

# Estudio del riesgo en ductos de transporte de gasolinas y diesel en México

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

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

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

Tel. (1) 55186597  
(2) 82834913

email: eolivera@imp.mx  
arcastel@imp.mx

Recibido el 10 de septiembre de 2004; aceptado el 23 de mayo de 2005.

## 1. Resumen

Se propone una metodología de análisis de riesgo operativo en poliductos debido a daños por terceras partes (tomas clandestinas), originados del hurto de gasolinas en ductos de Petróleos Mexicanos (Pemex).

La problemática se aborda desde una perspectiva global de accidentes en los ductos en el mundo, en los Estados Unidos de América y en México, después se trata específicamente el entorno que vive actualmente la industria de poliductos de Pemex-Refinación.

Del análisis y resultados obtenidos, se concluye que el factor de riesgo con mayor probabilidad de ocurrencia en poliductos, es debido a daños por terceras partes, en primer término, seguido de los daños originados por corrosión. Asimismo se hace un diagnóstico del grado de vulnerabilidad física de los derechos de vía de Pemex.

## 2. Abstract (Study of Risk in Gasoline and Diesel Transportation Pipelines in Mexico)

A methodology of risk operative analysis for damages, which are derived from theft of gasoline in Petroleos Mexicanos pipelines by third parts (clandestine pipes) is proposed.

Originally, the problematic is studied from the global perspective of pipelines accidents happened in the world, in United States of America and in Mexico, and later it approaches specifically the environment that the industry of Pemex-Refinery pipelines lives currently.

When the results are obtained, it is concluded that the factor of risk with more occurrence probability of pipelines, is due to damages for third parts, in first term, and followed by the damages originated by corrosion in second term. So a diagnostic is made of the physical vulnerability degree on the rights of way of Pemex.

**Palabras clave:** riesgo, accidente, poliducto, árbol de fallas.

## 3. Introducción

En años recientes, algunas causas fundamentales del incremento de accidentes en los poliductos de Pemex han sido: la inadecuada evaluación de los mismos y la falta de gestión para erradicar esta problemática [1], adicionalmente no hay una base de datos histórica de accidentes en ductos de transporte de hidrocarburos disponible de manera oficial en el país, estas circunstancias repercuten negativamente en la funcionalidad de ductos en México. La tabla 1, muestra las incidencias recientes de Pemex en el territorio nacional [2].

De la tabla 1 se obtiene un total de 1 675 emergencias. Los estados con mayor número de accidentes registrados en ese periodo destacan: Veracruz con 502 casos, Campeche y Tabasco con 419 y 391 casos, respectivamente. Entre estos tres estados se presenta casi el 80% del total nacional.

Una de las demandas del desarrollo económico de toda nación es la prestación de servicios en el transporte de hidrocarburos y sus destilados, además, que ésta se realice de manera

**Tabla 1.** Emergencias ambientales ocurridas en Pemex en el periodo 1997-2001. Análisis estatal [2].

| Estado de la República mexicana | Núm. de emergencias |
|---------------------------------|---------------------|
| Aguascalientes                  | 3                   |
| Baja California                 | 4                   |
| Baja California Sur             | 1                   |
| CampecheChiapas                 | 419                 |
| Chihuahua                       | 84                  |
| Coahuila                        | 3                   |
| Colima                          | 14                  |
| Durango                         | 0                   |
| Estado de México                | 14                  |
| Guanajuato                      | 10                  |
| Guerrero                        | 32                  |
| Hidalgo                         | 2                   |
| Jalisco                         | 26                  |
| Michoacán                       | 7                   |
| Morelos                         | 2                   |
| Nayarit                         | 1                   |
| Nuevo León                      | 0                   |
| Oaxaca                          | 14                  |
| Puebla                          | 43                  |
| Querétaro                       | 44                  |
| Quintana Roo                    | 4                   |
| San Luis Potosí                 | 0                   |
| Sinaloa                         | 0                   |
| Sinaloa                         | 10                  |
| Sonora                          | 6                   |
| Tabasco                         | 391                 |
| Tamaulipas                      | 35                  |
| Tlaxcala                        | 0                   |
| Veracruz                        | 502                 |
| Yucatán                         | 2                   |
| Zacatecas                       | 0                   |
| Zona Metropolitana              | 2                   |

oportuna, confiable, con un riesgo controlado, sin afectación a terceros y al medio ambiente, entre otros aspectos [3].

