para realizar la modelación de consecuencias es el PHAST (*Process Hazard Analysis Software*

*Tools*). PHAST es un programa de cómputo de Det Norske Veritas, que tiene como objeto principal evaluar y optimizar la tecnología a fin de disminuir daños ambientales, pérdidas de vidas y financieras.

PHAST permite predecir las consecuencias de inflamabilidad y toxicidad a partir de descargas atmosféricas de diseño y rutinarias, descargas atmosféricas accidentales de materiales peligrosos. Además permite que los diagramas de pétalos, representativos de los efectos de las consecuencias sean sobrepuestos en mapas y otros tipos de gráficas (figura 5).

**4.2.2 Descripción del sistema de poliducto analizado**

El poliducto de 12" considerado para el análisis, fue tendido en el año de 1980 con las características indicadas en el punto 4.1, se encuentra localizado en el estado de Tabasco y el D.D.V. (derecho de vía) atraviesa zonas urbanas de ciudades, entre ellas la ciudad de Cárdenas, seleccionada en este estudio para la modelación de un evento hipotético de falla (fuga y explosión de gasolina por toma clandestina), con las siguientes condiciones climáticas:

- Temperatura máxima extrema promedio anual: 33.6 °C
- Temperatura del suelo: 35°C
- Velocidad máxima de los vientos reinantes: 20. 2 m/s
- Humedad relativa media anual: 66%
- Humedad relativa: 90%
- Presión atmosférica: 760 mm Hg
- Dirección de los vientos reinantes: no
- Dirección de los vientos dominantes: no

Los datos anteriores del sitio fueron tomados de hojas estándar de Pemex, Gerencia de Proyectos y Construcción de octubre de 1980.

Las condiciones de operación para el poliducto de 12" son: Producto gasolina Pemex **Premium**, temperatura del fluido 35°C, presión de llegada, 84 psi para la ciudad de Cárdenas. flujo manejado, 47 200 barriles/día.

La figura 4 muestra el trazo del poliducto de referencia, y el evento a modelar muy próximo a la ciudad de Cárdenas, el cual fue elegido para el caso hipotético de falla.

### 4.2.3 Consideraciones para la evaluación de consecuencias del caso hipotético de falla

Los sistemas de emergencia del poliducto de 12" para el control de sus válvulas es manual en la mayoría de las instalaciones superficiales, esta situación impacta directamente en la efectividad y tiempo de respuesta ante una emergencia.

Para efecto de la simulación de ruptura catastrófica se eligió un tramo del poliducto, por ejemplo, entre dos válvulas de seccionamiento, y se consideró como si fuera un recipiente, se tomó su longitud y diámetro del mismo. Se calculó el volumen de dicho tramo y con la densidad de la gasolina tipo *Premium* se cuantificó el inventario en kilogramos de la sustancia, la cual está sujeta a la simulación.

Los tiempos de emisión de fuga varían en función a dos factores:

**Tabla 2.** Resultados de dispersión (distancia-concentración).

Localidad	Máxima distancia para una concentración de 270 ppm (m)	Tiempo promedio (s)	Concentración en (mol ppm)		
			100	500	1000
Cárdenas	3 815	1 800	607 132	81 614	21 837

**Tabla 3.** Resultados de distancias máximas (m) para distintos niveles de radiación.

Localidad	Máxima distancia a una intensidad de radiación de 450 BTU/hr/pe <sup>2</sup> (1.4 kW/m <sup>2</sup> )	Distancia en metros para los siguientes niveles de radiación BTU/hr-pe <sup>2</sup> (1.4 kW/m <sup>2</sup> )	
		3 964.8 (12.5)	11 894.6 (37.5)
Cárdenas	1 413	509.5	214.7

1. Tiempo de traslado del personal del sector encargado, considerando que el vehículo de traslado se encuentre disponible y con posible tráfico vehicular o difícil acceso al lugar de la emergencia.

2. Toma de medidas o acciones que eviten la liberación de la gasolina.

El accidente modelado consistió en considerar que durante las actividades ilícitas de una toma clandestina, se pierde el control del robo de combustible, y consecuentemente se originaría una explosión.

Las consideraciones para este evento son las siguientes:

- I. Perforación del ducto por toma clandestina.
- II. Diámetro de fuga de 8 a 10% con respecto al diámetro total de la tubería, considerando el daño por toma clandestina.

