

# DetECCIÓN DE FALLAS EN LOS EQUIPOS ELÉCTRICOS DEL SISTEMA ARTIFICIAL, UTILIZADO PARA LA PRODUCCIÓN DE PETRÓLEO EN PLATAFORMAS MARINAS

*Vicente Vargas H., Inocente Rosales S. y Jorge Pimentel M.\**

Actualmente, PEMEX está utilizando nuevos sistemas artificiales de bombeo para la producción de petróleo, en específico el Sistema de Bombeo Electrocentrífugo (BEC). Sin embargo, durante la operación del Sistema BEC se han presentado problemas por la falla de sus componentes eléctricos, sobre todo del equipo instalado dentro del pozo. Las fallas han resultado con un costo elevado por la disminución en la producción y por los trabajos de mantenimiento correctivo.

El personal de mantenimiento cuenta con procedimientos para realizar pruebas de verificación del estado de los equipos eléctricos de fondo. Pero, en el caso de una falla eléctrica de los equipos, no se puede determinar su ubicación, dado que se instalan a 3,600 m del cabezal del pozo de producción.

De acuerdo con lo anterior, el Instituto de Investigaciones Eléctricas propuso la aplicación de la técnica de reflectometría en el dominio del tiempo, para complementar los procedimientos de mantenimiento. Ésta técnica es una herramienta de diagnóstico del equipo eléctrico muy útil, que ayuda en la toma de decisiones de las maniobras de mantenimiento preventivo y correctivo a seguir, con el consecuente ahorro de recursos.

## Introducción

**E**l sistema de bombeo electrocentrífugo (BEC) es una alternativa de sistemas de bombeo artificial de producción, sobre todo en los pozos que dejaron de fluir naturalmente, porque presentaron abatimiento de presión del yacimiento.

Sin embargo, durante la operación de este sistema de producción se han presentado frecuentes salidas por fallas, las cuales han resultado con un costo elevado, debido a la disminución en la producción y a los altos costos por mantenimiento.

Las fallas en el sistema BEC se han presentado principalmente, en los componentes del equipo de fondo, como son cables clase 5 kV y sus accesorios (empalmes y conectores), utilizados para interconectar el transformador elevador con el motor eléctrico de fondo.

## Sistema de bombeo artificial

Normalmente, la extracción de petróleo crudo se efectúa utilizando la presión misma del yacimiento, la cual hace que el petróleo emerja a la superficie a través del tubo de producción.

La fuerza de empuje viene de la energía natural de los fluidos comprimidos o almacenados en el yacimiento.



\* Activo Integral Canterell Pemex Exploración y Producción.

La declinación de la energía para que el pozo produzca, es el resultado de una reducción en la presión entre el yacimiento y la cavidad del pozo. Si la diferencia de presión entre el yacimiento y las instalaciones de producción de la superficie es lo suficientemente grande, el pozo fluirá naturalmente a la superficie, utilizando solamente la energía natural suministrada por el mismo yacimiento.

Cuando la energía natural asociada con el petróleo no produce una presión diferencial lo suficientemente grande entre el yacimiento y la cavidad del pozo, como para levantar los fluidos del yacimiento hasta la superficie y hacia sus instalaciones, o como para conducirlos con un volumen suficiente, entonces ésta debe ser incrementada por alguna forma de explotación artificial.

Una de las formas de explotación artificial de uso más generalizado es el bombeo neumático. Esta técnica se basa en la inyección de gas o agua a presión en los pozos, para lograr impulsar el petróleo hasta la superficie, pero tiene el inconveniente de que cuando la extracción se ha realizado durante mucho tiempo, o cuando la presión natural del crudo es demasiado baja y adicionalmente, la relación agua/petróleo o gas/petróleo se ha incrementado (en otras palabras mucho gas inyectado, poco petróleo extraído), es entonces cuando el pozo se considera como *"no-factible para producción"* (Wong, 1989).

Considerando la problemática que implica que el pozo ya no sea factible de explotar, se han desarrollado nuevas técnicas de bombeo, las cuales están basadas en la utilización de bombas electrocentrífugas, accionadas por medio de motores eléctricos de velocidad variable. Esta opción de bombeo es de especial importancia, por las ventajas que brinda para manejar la extracción de crudo y se considera un medio económico y efectivo para levantar grandes cantidades de fluido desde grandes profundidades y en diversas condiciones del pozo.