Esta investigación facilitará el desarrollo de estudios de riesgos, con una propuesta metodológica basada en árboles de falla y datos de accidentes ocurridos en poliductos. Para ello son identificados los factores de riesgos como lo establece Kent Muhlbauer [4], y la probabilidad de ocurrencia.

## 4. Desarrollo

### 4.1 Accidentabilidad de ductos en el mundo

Es difícil presentar una visión más o menos precisa de accidentes e incidentes registrados en ductos, ya que en ello intervienen muchas variables, como son: disparidad en los métodos de reporte, normatividad en tuberías, condiciones locales, personal

operativo calificado, vigilancia, regulación efectiva del uso del suelo. De acuerdo a una investigación realizada por la Agencia de Seguridad de Inglaterra [5], los accidentes más trascendentes (accidentes mayores) identificados en ductos construidos a nivel mundial durante el periodo de 1970 a 1995, dejaron la siguiente información: incidentes (500), lesionados (3 000), muertes (2 000) y países afectados (97).

Como se observa, quinientos incidentes arrojaron 2 000 muertes, 3 000 lesionados en casi un centenar de países afectados. El 53% de los incidentes reportados se suscitaron en ductos de gas natural, 18% con gas licuado de petróleo, 17% con crudo y 7% con gasolina.

También esta agencia determinó los tipos de fallas más comunes ocurridos en ese mismo periodo de 1970 a 1995, con los porcentajes siguientes: daños por terceras partes con el 31%, seguido de causas no identificadas con el 22%, asimismo, la tercera causa más importante correspondió a operaciones incorrectas (error humano, falla de equipo, entre otros) con el 19% de los datos compilados.

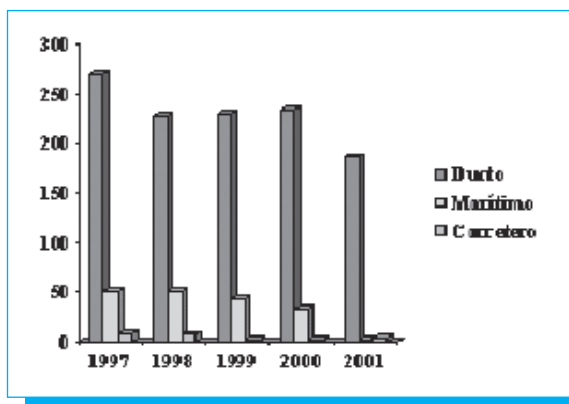
### 4.2 Accidentabilidad de ductos en Estados Unidos

El uso de tuberías de transporte en los Estados Unidos de América, ha crecido gradual y constantemente. Inicia en el año de 1920 con el uso de tuberías de alta presión. Al final de la Segunda Guerra Mundial ya existían más de 131 000 kilómetros de tuberías interestatales en el país. Actualmente la industria del transporte de hidrocarburos ha crecido de tal manera que existen más de 482 700 km de tuberías interconectadas en redes de recolección y distribución, que suministran energéticos a más de 160 millones de consumidores. Esta información es obtenida por la *Office of Pipelines Safety* (OPS) de los Estados Unidos de América [6].

Las estadísticas en cuanto a incidentes en ductos de transporte de hidrocarburos publicadas por la OPS del Departamento de Transporte en los Estados Unidos (DOT) para el periodo de 1986 a 2004, indican que se registraron 3 358 accidentes, 37 muertes, 255 lesionados y pérdidas económicas por más de 859 millones 704 mil 423 dólares. Siendo la corrosión y los daños por terceras partes, las causas 1 y 2 respectivamente, con mayor número de registros.