En las tablas 2, 3 y 4 se muestra: la masa relevada (412 200 kg) y el tiempo de fuga (30 min.), los radios de afectación y las concentraciones (en ppm), los radios de afectación para diferentes intensidades de radiación (kW/m<sup>2</sup>), y los radios de afectación por sobrepresión (psi) respectivamente.

La fig. 5, muestra los resultados gráficos de los grados de afectación (dispersión) de la simulación de una toma clandestina en el poliducto de 12" de diámetro, en la zona urbana de la ciudad de Cárdenas, estado de Tabasco.

**Tabla 4.** Resultados de los cálculos de explosión.

Localidad	Masa inflamable de la nube (kg)	Distancia máxima a una sobrepresión de:		
		0.5 psi (0.0345 bar)	2.0 psi (0.1379 bar)	3.0 psi (0.2068 bar)
Cárdenas	412 200	1 640.0	629.2	486.8

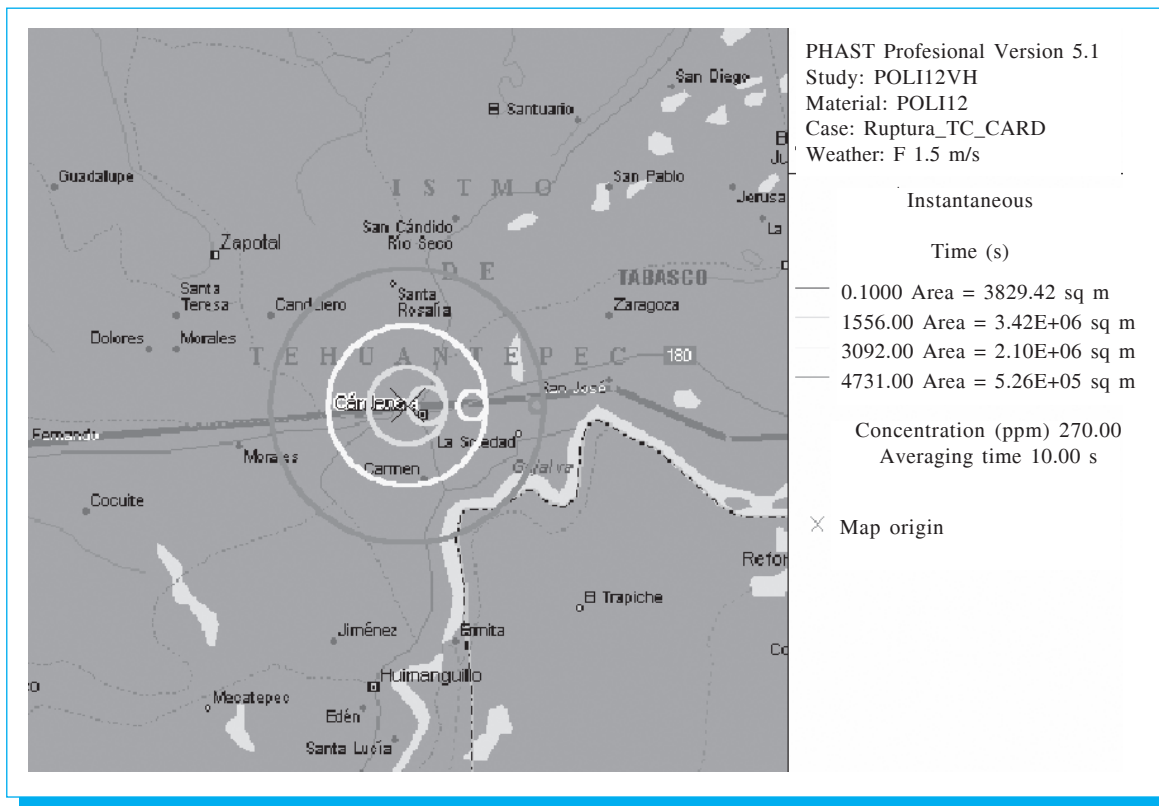


Fig. 5. Gráfica de resultados de: dispersión de una toma clandestina en el poliducto de 12" de diámetro en ciudad Cárdenas, estado de Tabasco.