La principal ventaja del bombeo electrocentrífugo es que se pueden explotar pozos que ya eran considerados de baja factibilidad para su explotación, ya que con este sistema vuelven a producir de manera exitosa y a un bajo costo. Otra de sus ventajas es la factibilidad para variar las condiciones de operación de la bomba electrosumergible, para tener flexibilidad en la producción, debido a que la cantidad de crudo extraído es controlada por la velocidad de la bomba.

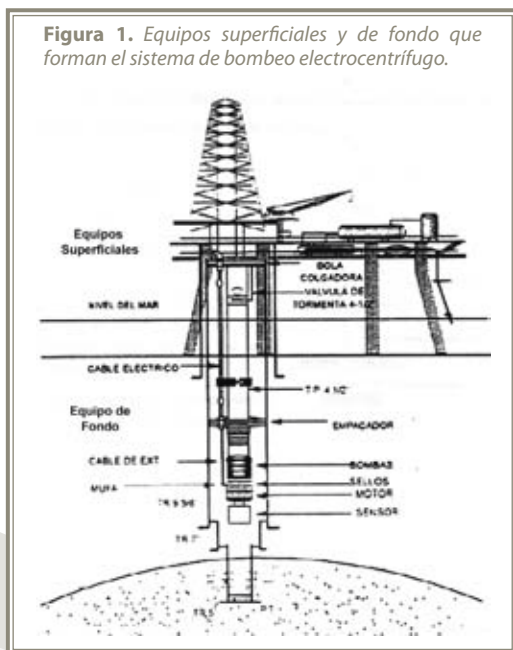
Un sistema de bombeo electrocentrífugo puede instalarse en un pozo localizado en tierra o en una plataforma marítima. Los componentes de un sistema BEC se clasifican de acuerdo con su localización física, de la siguiente forma:

- Equipos superficiales: son los que se encuentran localizados en la superficie, ya sea en tierra o en una plataforma marítima. Entre estos equipos se encuentran los generadores y transformadores eléctricos, el variador de velocidad, interruptores, válvulas de retención y drenaje.
- Equipos de fondo: son aquellos que se encuentran localizados en la cavidad del pozo, como puede ser la motobomba, el cable de alimentación o de fondo, el separador de gas rotativo y las partes que constituyen la tubería de extracción.

En la Fig. 1 se muestran esquemáticamente, los equipos que forman un sistema de bombeo electrocentrífugo, implementado en una plataforma marina. Normalmente, la profundidad de los pozos o del yacimiento de petróleo es mayor a los 3,000 m.

De la Fig. 2 a la Fig. 4 se muestra el ensamble e instalación de algunos de los componentes del equipo de fondo.

**Figura 1.** Equipos superficiales y de fondo que forman el sistema de bombeo electrocentrífugo.



**Figura 2.** Instalación de empalme del cable de potencia, que interconecta el transformador elevador con la motobomba electrocentrífuga.



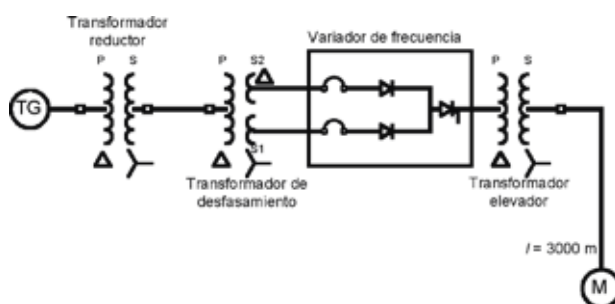
**Figura 3.** Motobomba electrocentrífuga ensamblada con el sensor de las condiciones de presión y temperatura del yacimiento, además de la tubería de producción, antes de instalarse en el pozo.



**Figura 4.** Vista de la torre de mantenimiento durante las maniobras de instalación en el pozo de la tubería de producción y de la motobomba electrocentrífuga.



**Figura 5.** Esquema eléctrico del sistema BEC y los equipos principales que lo conforman.



### Esquema eléctrico y equipos principales

El circuito eléctrico del sistema BEC y los equipos principales que lo forman se muestran en la Fig. 5.

La motobomba de fondo se instala en el pozo, a una profundidad mayor a los 3,000 m, por lo tanto, para suministrar la energía eléctrica para la operación de la misma, se requiere un cable de potencia que la interconecte con el transformador elevador.

### Diagnóstico del sistema de bombeo artificial

Durante la operación del sistema de bombeo electrocentrífugo se han presentado serios problemas, los cuales están relacionados con el funcionamiento de los equipos eléctricos. Esto ha incrementado notablemente la salida de operación de los pozos, haciendo que la confiabilidad del sistema disminuya notablemente.