### 4.3 Incidentes mayores en ductos de transporte de Petróleos Mexicanos (Pemex)

El sistema de transporte por ductos en el país, consta de más de 55 000 km de tuberías dependientes de las cuatro



**Fig.1.** Emergencias ambientales asociadas con materiales peligrosos ocurridas en instalaciones de Pemex entre 1997-2001 [2].

subsidiarias que conforman Pemex, los fluidos transportados son: crudo, gasolinas, diesel, gas licuado, gas natural y productos petroquímicos, principalmente. Los diámetros de las tuberías varían desde 3" hasta 48" de diámetro, y comparten en gran medida los corredores de los derechos de vía (DDV's), donde se realizan las tareas y actividades de operación, mantenimiento e inspección principalmente [7].

Por otro lado, Profepa [2] monitoreó (durante el periodo comprendido entre los años de 1997 a 2001), los sistemas de transporte de hidrocarburos en tres diferentes medios, los cuales son: por ducto, marítimo y carretero, de donde se obtuvieron datos reveladores, mismos que se presentan en la figura 1.

Pemex-Refinación opera y administra los poliductos en el territorio nacional; además de procesar el petróleo crudo, elabora productos refinados y distribuye: gas licuado, gasolinas, turbosina, diesel, combustóleo y otros, mediante una red de ductos, entre los que se encuentran los poliductos.

Se muestra en la figura 2 una explosión por fuga de gasolina debido a una toma clandestina en un poliducto del sureste del país. Estas actividades ilícitas provocan afectaciones a la población y grandes pérdidas económicas [8].

Cabe destacar que las principales causas que originaron emergencias y produjeron consecuencias importantes en el país durante el periodo 1994 a 2003 fueron: derrames de producto, contaminación y afectaciones a terceros (población civil).

Los casos más significativos, con mayor número de registros de accidentes, son debidos a: tomas clandestinas (304 casos), corrosión (125 casos) y golpe mecánico (6 casos), entre los más importantes [9].

Una compilación de estos registros y otros más que se presentaron en los sistemas de poliductos instalados en los derechos de vía del país durante el periodo 1994-2003 se muestran en la tabla 2.

Como causa principal de emergencias en Pemex, se destaca el robo de gasolina que durante 30 minutos puede llegar a los 30 mil litros en una toma clandestina (según estiman los especialistas en el tema) y se identifica al registrarse una baja sensible en la presión de los instrumentos de medición que dura por varios minutos. En ese momento se inicia la búsqueda del incidente.

Consecuentemente, detectar los robos de combustibles al analizar los reportes finales de distribución, no es posible, explican los operadores, porque son tan pequeños que pueden confundirse con los estimados de pérdidas aceptables en el bombeo [8]. La figura 3 representa una toma clandestina típica en poliductos.

#### 4.4 Determinación de la probabilidad de falla en poliductos de Pemex-Refinación

Existen tres fuentes para obtener los datos de frecuencias, los cuales son: datos específicos del sitio, datos históricos genéricos y técnicas de predicción.



**Fig.2.** Fuga descontrolada de gasolina y explosión por toma clandestina en poliducto de 12" de diámetro, estado de Tabasco.

**Tabla 2.** Datos de accidentes en poliductos (1994-2003). Subdirección de Distribución. Gerencia de Transportación por Ducto. Subgerencia Ductos Sureste. Pemex-Refinación, 2004 [9].