#### 4.2.4 Evaluación de las consecuencias de la hipótesis de accidente

Para efecto de las simulaciones de ruptura catastrófica se eligió el tramo del poliducto, en las proximidades de la ciudad de Cárdenas, y está referenciado entre la trampa de envío de diablos Nudo Cárdenas (km 130 + 956) y la válvula de seccionamiento Castañito (km 140 + 362). Este tramo se ha considerado como si fuera un recipiente, con una longitud de 9 406 m y diámetro de 12". Posteriormente, se ha calculado el volumen de dicho tramo y con la densidad de la gasolina tipo *Premium* (749.8 kg/m<sup>3</sup>), se obtiene el inventario en kilogramos (412 220.80 kg, al 80% de la capacidad del poliducto).

La áreas dentro de las curvas (con los valores de 0.5, 2.0 y 3.0 psi), podría resultar afectada por sobrepresiones de esta magnitud o aún mayores si la nube de vapor explotara bajo las peores condiciones del viento, y que de igual manera se pueden ocasionar el lanzamiento de proyectiles.

Se debe aclarar que la figura 5 muestra únicamente los radios de afectación para la dispersión de la gasolina. De manera análoga se generan gráficas para los radios de afectación por radiación y sobrepresión no incluidos en el trabajo por cuestiones de espacio.

También se muestra, en la figura 5, la extensión máxima predicha de los niveles de peligro del escenario correspondiente a la fuga de gases o vapores de gasolina tipo *Premium*, analizado en este estudio. Dicha figura 5 indica que las emisiones identificadas tendrían impacto sobre la infraestructura urbana o asentamientos humanos.

### 5 Análisis de resultados

#### 5.1 Análisis de resultados de la evaluación mecánica

De los resultados obtenidos se puede notar que la situación de concentración de esfuerzos podría provocar una falla de la tubería al momento de efectuar los trabajos de la toma

clandestina, sobre todo tomando en cuenta que en tales operaciones ilegales el control de calidad y maniobras efectuadas distan mucho de evitar el daño a la tubería. Se debe resaltar que se han presentado muchos accidentes durante esta etapa, los cuales se han asociado a operaciones erróneas durante el proceso de instalación de la toma clandestina.

La concentración de esfuerzos se ve incrementada cuando existe corrosión en la tubería. Se ha observado que en la zona sur (estado de Tabasco) la corrosión reduce en un 25%, 50% y hasta 75% de espesor inicial (de acuerdo a los resultados de inspección interior por medio de diablos instrumentados practicados en poliductos). Al realizar análisis numéricos al sistema tubería-toma clandestina se encontró que la concentración de esfuerzos con respecto al tubo sin barreno, es del 403%, y para una reducción de 25% del espesor inicial (espesor de 0.1875"), es del 566%. Sin embargo, para una reducción del 50% del espesor esta concentración alcanza un esfuerzo de 1 204 kg/cm<sup>2</sup> (939%). Por lo tanto, la colocación de una toma clandestina en una zona donde existe corrosión severa podría conducir a una falla de la tubería y por lo tanto un accidente inminente bajo ciertas condiciones ambientales dadas.

## 5.2 Análisis de resultados del modelo de consecuencias

Las tablas presentadas anteriormente (2, 3 y 4) resumen los resultados de las modelaciones de:

- Descarga (liberación de producto) y dispersión.
- Modelación de inflamabilidad, reportando principalmente los niveles de radiación.
- Modelación de explosión, reportando los niveles de sobre-presión.

Para las zonas de afectación se asegura que cualquier persona que se encuentre dentro del alcance de las mismas, sufrirá lesiones e incluso la muerte, lo cual no sucederá para aquellos que estén afuera de esta zona.

### 5.2.1 Modelo de descarga

En los resultados del modelo de descarga se reporta la masa relevada, esta cantidad es propuesta por el usuario. El flujo de relevo es calculado por el programa. Este flujo es dependiente tanto del diámetro del orificio de la fuga, como de la presión del sistema analizado y del tiempo de fuga, entre otros.

### 5.2.2 Modelo de dispersión

En los resultados se indican valores de distancia contra concentración. Para el sistema del poliducto de 12" de

diámetro nominal Minatitlán-Villahermosa. Los efectos en la salud por exposición a este tipo de sustancias, como la gasolina, causa molestias en los ojos, provoca sensación de quemadura grave, con irritación temporal e hinchazón de los párpados. La concentración de vapores entre 160 y 270 ppm en el aire irrita los ojos. Las distancias donde se podrían presentar estos valores son 3 815 m para el caso de la ciudad de Cárdenas, Tabasco.