Las fallas en el sistema BEC se han presentado en los componentes del equipo de fondo, como son los cables de potencia y de extensión, y sus accesorios (empalmes y conectores), utilizados para interconectar el transformador elevador con el motor eléctrico.

Durante su operación, los equipos de fondo se ven expuestos a la combinación de esfuerzos eléctricos, mecánicos y térmicos, que los van deteriorando paulatinamente hasta su falla.

Desde el punto de vista eléctrico y térmico, los equipos de fondo se ven sometidos a los esfuerzos generados por la operación de los variadores de velocidad. Debido a su tecnología de diseño y fabricación, durante la operación de los variadores se generan ondas de voltaje y corriente no senoidales.

Estas ondas están contaminadas con armónicos y transitorios, lo cual impacta la operación de los equipos de fondo (Bonnett, 1996).

Los armónicos y los transitorios que ocurren durante la operación de los variadores, provocan calentamiento y sobrevoltajes por la resonancia del circuito, los cuales deterioran paulatinamente el aislamiento de los equipos de fondo, hasta la ocurrencia de su falla.

Otro esfuerzo eléctrico presente en la operación de los equipos de fondo y que puede envejecer prematuramente el aislamiento, es el voltaje reflejado, cuya magnitud depende de la longitud del cable que interconecta el motor, con el variador de velocidad. De acuerdo con la teoría clásica de líneas de transmisión, la reflexión de voltaje repercute en las terminales del motor y puede alcanzar hasta dos veces el voltaje normal de operación (2.0 p.u.). La impedancia de un motor de inducción es principalmente inductiva y a las altas frecuencias de conmutación generadas por el variador, se comporta como un circuito abierto. Por tal motivo existe la probabilidad de que una onda de voltaje incidente, viajando a las terminales del motor y dependiendo de su magnitud, pueda ocasionar severos daños a los aislamientos.

Desde el punto de vista mecánico, el equipo de fondo se ve sometido a esfuerzos anormales que se presentan, por el bloqueo de la flecha de la motobomba.

Debido a que los pozos de producción de petróleo tienen unos 25 años explotándose, los niveles originales de los yacimientos han disminuido, provocando que las paredes de las cavernas que los contienen queden parcialmente al descubierto. Por tal motivo y aunado al tipo de materiales que las forman, existe una mayor probabilidad de que se originen deslaves de las paredes de las cavernas, trayendo como consecuencia el bloqueo mecánico de la flecha de la motobomba por atascamiento. En el caso de presentarse este problema, el equipo de fondo cuenta eléctricamente, con protecciones que permiten sacar de operación el equipo, sin que se produzcan fallas.

Debido a que hay una urgencia por mantener la producción de petróleo, cuando el sistema de bombeo electrocentrífugo sale de operación, se efectúan varios intentos de inmediato para tratar de arrancarlo nuevamente. En algunas ocasiones se produce el arranque, sometiendo el equipo a sobreesfuerzos eléctricos y térmicos que pueden envejecer el aislamiento y producir su falla, pero en otras, se realizan varios intentos sin lograrlo.

Debido a que el mantenimiento correctivo del equipo de fondo es sumamente costoso, es necesario contar con herramientas que permitan tomar decisiones adecuadas, así como con técnicas de diagnóstico que permitan definir el estado del equipo de fondo y determinar si éste presenta o no alguna falla eléctrica. Si la hay, identificar el punto donde se encuentra y si está en el motor o cercano a él, será necesario extraer todo el equipo del pozo. Pero si la falla se encuentra cerca de la superficie, en los empalmes o

terminales del cable de interconexión, sólo es necesario extraer parte del equipo para corregirlo y ponerlo nuevamente en servicio.

Actualmente, cuando se presenta un paro en los equipos, el personal operativo del sistema de bombeo electrocentrífugo, realiza como diagnóstico la medición de la resistencia de aislamiento y de la resistencia óhmica. Los criterios para determinar que un equipo de fondo está en buenas condiciones es que en la medición de resistencia de aislamiento se obtengan valores del orden de Megaohms y que se tenga continuidad, y que los valores de resistencia óhmica sean similares entre cada una de las Fases. Estas técnicas de diagnóstico son de gran ayuda, pero si la falla es de alta impedancia, no es fácil detectarla y no determinan el sitio donde se encuentra.