| CAUSAS                            | AÑOS |    |    |    |    |    |    |    |    |    |            |
|-----------------------------------|------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|------------|
|                                   | 94   | 95 | 96 | 97 | 98 | 99 | 00 | 01 | 02 | 03 | ST         |
| Corrosión externa                 | 7    | 7  | 23 | 19 | 35 | 27 |    | 3  | 1  | 3  | 125        |
| Golpe mecánico                    | 2    | 1  |    | 1  |    |    |    | 2  |    |    | 6          |
| Falla de la soldadura transversal | 1    |    | 1  |    |    |    |    |    |    |    | 2          |
| Tomas clandestinas                | 9    | 21 | 45 | 7  | 46 | 51 | 35 | 37 | 45 | 8  | 304        |
| Golpe de ariete                   | 1    |    |    |    |    |    |    |    |    |    | 1          |
| Fisura por sobrepresión           |      |    | 1  |    | 1  |    |    |    | 2  |    | 4          |
| Falla de la abrazadera            |      |    | 1  |    |    | 1  |    |    |    |    | 2          |
| Material defectuoso               |      |    |    |    |    |    |    | 1  |    |    | 1          |
| Sobreesfuerzo x Mov. Terr.        |      |    |    |    |    |    |    | 1  |    |    | 1          |
| Fuga en la válvula                |      |    |    |    |    |    |    |    | 1  |    | 1          |
| Ruptura de monoblock              |      |    |    |    |    |    |    |    | 1  |    | 1          |
| <b>Total</b>                      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    | <b>441</b> |

Una de las fuentes más frecuentemente empleadas para determinar la probabilidad de falla en los análisis de riesgos y protección al ambiente, es la aplicación de técnicas de predicción, entre ellas está la metodología del árbol de fallas [10], con múltiples usos en la industria de procesos, en este trabajo se emplean las probabilidades de ocurrencia de los diferentes sucesos o incidentes que asocian a los factores de riesgos en el transporte de destilados de petróleo por poliductos. Estos sucesos son conectados mediante compuertas, como las usadas en álgebra booleana, y las reglas de aplicación son similares a las de dicha álgebra [11].

En el estudio es empleada la puerta "o", por ser la que mejor se ajusta al análisis, y que representa la unión de los eventos de entrada a la puerta para que el evento superior ocurra, y ésta es equivalente al símbolo booleano "+", la expresión genérica queda de la siguiente manera:

$$P(Q) = P(A) + P(B) - P(A \cap B) \tag{1}$$

ó

$$P(Q) = P(A) + P(B) - P(A) P(B/A) \tag{2}$$

Donde  $P(Q)$  es la suma de probabilidades de los eventos  $A$  y  $B$ . Así tenemos que  $Q = A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_n$ . Asimismo, para el caso de «terceras partes» se suman las probabilidades de: vandalismo, golpe mecánico y material defectuoso (figura 5).

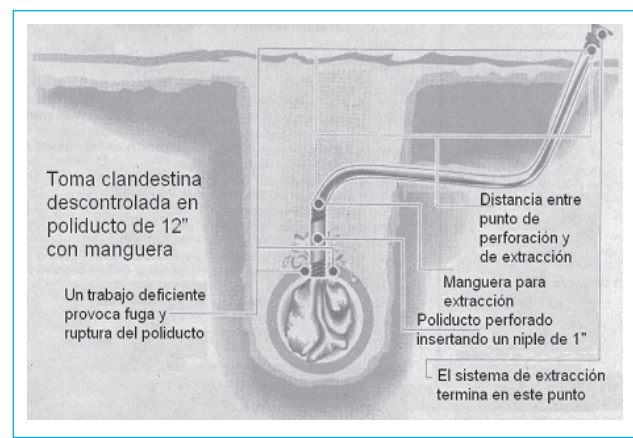
El método del árbol de fallas es un procedimiento deductivo (razonamiento que parte de lo general a lo específico), que se

enfoca a un evento indeseable y cuyo objetivo es determinar las causas que lo originan.

Otros datos relevantes de accidentes se indican en la tabla 3, particularmente para Pemex Exploración y Producción "PEP", y Pemex-Refinación "PR" que padecen en grado crítico esta desafortunada realidad.