Se observa que el escenario con mayores consecuencias por dispersión de gasolina, sería el que corresponde a: la hipótesis de posible ruptura catastrófica debido a trabajos ilícitos de toma clandestina y pérdida de espesor mayor al 50% por efecto de corrosión.

### 5.2.3 Modelo de inflamabilidad (niveles de radiación)

Los resultados de la tabla 3 muestran las distancias máximas a las cuales se tiene una intensidad de radiación de 450 BTU/hr-pie<sup>2</sup> (1.4 kW/m<sup>2</sup>), que de acuerdo al API-521, el tiempo de exposición necesario para alcanzar el umbral del dolor a esta radiación es de 60 a 80 segundos aproximadamente.

En el caso de suceder este escenario, las personas que se encuentren a dicha distancia, si permanecen más de 60 segundos sufrirán dichos efectos. Además, se obtienen los siguientes datos:

1. El nivel de radiación de 4.0 kW/m<sup>2</sup> (1 268.8 BTU/hr pie<sup>2</sup>), no incluido en la tabla 3, es suficiente para causar dolor al personal si éste no puede protegerse en 20 segundos; sin embargo, es factible la formación de ampollas en la piel (quemaduras de segundo grado); o muerte.
2. El nivel de 12.5 kW/m<sup>2</sup> (3 964.8 BTU/hr pie<sup>2</sup>) es la energía mínima requerida para la ignición de la madera, fundición de la tubería de plástico, el tiempo de exposición necesario para alcanzar el umbral del dolor es de cuatro segundos (estos datos de radiación térmica son efectos observados y tomados de World Bank, 1994).
3. Finalmente, el efecto observado para un nivel de radiación de 37.5 kW/m<sup>2</sup> (11 894.6 BTU/hr pie<sup>2</sup>), es suficiente para causar daño a equipo de proceso, además de prender la madera por exposiciones prolongadas.

### 5.2.4 Modelos de explosividad (niveles de sobre-presión)

En la tabla 4, se muestra la extensión máxima a los niveles de sobre-presión explosiva (0.5, 2.0 y 3.0 psi) para los diferentes escenarios.



Los valores hallados en el área bajo la curva podrían conducir a colapsos parciales de techos y paredes de construcciones, deformación de armazones de acero de edificios revestidos, destrucción de asbesto corrugado, etcétera.

El significado y daños que produce una sobrepresión de 0.3 psi son: rotura de ventanas grandes y pequeñas normalmente estrelladas. A partir de valores de sobrepresión de 0.95 psi, pueden ocurrir daños ocasionales a marcos de puertas, lanzamiento de proyectiles y la probabilidad de que ocurran daños serios.

## 6. Conclusiones

La propuesta metodológica planteada consiste básicamente en la aplicación de dos técnicas para evaluar los efectos que son generados por terceros en perjuicio de la integridad física del sistema de poliductos en el país. La primera tiene que ver con la aplicación del método del elemento finito para evaluar el estado de esfuerzos y los consecuentes riesgos de falla de la tubería al practicarle una toma clandestina. La segunda consiste en simular casos hipotéticos de falla para determinar las zonas de riesgo a lo largo de los derechos de vía y particularmente en áreas pobladas.

Derivado de los resultados obtenidos, se puede concluir lo siguiente:

Primero, se deberán realizar sistemáticamente estudios de este tipo para obtener un diagnóstico real del estado que guarda la integridad mecánica de los ductos y particularmente los poliductos de Pemex-Refinación, que alerte a la administración correspondiente del posible riesgo potencial presente en los sistemas de poliductos. Deberán monitorearse los espesores remanentes de poliductos en aquellas tuberías con evidencias de corrosión severa.

Segundo, aquellas tuberías con desgastes de espesor de entre el 25 y 50% e inclusive mayores, deberán ser sujetas a una mayor y mejor vigilancia en los derechos de vía, porque son, de acuerdo a los resultados obtenidos en este estudio, las más vulnerables de sufrir una eventualidad por la práctica de tomas clandestinas, en virtud de que la concentración de esfuerzos aumenta hasta casi 10 veces.