Recientemente, durante el desarrollo del apoyo técnico que brinda el IIE a Pemex Exploración y Producción, se aplicó con éxito la técnica de reflectometría para realizar el diagnóstico y la detección de fallas del equipo eléctrico de fondo.

### Técnica de reflectometría

Debido a sus características, el equipo de fondo se considera como una línea de transmisión que alimenta una carga (motobomba).

La forma más general para evaluar la respuesta en el dominio del tiempo de cualquier sistema electromagnético, consiste en solucionar las ecuaciones de Maxwell en el dominio del tiempo. Tal procedimiento consideraría todos los efectos de la geometría del sistema y de las características o propiedades eléctricas, incluyendo efectos de las líneas de transmisión. Sin embargo, esto sería algo complicado para un conector simple y aún más para la parte del sistema eléctrico a analizar. Por esta razón, varios métodos de prueba se utilizan para asistir al ingeniero eléctrico, para analizar la integridad de la señal.

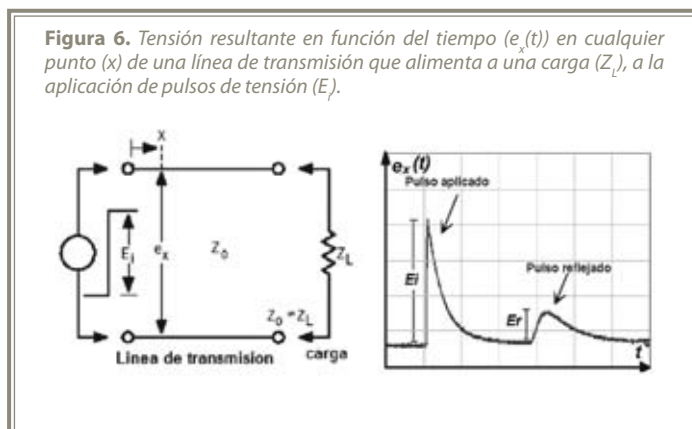
La reflectometría en el dominio del tiempo (TDR) proporciona en forma más precisa y directa, las características del sistema bajo prueba. Usando un generador de señales de alta frecuencia, se aplica un tren de pulsos de tensión a la línea de transmisión bajo análisis. Las señales resultantes en respuesta a la aplicación de los pulsos, la onda incidente y las ondas reflejadas de tensión, se registran en un osciloscopio en un punto particular de la línea.

Esta técnica de la onda reflejada muestra la respuesta de la impedancia característica de la línea, la posición y la naturaleza del circuito, a lo largo de la trayectoria de viaje del pulso (resistivo, inductivo o capacitivo). La Fig. 6 muestra el principio teórico de esta técnica de medición.

El generador de pulsos produce una onda incidente positiva ( $E_i$ ) que se aplica al circuito eléctrico bajo análisis. El pulso viaja por la línea de transmisión, con la velocidad de propagación de la misma. Si la impedancia de la carga ( $Z_L$ ) es igual a la impedancia característica de la línea ( $Z_0$ ), no se refleja ninguna onda y lo que registrará el osciloscopio es el pulso de tensión incidente.

Si la impedancia de carga es diferente a la impedancia característica, parte de la onda incidente se refleja y la onda reflejada de tensión ( $E_r$ ) aparecerá en el osciloscopio.

La magnitud de la onda reflejada está en función del coeficiente de reflexión ( $\rho$ ). El rango de valores del coeficiente  $\rho$  va desde 1, cuando se tiene un circuito abierto, a -1, cuando existe un corto circuito. El valor de cero en el coeficiente  $\rho$  significa que no hay reflexión. El coeficiente de reflexión se calcula con la siguiente expresión:



$$\rho = \frac{Z_t - Z_0}{Z_t + Z_0}$$

Donde:

$\rho$ : coeficiente de reflexión

$Z_t$ : variación de impedancia a lo largo de la línea, incluyendo la impedancia de la carga  $Z_L$  conectada al circuito

$Z_0$ : impedancia característica del cable

La velocidad a la que viaja el pulso aplicado es igual a la velocidad de la luz, atenuada por la oposición del aislamiento a la propagación de ese pulso, en este caso, la permitividad del material aislante (Michel, 1970).