#### 4.5 Estimación de frecuencia de falla

En este trabajo de investigación se utilizan los datos históricos genéricos de la tabla 2 (recabados en Pemex-Refinación



**Fig. 3.** Representación típica de una toma clandestina en poliductos [8].

**Tabla 3.** Datos sobresalientes de accidentes en Pemex, durante el periodo de 1997-2001 [2].

1. En instalaciones de Pemex ocurren el 57% de las emergencias ambientales que se presentan a nivel nacional con materiales peligrosos.
2. En tan sólo tres estados (Veracruz, Campeche y Tabasco) ocurren el 78.7% de todos los eventos relacionados con Pemex.
3. En las instalaciones de Pemex Exploración y Producción (PEP) y Pemex Refinación (PR) ocurre más del 90% de los eventos de Pemex.
4. En el caso de PR, la mayor parte de sus eventos ocurre, por orden de importancia, en ductos, refinерías y terminales de almacenamiento y distribución.
5. Los derrames en ductos de PR se deben, en orden de importancia, a tomas clandestinas, daños o averías provocadas por terceros y corrosión.

expresado para el sistema de poliductos) [9]. Cabe aclarar que ciertas técnicas son más apropiadas que otras dependiendo de las necesidades del caso.

Se debe destacar que en México, son requeridos estos estudios y con carácter obligatorio según la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente [12].

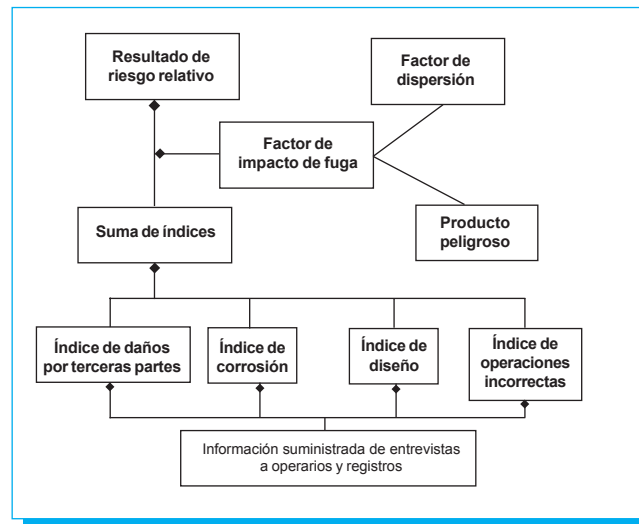
#### 4.5.1. Método para determinar la frecuencia de falla (árbol de falla)

El análisis de árbol de falla es un método de análisis con enfoques sobre un evento indeseable (en este caso los factores de riesgo operativos como la corrosión, daños por terceras partes, etcétera, que afectan al sistema de poliductos), el cual permite determinar las causas que lo originan. El evento indeseable constituye el punto superior en un diagrama de árbol de falla construido para el sistema y generalmente consiste del total de problemas que posiblemente se pueden presentar.

Durante la aplicación de la técnica fue necesario desarrollar las siguientes actividades:

Identificación y clasificación de los factores de riesgo asociados a la operación de los poliductos de acuerdo a la metodología de Muhlbaauer, K. [4], que define cuatro factores de riesgo, y son: corrosión, daño por terceras partes, diseño y operaciones incorrectas.

También durante la aplicación del árbol de fallas, se analizaron todas las posibles causas que originarán fallas en instrumentos



**Fig. 4.** El modelo básico de evaluación del riesgo de Muhlbaauer.

y equipos de cada uno de los sistemas de protección de los poliductos en servicio.

#### 4.5.2. Estimación de la probabilidad de falla de daños por terceras partes y corrosión

La probabilidad de falla se obtiene del número de fallas (tabla 2) entre el número de horas del periodo seleccionado (en este caso 10 años de 1994 a 2003). Entonces la probabilidad de falla por terceras partes está representada por la siguiente ecuación:

$$P_i = F_i / hr_i \quad (3)$$

Donde:

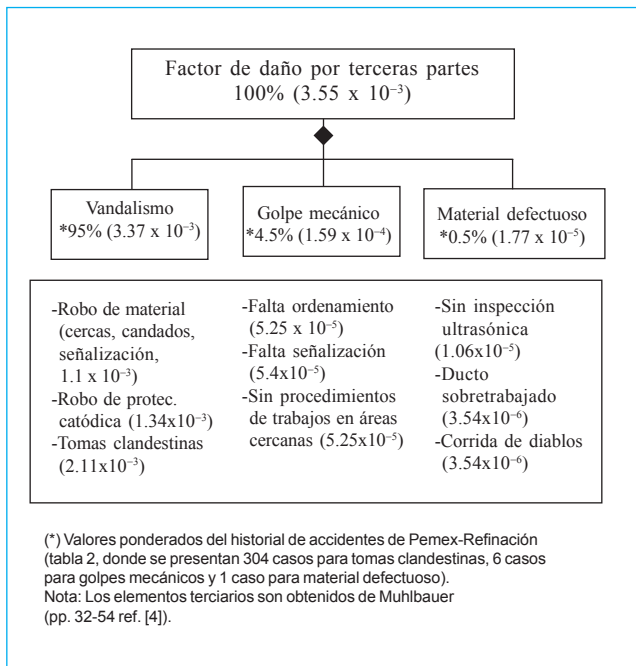
$$P_i = \text{probabilidad en el periodo } i \text{ (10 años)}$$

$$F_i = \text{casos de falla en el periodo } i$$

$$hr_i = \text{horas en el periodo } i.$$

Para el caso de la probabilidad de falla por daños de terceras partes, y aplicando la ecuación 3, se obtiene  $3.55 \times 10^{-3}$ , de igual manera, se obtuvo para la corrosión un valor de  $1.43 \times 10^{-3}$ . Los otros dos factores de riesgo no están incluidos (se muestran en este trabajo sólo los dos más importantes ya referidos).

En este estudio sólo se presenta el árbol de fallas del riesgo de daños por terceras partes, en virtud de que es el factor de riesgo con el mayor número de casos reportados.



**Fig. 5.** Árbol de falla para el factor de riesgo de daños por terceras partes.

*Factor de riesgo debido al daño por terceras partes* Muhlbauer [4]. Este factor está integrado por los elementos: vandalismo, golpe mecánico y material defectuoso. Cabe señalar que se parte de la identificación del riesgo principal (daño por terceras partes) y a continuación el análisis de los eventos secundarios y terciarios; siguiendo a Muhlbauer se construye el árbol mostrado en la figura 5, de esta manera se logran identificar todas aquellas causas raíz que originan el riesgo.

Se puede observar en la figura 5 que el valor de  $3.37 \times 10^{-3}$  de probabilidad obtenido para el evento secundario, *vandalismo* (de la suma de sus elementos o eventos terciarios, del que destaca el valor para tomas clandestinas) es el más alto, esto es debido al numeroso registro de tomas clandestinas reportadas en los ductos de Pemex-Refinación [13].

La incidencia de los factores de riesgo está en función del número de accidentes y su frecuencia anual en poliductos de Pemex-Refinación.

Del proceso realizado, y con base en la frecuencia de ocurrencia consultada, se tiene que la probabilidad de falla (fallas/hr),

para los factores de riesgo analizados, tiene los siguientes valores:

Las probabilidades de los factores de riesgo para terceras partes y corrosión son:  $3.55 \times 10^{-3}$ , y  $1.43 \times 10^{-3}$ , respectivamente.

Los factores de riesgo para operaciones incorrectas y diseño arrojan valores mucho menores y están fuera del alcance del trabajo.

El propósito principal de este trabajo de investigación fue determinar las probabilidades de ocurrencia de los factores de riesgo, en función de los datos históricos disponibles recabados en Petróleos Mexicanos para los sistemas de poliductos, y un diagnóstico de la vulnerabilidad física de los DDV del sistema de poliductos en el país.

## 5. Conclusiones

Prevalce en el país una problemática que se ha tornado crónica en los poliductos de Pemex-Refinación. Las estadísticas oficiales de accidentes y recurrencias más recientes lo corroboran. Ante este escenario, se puede concluir:

*Primero.* Derivado de los resultados obtenidos, subyacen cuáles son los riesgos más frecuentes, de tal suerte que se tienen los elementos de juicio para proponer acciones encaminadas a controlar las causas raíz (identificadas de la aplicación de la técnica de árbol de fallas) y establecer un orden de prioridades. Atendiendo inmediatamente las causas que originan los daños por terceras partes y, como segundo término, la corrosión. Éstos son los factores de riesgo que más intervienen en los accidentes documentados.