Tercero, los estudios de consecuencias ayudarán a la gestión del mantenimiento y a optimizar los recursos humanos, económicos,

tecnológicos, ambientales, sociales, de seguridad y protección entre otros, en todos aquellos sistemas de poliductos identificados bajo riesgo "crítico" por sus condiciones reales de trabajo.

Cuarto, la propuesta metodológica planteada en este trabajo cobra gran interés para los especialistas en estudios de análisis de riesgos, en virtud de los casos recurrentes de tomas clandestinas que se practican en el país.

Por lo tanto, deberán identificarse los tramos con desgastes importantes de espesor del poliducto y establecer un programa integral de sustitución de tramos dañados y vigilancia de los DDV, por instancias de Pemex y policíacas correspondientes en el territorio nacional, que eviten fugas y eventos catastróficos en los sistemas de poliductos del país.

## 7. Referencias

- [1] Olivera-Villaseñor, R. E. y Rodríguez-Castellanos, A. «Estudio del riesgo en ductos de transporte de gasolina y diesel en México». *Científica*, vol. 9 núm. 4, 2005.
- [2] *El Heraldo de México*, 16 marzo 2004, fuente de Notimex.
- [3] *Procuraduría Federal de Protección al Ambiente «PROFEPA»*. *Subprocuraduría de Auditoría Ambiental*. Dirección General de Auditoría del Riesgo Ambiental y Prevención de Accidentes. 2001.
- [4] *Anuario Estadístico de Pemex*, p. 29. 2005.
- [5] *El Universal*, 28 de enero de 2005.
- [6] *Boletín de Pemex*, Septiembre, 2004.
- [7] R. C. Hibbeler, *Mecánica de materiales*, 3ª ed. Prentice Hall Hispanoamericana, Atlacomulco, Méx., 1998.
- [8] ANSYS, *Reference manual*, ANSYS Company, 2005.
- [9] Chandrupatla T. R. y Belegundu A. D. *Introducción al estudio elemento finito en ingeniería*. 2ª ed., Pearson, Naucalpan de Juárez Estado de México, 1999.
- [10] Simonsen, B. C. y Törnqvist, R. «Experimental and numerical modelling of ductile crack propagation in large-scale shell structures». *Marine Structures*, vol. 17, Issue 1, pp 1-27 January-February 2004.
- [11] Santamaría-Ramiro, J.M. y Braña-Aísa, P.A., *Análisis y reducción de riesgos en la industria química*. pp 87-155. 1996.
- [12] Iturbide, Rosario; Flores, Rosa Ma.; Flores, Carlos andn Torres, Luis G. Clean up levels at an oil distribution and storage station in eastern central Mexico determined from a health risk assessment. *Int. J. Environment and Pollution*, vol. 26, No. 1,2,3, 2006.

# Científica



**Es una revista trimestral que ha  
cumplido 10 años de publicación  
sin interrupciones.**

**Se distribuyen en el ámbito nacional aproximadamente  
600 ejemplares en universidades, instituciones  
y centros de investigación públicas  
y 150 revistas en instituciones  
educativas privadas.**

**Llegan más de 100  
ejemplares a diferentes  
industrias de la República.**

**Llega también de manera constante a instituciones de  
Estados Unidos, Japón, Argentina, Chile, Cuba,  
España, Rumania.**

**Instituto Politécnico Nacional**  
**Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica**

revista  
**Científica**

**CUPÓN DE SUSCRIPCIÓN**

Nombre: \_\_\_\_\_  
Dirección: \_\_\_\_\_  
Ciudad: \_\_\_\_\_ Estado: \_\_\_\_\_  
CP.: \_\_\_\_\_ Teléfono(s): \_\_\_\_\_  
Correo electrónico: \_\_\_\_\_  
Institución o empresa: \_\_\_\_\_

Publicación trimestral  
Suscripción por 1 año \$ 300.00

Deposite en cualquier sucursal del banco BBVA Bancomer a la cuenta  
núm. **13403195-4** a nombre de la **Escuela Superior de Ingeniería  
Mecánica y Eléctrica (ESIME-Unidad-Zacatenco)**  
y envíe un facsímil de este cupón con sus datos en forma legible.  
Posteriormente comuníquese por teléfono o correo electrónico  
para verificar que su solicitud de suscripción fue debidamente registrada.