Matemáticamente, la velocidad de propagación del pulso en un cable es igual a:

$$V = \frac{V_0}{\sqrt{\epsilon}}$$

Donde:

$V$ : velocidad de propagación en el cable

$V_0$ : velocidad de la luz (300,000 km/seg)

$\epsilon$ : permitividad del aislamiento del cable

Con la técnica de reflectometría puede determinarse el tiempo que tarda en viajar el pulso, desde su punto de aplicación, hasta su reflexión. Este tiempo es directamente proporcional al doble de la distancia entre el punto donde el pulso es aplicado, hasta su punto de reflexión e inversamente proporcional a su velocidad de propagación, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$t = \frac{2x}{V}$$

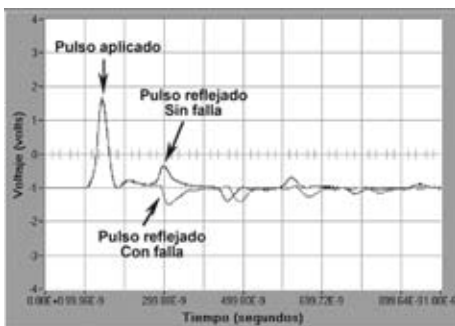
Donde:

$t$ : tiempo que tarda en viajar el pulso desde su punto de aplicación hasta su punto de reflexión

$x$ : distancia entre el punto, desde su punto de aplicación hasta su punto de reflexión

$V$ : velocidad de propagación de los pulsos en el cable

**Figura 7.** Respuesta a la aplicación de pulsos en un cable coaxial con impedancia característica de 50 ohms, con y sin la simulación de falla.



Para ejemplificar la técnica de reflectometría, en la Fig. 7 se observa la respuesta a la aplicación de pulsos en un cable coaxial, con impedancia característica de 50 ohms sin falla y la respuesta cuando se simula un corto circuito. En la Fig. 7 también se observa que el pulso aplicado de voltaje, es un pulso rápido del orden de 30 nanosegundos de tiempo de frente, con una duración de 80 nanosegundos y una magnitud de 2.6 V.

Además de visualizar la respuesta del circuito eléctrico, mediante el osciloscopio también se determinó el tiempo que tarda en viajar el pulso desde su origen, hasta su reflexión y de retorno a su origen, el cual es igual a 172 nanosegundos.

Si se conoce que el cable coaxial utilizado es de una longitud de 15 m y el tiempo que tarda en viajar el pulso aplicado de un extremo al punto de reflexión y viceversa es de 172 nanosegundos, entonces, utilizando la ecuación

$$t = \frac{2x}{V},$$

la velocidad de propagación del pulso en el cable coaxial es igual a 174,418 km/seg.

## Evaluación del sistema BEC mediante la técnica de reflectometría

Pemex Exploración y Producción solicitó el apoyo del Instituto de Investigaciones Eléctricas, para evaluar las condiciones del equipo de fondo del sistema BEC fuera de

servicio, en los pozos de diferentes plataformas. Esta evaluación se realizó como una etapa previa al mantenimiento correctivo del sistema BEC y como apoyo para determinar las actividades necesarias para llevarlo a cabo y se efectuó mediante la aplicación de la técnica de reflectometría (Vargas, 2002).

Como se mencionó previamente, la técnica de reflectometría permite observar la respuesta del equipo de fondo a la aplicación de un tren de pulsos de alta frecuencia y baja tensión. Los pulsos fueron aplicados entre cada una de las Fases y tierra en la mufa de conexión eléctrica del equipo de fondo, la cual está instalada en el cabezal del pozo, en el árbol de válvulas, Fig. 8 y Fig. 9. Con el apoyo de un osciloscopio y de una computadora personal, se registró la respuesta de cada una de las Fases del circuito eléctrico del equipo de fondo a la aplicación de los pulsos y posteriormente se compararon para determinar el estado del equipo.

Antes de realizar la aplicación de la técnica de reflectometría, se llevó a cabo la evaluación de los equipos de fondo, mediante la medición de la resistencia de aislamiento y de la resistencia óhmica, con el fin de obtener, con los resultados de estas mediciones, un diagnóstico preliminar de las condiciones del equipo.

A continuación se mencionan los resultados obtenidos en la medición de las resistencias de aislamiento y óhmica, además de la aplicación de la técnica de reflectometría en tres casos de equipos de fondo con diferente diagnóstico.

### Caso 1. Equipo de fondo sin falla

Para hacer una evaluación del estado del equipo de fondo fuera de servicio, se efectuaron mediciones de resistencia de aislamiento y de resistencia óhmica. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 1. En un principio se midieron valores de cero M $\Omega$ , pero se repitieron las mediciones con un voltaje de prueba menor, para obtener lecturas del orden de 40 k $\Omega$ . Estos valores, aunque son bajos para un material aislante, no son un indicativo de que el aislamiento haya sufrido falla a tierra.