*Segundo.* Pemex deberá emprender grandes esfuerzos en la formación de recursos humanos capacitados en todos los ámbitos del quehacer diario. Invertir en insumos materiales y tecnológicos que permitan mejorar sustancialmente la integridad física de su sistema de ductos en todo el territorio nacional. La labor es verdaderamente titánica y para ello tendrán que participar también con responsabilidad los diferentes órganos: legislativo, judicial, fiscal y de la propia paraestatal para ofrecer un servicio de clase mundial en el sentido amplio del término.

*Tercero.* Se identifica un nicho de oportunidad interesante desde el punto de vista mecánico, para realizar estudios por especialistas en el tema y que tengan que ver con el comportamiento de los esfuerzos originados por los daños por terceras partes y el efecto de la corrosión.

*Cuarto.* Incrementar la vigilancia (mayor frecuencia en el celaje y modernización del equipamiento del personal) en los DDV y tender a disminuir eficazmente el grado de vulnerabilidad física en estas instalaciones del país a través de la automatización del monitoreo y equipos de seguridad.

## 6. Referencias

- [1] Sarmiento, T.M.R., Centro de Orientación para la Atención de Emergencias Ambientales, COATEA, Profepa, 2003.
- [2] Procuraduría Federal de Protección al Ambiente PROFEPA, Subprocuraduría de Auditoría Ambiental, Dirección General de Auditoría del Riesgo Ambiental y Prevención de Accidentes, 2001.
- [3] NFR-030-PEMEX-2003, Diseño, construcción, inspección y mantenimiento de ductos terrestres para transporte y recolección de hidrocarburos, 2003.
- [4] Muhlbauer, W. K., Pipeline Risk Management Manual, 1996.
- [5] Agencia de Seguridad de Inglaterra, 2000.
- [6] Office of Pipeline Safety, OPS, USA, 2004. (Web [http://ops.dot.gov/stats/1q\\_sum.htm](http://ops.dot.gov/stats/1q_sum.htm)). Acceso 12/08/2004.
- [7] Anuario Estadístico de Pemex, pp. 11, 23, 29,37, 2005.
- [8] Declaración de Cutberto Azuara Pavón al periódico *El Universal*, publicada el 11/junio/2001.
- [9] Datos de Accidentes de Pemex-Refinación, Subdirección de Distribución. Gerencia de Transportación por Ducto, Subgerencia Ductos Sureste, 2004.
- [10] Santamaría, J.M., Braña, P.A., *Análisis y reducción de riesgos en la industria química*, pp. 282-292, 1994.
- [11] Haasl D.F., Nuclear Regulatory Commission Washington, D.C., USA, 1981.
- [12] Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, Art. 5, Fracc. IV, Arts. 30, 145, 146 y 147, 2003.
- [13] *Boletín de Pemex*, 12/Nov./2003, :[www.pemex.com/index.cfm?action=content&sectionID=8&catID=40&subcatID=1376](http://www.pemex.com/index.cfm?action=content&sectionID=8&catID=40&subcatID=1376) accesada el 14 abril 2005.

## ESIME Zacatenco

La Coordinación del Piso de Pruebas  
para Transformadores de los  
Laboratorios Pesados II de Ingeniería Eléctrica  
cuenta con pruebas acreditadas  
que se encuentran al servicio de la industria nacional.

RESISTENCIA DE AISLAMIENTO

RESISTENCIA ÓHMICA

RIGIDEZ DIELECTRICA

TENSIÓN APLICADA

TENSIÓN INDUCIDA

ELEVACIÓN DE TEMPERATURA

IMPULSO

Tel. 5729 6000, ext. 54750  
correo electrónico: [piso\\_pruebas@hotmail.com](mailto:piso_pruebas@hotmail.com)