Edificio 1, planta baja, Dirección,  
Unidad Profesional Adolfo López Mateos  
Col. Lindavista, CP 0738, México, DF.  
Tel. 5729 6000 ext. 54518,  
Fax 5586 0758  
revcientsimez@ipn.mx

# Indicaciones para los investigadores que deseen publicar en la revista Científica



## Estructura de los artículos

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
2. Abstract
3. Introducción
4. Desarrollo
5. Conclusiones
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 de los autores, la dirección de la institución a la cual pertenecen, el teléfono, fax y correo electrónico (de contar con ellos).

## 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 si el artículo está en español o viceversa. Éste aparece inmediatamente después del resumen en inglés o español, según sea el caso.

## 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. Es la parte medular y está compuesta por el planteamiento del problema y análisis del mismo, mencionando los materiales, métodos y técnicas. Las subdivisiones de este apartado se dejan al criterio del autor.

## Conclusiones

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.

## 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 sobre el formato general

Para obtener la mejor calidad al realizar la edición de los manuscritos en el formato de la revista, se recomienda que: *a)* el texto se capture en un procesador de textos (*word*); *b)* el tipo de letra del texto sea *Times* de 10 puntos, en una página con márgenes superior e inferior y derecho de 2.5 cm, margen izquierdo de 3 cm a dos columnas con espaciado de 0.77 cm entre ellas; *c)* las ecuaciones y fórmulas numeradas para mayor claridad, acrónimos y abreviaciones deben definirse la primera vez que sean usados en el texto; *d)* 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; *e)* las figuras y tablas en el documento deben 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). De antemano gracias.

# Information for Authors Submitting Papers to Científica Journal



The manuscript must be prepared in following a Camera Ready format with all its section numbered starting with the abstract, as shown below:

1. **Abstract**
2. **Resumen (Spanish abstract if it is possible).**
3. **Body of the manuscript**
4. **Reference list**
5. **Acknowledgements if any**
6. **Reference list**
7. **Appendix if any**

## 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. Below the authors names must be written the affiliation including the address quality, fax, telephone number or 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.

## 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 is any, together with a Conclusions Section.

## Format

All manuscripts must be written in letter size paper, only by one side, with the following requirements. *a)* It is recommended that, if possible, the text be written using a word processor. *b)* The text must be written in two columns with a separation between them of 0.77cm, using a 10 points Times font or similar, with lower, upper and right margins equal to 2.5 cm and left margin equal to 3.0 cm. *c)* All the equations must be numbered and written using an equations editor. *d)* All symbols or abbreviations must be defined the first time that they be used in the text. *e)* All figures must be inserted in the manuscript. *f)* All figures must be numbered and its captions must be inserted below them. It is strongly recommended to use, when it be possible, words instead of symbols in the graphic axis. The table captions must be inserted above the corresponding table. *g)* All pictures and scanned figures must be high quality pictures for proper reproduction.

## References

References must appear in the format given below. For multiple authors all family names and given names initials must be given. Titles of the journals must be all in lower case except the first letter of each journals. All references must be cited by number in brackets, in the order that they appear in the text.



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL  
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

**Científica:** LA REVISTA MEXICANA DE INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA

Unidad Profesional Adolfo López Mateos

Edificio 1, Planta baja, Dirección, Col. Lindavista, CP. 07738, Tel. 5729 600 ext. 54518, Fax 55860758  
email: [revistacientifipn@yahoo.com.mx](mailto:revistacientifipn@yahoo.com.mx)

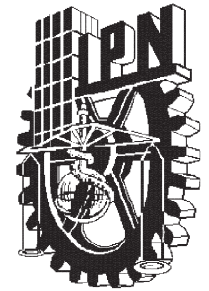




**El Instituto Politécnico Nacional  
y la Escuela Superior de Ingeniería  
Mecánica y Eléctrica  
publican**

# Científica

LA REVISTA MEXICANA DE  
INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA



**Publicación incluida  
en el Índice de Revistas  
Mexicanas de  
Investigación  
Científica y  
Tecnológica  
del CONACyT**

**Suscripciones  
y venta de  
ejemplares:**

**Edificio 1,  
primer piso,  
Dirección,  
ESIME Zacatenco,  
Unidad Profesional  
Adolfo López Mateos,  
Col. Lindavista,  
CP 07738,  
México, DF.**

**Tel. 5729 6000  
exts. 54518/54555  
email:  
revistacientifipn@yahoo.com.mx**

