



Verification of the Operating Conditions of a Submarine Cable Class 35 kV

Inocente Rosales Sedano¹, Vicente B. Vargas H.², Jorge Pimentel M.³

^{1,2} Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL) – Reforma 113, Palmira, 62490 Cuernavaca, Mor., México.

³ PEMEX Exploración y Producción - Marina Nacional 329, Col. Huasteca, C.P. 11311, México D.F.

Email: irs@iee.org.mx, vvargas@ineel.mx, jpimentelm@pemex.mx

Received: November 13th, 2017.

Accepted: November 20th, 2017.

Published: December 13th, 2017.

Copyright ©2016 by authors and Institute of Technology Galileo of Amazon (ITEGAM). This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



ABSTRACT

In 1997 a Class 35 kV submarine cable was installed in the Sonda de Campeche, Mexico, for the distribution of electrical energy to several offshore oil production platforms. The installation site is made up of seven marine platforms linked to each other by an electrical network in 34.5 kV. During the installation of the cable, there were some problems in the laying, forming "loops", which led to apply a greater mechanical effort to the cable. After the installation of all cable sections, an off-line evaluation was performed by measuring partial discharges with CA. In 2009, a new evaluation of the submarine cable was carried out by measuring partial discharges in line. The method used for the measurement of DP, is based on a detection system by means of a current sensor for high frequency (UWB), tuned to a frequency of 80 MHz. This paper describes the monitoring of the submarine cable since its installation, evaluation by measuring partial discharges (DP) with CA before commissioning, and its evaluation after twelve years in operation.

Keywords: Marine platforms, Partial discharges, Current sensor

Verificación de las Condiciones Operativas de un Cable Submarino Clase 35 kV

RESUMEN

En 1997 se instaló un cable submarino Clase 35 kV en la Sonda de Campeche, México, para la distribución de energía eléctrica a varias plataformas marinas de producción de crudo. El sitio de instalación está constituido por siete plataformas marinas enlazadas entre sí por una red eléctrica en 34.5 kV. Durante la instalación del cable, se presentaron algunos problemas en el tendido, formándose "loops", lo que propició que se aplicara un esfuerzo mecánico mayor al cable. Después de la instalación de todos los tramos de cable, se efectuó una evaluación fuera de línea mediante la medición de descargas parciales con CA. En el 2009 se llevó a cabo una nueva evaluación del cable submarino mediante la medición de descargas parciales en línea. El método utilizado para la medición de DP, está basado en un sistema de detección por medio de un sensor de corriente para alta frecuencia (UWB), sintonizado hasta una frecuencia de 80 MHz. En este trabajo se describe el seguimiento del cable submarino desde su instalación, evaluación mediante la medición de descargas parciales (DP) con CA antes de la puesta en servicio, y su evaluación después de doce años en operación.

Palabras claves: Plataformas marinas, Descargas parciales, Sensor de corriente.

I INTRODUCCIÓN

El sistema eléctrico de potencia del Campo Ek-Balam en el Golfo de México, está formado por un módulo de generación con tres turbogeneradores localizado en una plataforma y una red de distribución con cable submarino en 34.5 kV, que interconecta

y suministra la energía demandada por las siete plataformas que forman el campo de producción.

La producción de crudo se realiza mediante bombas electrocentrifugas controladas por variadores de frecuencia (VDF), los cuales generan armónicos que aún y cuando se tienen instalados transformadores desfasadores, pueden ser una probable causa de deterioro de los equipos que forman el sistema eléctrico.

La energía eléctrica requerida en las plataformas periféricas es suministrada a través de un cable submarino en 34.5 kV, que interconecta las plataformas para formar un anillo de distribución, aunque su operación normal es en dos circuitos

radiales, como se muestra en la Figura 1. La apertura del anillo se puede efectuar en cualquier plataforma ya que en cada una de ellas, el cable se interconecta a través de un seccionador o cuchillas en SF₆.