**Tabla 1.** Resultados obtenidos en la medición de resistencia de aislamiento y óhmica, en el equipo de fondo del Sistema BEC sin falla, instalado en un pozo de producción de crudo.

Medición	Fase		
<b>Resistencia aislamiento</b>			
<b>Fase vs Tierra</b>	1	2	3
(k $\Omega$ )	40	40	40
<b>Resistencia óhmica</b>			
<b>entre Fases</b>	1 - 2	2 - 3	3 - 1
( $\Omega$ )	5.2	5.3	5.2

En cuanto a resistencia óhmica, los valores obtenidos no reflejan deterioro o falla por corto circuito en el conductor de cobre tanto del cable, como de los devanados del motor.

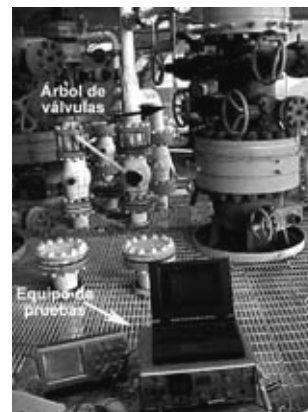
Para verificar la existencia o no de falla a tierra, se llevó a cabo la prueba de reflectometría. Los resultados mostraron que el aislamiento eléctrico del equipo de fondo del sistema BEC instalado en el pozo, presentaba una respuesta similar de una posible falla en las tres Fases (Fig. 10).

Analizando en detalle las señales registradas, considerando los componentes que integran el equipo de fondo y con la experiencia adquirida en la evaluación de otros equipos similares, se concluyó que el equipo no presentaba falla del aislamiento. En la Fig. 10 se observa que la primera reflexión del pulso aplicado, a pesar de ser de polaridad negativa, por su baja magnitud no representa una falla a tierra. La probabilidad de que en un circuito eléctrico se presente una falla trifásica es muy baja, como sería el caso del equipo evaluado.

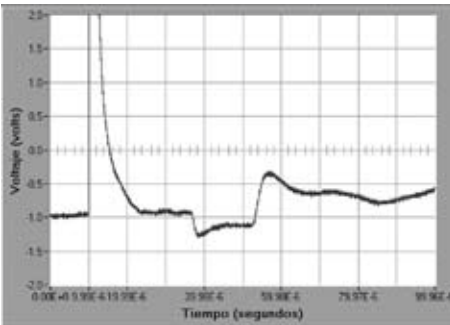
**Figura 8.** Conector del equipo de fondo del Sistema BEC, utilizado para la aplicación de pulsos, el cual está localizado en la parte superior del árbol de válvulas.



**Figura 9.** Equipo de pruebas utilizado para la evaluación, mediante la técnica de reflectometría del equipo de fondo del Sistema BEC, instalado en los pozos de producción de crudo.



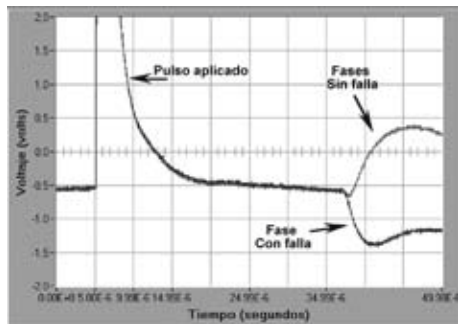
**Figura 10.** Respuesta a la aplicación de pulsos de baja tensión, durante la prueba de reflectometría en las tres Fases del equipo de fondo sin falla.



**Tabla 2.** Resultados obtenidos en la medición de resistencia de aislamiento y óhmica, en el equipo de fondo del Sistema BEC con falla, instalado en un pozo de producción de crudo.

Medición	Fase		
<b>Resistencia aislamiento</b>			
<b>Fase vs Tierra</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
(kΩ)	0	0	0
<b>Resistencia óhmica</b>			
<b>entre Fases</b>	<b>1 - 2</b>	<b>2 - 3</b>	<b>3 - 1</b>
(Ω)	2.2	2.2	2.2

**Figura 11.** Respuesta a la aplicación de pulsos de baja tensión, durante la prueba de reflectometría en el equipo de fondo, con falla en una de sus Fases.



**Tabla 3.** Resultados obtenidos en la medición de resistencia de aislamiento y óhmica, en el equipo de fondo del Sistema BEC con falla en el aislamiento y corto circuito, o deterioro en el conductor de cobre.

Medición	Fase		
<b>Resistencia aislamiento</b>			
<b>Fase vs tierra</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
(kΩ)	0	0	0
<b>Resistencia óhmica</b>			
<b>entre Fases</b>	<b>2 - 3</b>	<b>3 - 1</b>	<b>1.6</b>
(Ω)	1 - 2	3.3	2.8

Al extraer completamente el equipo del pozo, se verificó mediante pruebas eléctricas que, tanto el cable de alimentación como el motor, no presentaban falla eléctrica.

De acuerdo con lo anterior, se concluyó que la salida de operación del equipo de fondo se originó por el bloqueo de la flecha de la bomba. Los intentos realizados para ponerlo nuevamente en operación, no fueron los suficientes para provocar una falla eléctrica.

### Caso 2. Equipo de fondo con falla cercana al motor

La evaluación previa mediante la medición de resistencia de aislamiento y resistencia óhmica, mostró que el equipo de fondo presentaba una falla a tierra en el aislamiento. La resistencia de aislamiento, inicialmente se midió con un voltaje de prueba de 1.0 kV<sub>CD</sub> y posteriormente con voltajes menores, resultando en ambos casos valores de cero ohms, lo cual es un indicio de falla a tierra (tabla 2).

Los valores resultantes de resistencia óhmica son iguales, por lo que no mostraban indicios de corto circuito o deterioro de los conductores de cobre que forman el equipo de fondo.

Mediante la aplicación de la técnica de reflectometría (Fig. 11), se verificó la existencia de la falla a tierra del aislamiento de una de las Fases del equipo eléctrico de fondo. Las otras dos Fases del equipo eléctrico no mostraron falla y su respuesta a la aplicación de pulsos es similar (Fig. 11).

Si consideramos que la velocidad de propagación de los pulsos aplicados en este arreglo de equipos de fondo, es del orden de 170,000 km/s y que el tiempo que tarda en viajar el pulso hasta su reflexión mostrada es de 16.16 μs, entonces, utilizando la ecuación

$$t = \frac{2x}{V}$$

se determinó que la falla eléctrica está localizada a 2,748 m del cabezal del pozo, y de acuerdo con la longitud en la que se localiza, está en el cable o en el conector del mismo con el motor eléctrico, o en los devanados de este equipo.

### Caso 3. Equipo de fondo con falla cercana a la superficie

Con la medición de resistencia de aislamiento y resistencia óhmica, previa a la aplicación de la técnica de reflectometría, se determinó que el equipo de fondo instalado en un pozo de producción de crudo, presentaba la falla en el aislamiento y corto circuito o deterioro del conductor de cobre. Los resultados de la medición de resistencia de aislamiento y óhmica son mostrados en la tabla 3.

Los registros de la respuesta del equipo de fondo a la aplicación de la técnica de reflectometría, mostraron la existencia de la falla del aislamiento de dos de las Fases (Fig. 12).

De acuerdo con la velocidad de propagación de los pulsos en el equipo de fondo y al tiempo que tarda en viajar el pulso hasta su reflexión mostrada en la Fig. 12, 3.33 μs, se determinó que la falla se localiza a una longitud de 566 m del cabezal del pozo.

No se sabe con exactitud cuánto tiempo, pero este equipo de fondo tenía varios meses fuera de servicio. Si se hubiera aplicado la técnica de reflectometría inmediatamente después de ocurrida la falla y por el lugar de ubicación, se pudo haber corregido la misma y haber puesto nuevamente en operación, el equipo de fondo. Pero, debido al tiempo que el equipo evaluado permaneció fuera de operación y al ambiente con condiciones tan drásticas que existen en el pozo donde estaba instalado, se determinó el mantenimiento correctivo mediante su extracción y la instalación de uno nuevo.

## Conclusiones

Los sistemas de bombeo electrocentrífugo han apoyado en la producción de crudo, en aquellos pozos que ya se consideraban con baja factibilidad de explotarse. La tecnología involucrada requiere de ingenieros altamente capacitados para mantenerlos en operación y proporcionarles el mantenimiento adecuado.

Además de obtener el diagnóstico del estado del equipo de fondo, mediante la técnica de reflectometría también se puede localizar el sitio donde ocurre una falla eléctrica, lo cual permite que sea una herramienta muy útil para complementar la toma de decisiones de las maniobras de mantenimiento. En algunas ocasiones y dependiendo del lugar de la falla, la técnica de reflectometría permitirá una reducción en los costos por la producción diferida y por el mantenimiento correctivo.