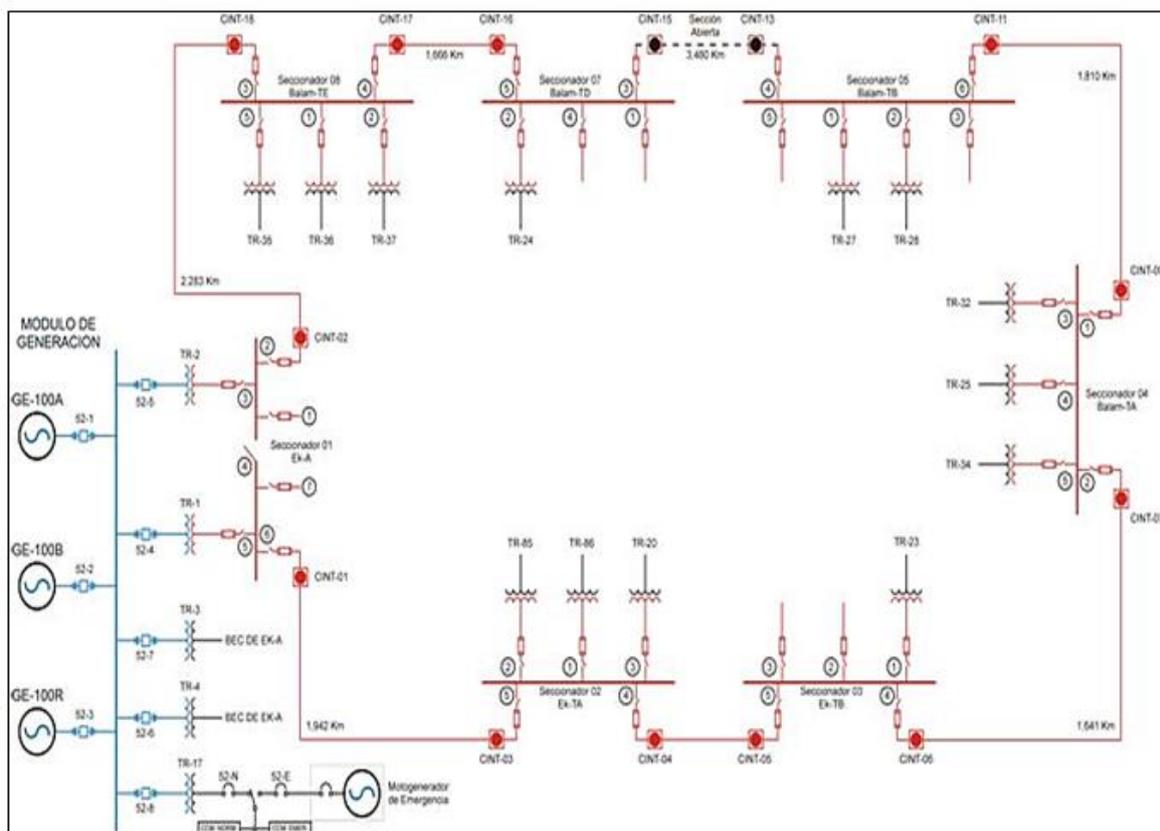


Figura 1: Esquema unifilar del campo Ek-Balam con cable submarino Clase 35 kV.
Fuente: Autores, (2017).

En la Figura 2 se muestra el diagrama unifilar del módulo de generación localizado en la plataforma EK-A. La carga instalada total es aproximadamente de 7,680 kW con un factor de potencia de 0.8. Esta carga puede ser suministrada por dos generadores en operación con uno de respaldo en caso de contingencia.

Los tramos de cable submarino, energizados normalmente en dos circuitos radiales, es uno de 4,220 m con una capacitancia de 0.6752 μ F y otro tramo de 7,980 m con una capacitancia de 1.3 μ F, lo que representa una capacitancia total de 1.97 μ F. Cerrando el anillo la longitud total es de 15,673 m con una capacitancia equivalente de 2.51 μ F [1].