La técnica de reflectometría también ha sido aplicada exitosamente por el personal del IIE, en el diagnóstico y detección de fallas en los devanados de transformadores, motores y generadores, tanto de PEMEX, como de CFE y de la industria eléctrica privada.

## Bibliografía

- Wong, N. *Electrical submersible pumps for oil well applications*, Electrotechnology Vol. 17, July 1989.
- Bonnett, Austin H., *Analysis of the impact of pulse-width modulated inverter voltage waveforms on AC induction motors*, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 32, No. 2, March/April, 1996.
- Michel, R. *Localisation de défauts dans les câbles souterrains à l'aide de l'échometre*, EDF Bulletin de la Direction des Études et Recherches, Série B, Réseaux Électriques, Matériels Électriques No. 1, 1970, pp 23-52.
- Vargas V. H., *Evaluación del equipo de fondo antes de la reconversión del Sistema BEC en los pozos del Campo Ek- Balam*, Gerencia de Equipos Eléctricos, Instituto de Investigaciones Eléctricas, Ref.: IIE/03/32/12289/RP-02/2002.

### Vicente Vargas H.

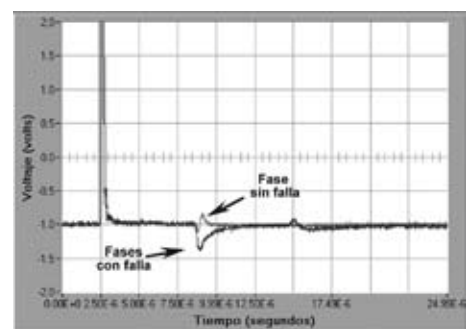
Ingeniero Electricista egresado de la Universidad Autónoma Metropolitana en 1983. En 1984 ingresó al Instituto de Investigaciones Eléctricas. En 1994 obtuvo la Maestría en Ciencias en la Universidad de Salford, Inglaterra, con la especialidad de Monitoreo en línea de máquinas eléctricas rotatorias.

Desde 1988 ha participado constantemente en la evaluación y diagnóstico de equipos eléctricos de alta tensión, tanto en línea como fuera de línea. Además, ha realizado trabajos para determinar la causa de falla de diversos equipos de alta tensión.

Desde 1995 ha participado con Pemex Exploración y Producción, Región Marina Noreste, como apoyo técnico para la implementación y optimización del Sistema de Bombeo Electrocentrífugo, utilizado para la producción de petróleo.

[vvargas@iie.org.mx](mailto:vvargas@iie.org.mx)

**Figura 12.** Respuesta a la aplicación de pulsos de baja tensión, durante la prueba de reflectometría en el equipo de fondo con falla en dos de sus Fases.



**Inocente Rosales Sedano**

Ingeniero Electricista egresado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) en 1977. Cursó la especialidad en Proyecto de Instalaciones Eléctricas, en la DEPMI-UNAM en 1984 y el grado de Maestro en Ciencias en la Universidad de Salford, Inglaterra en 1994.

Ingresó al Instituto de Investigaciones Eléctricas en 1979, donde es investigador en el área de Equipos Eléctricos. Ha desarrollado trabajos de diseño de equipos, evaluación de equipos mediante pruebas eléctricas y modernización del sistema eléctrico de plantas petroquímicas.

*irs@iie.org.mx.*

**Jorge Pimentel M.**

Ingeniero Industrial Eléctrico, egresado del Instituto Tecnológico de Veracruz en 1996. De 1981 a 1986 laboró en varias empresas del sector privado, relacionadas con la industria eléctrica. En 1987 ingresó a Petróleos Mexicanos, en el área de Exploración y Producción. Desde entonces se ha desempeñado en la sección eléctrica de los sistemas de ingeniería de producción. Participó en la coordinación de los trabajos electromecánicos para la ejecución de la prueba piloto y solución a la problemática del sistema BEC, implementado en la Sonda de Campeche. Respecto al sistema BEC, ha tenido constante relación con expertos de diferentes compañías internacionales. También ha participado en foros nacionales e internacionales, compartiendo sus experiencias en la implantación del sistema BEC para la producción de petróleo.

Actualmente se desempeña como Superintendente de Ingeniería de Instalaciones del Activo Integral Cantarell de Pemex Exploración y Producción, Región Marina Noreste.