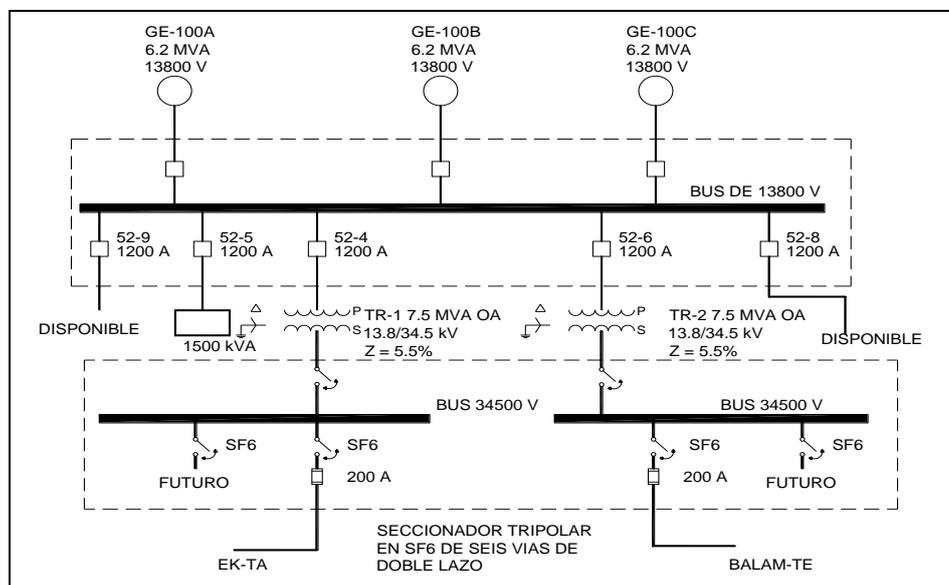


Figura 2: Diagrama unifilar del módulo de generación en 13.8 kV.
Fuente: Autores, (2017).

Antes de la puesta en servicio, la evaluación de los tramos de cable entre plataformas se efectuó midiendo el nivel de las descargas parciales (DP) en forma directa de acuerdo a lo indicado en la Norma IEC-270 [2]. En el 2009, se realizó una segunda evaluación a los cables de energía, por medio de la medición en línea del nivel de descargas parciales (DP), por el método de banda ultra-ancha UWB (por sus siglas en inglés).

II.1 EVALUACIÓN FUERA DE LÍNEA DEL CABLE SUBMARINO ANTES DE LA PUESTA EN SERVICIO

Las descargas parciales (DP) son un fenómeno eléctrico que se presenta por la ionización del aire o gases contenidos en huecos en el aislamiento principal del cable o por la ionización del aire circundante en las partes con una alta diferencia de potencial. Este fenómeno puede acelerarse por la presencia de humedad, alta temperatura y por la contaminación depositada en los aislamientos. Dependiendo del tipo de aislamiento (seco, aceite-papel o polimérico) o del tipo de equipo a ser evaluado, mientras mayor sea el nivel de DP mayor es el grado de deterioro.

Las DP van deteriorando paulatinamente los equipos hasta que ocurre su falla.

La medición de DP fuera de servicio de los circuitos alimentadores se realizó de acuerdo con la norma IEC 270 [2]. Para aplicar el voltaje de prueba de CA, se utilizó un transformador resonante, el cual varía la tensión de prueba desde cero hasta $1.2U_n$. Las señales de DP's son pulsos de alta frecuencia y baja magnitud. Estas señales están acopladas a la corriente principal (I_p) del circuito de prueba y son filtradas por medio de un filtro pasa altas conectado a la salida del capacitor de acoplamiento (C_k). Posteriormente, las señales de alta frecuencia son enviadas al equipo de medición para su adecuación y registro.

El circuito de medición del nivel de DP's en forma esquemática se muestra en la Figura 3 y el circuito real utilizado en sitio para la evaluación de los tramos de cable submarino se muestra en la Figura 4. Antes de energizar el circuito de prueba para cuantificar la magnitud real de las DP, se aplicó un pulso conocido de manera directa, utilizando un calibrador convencional.

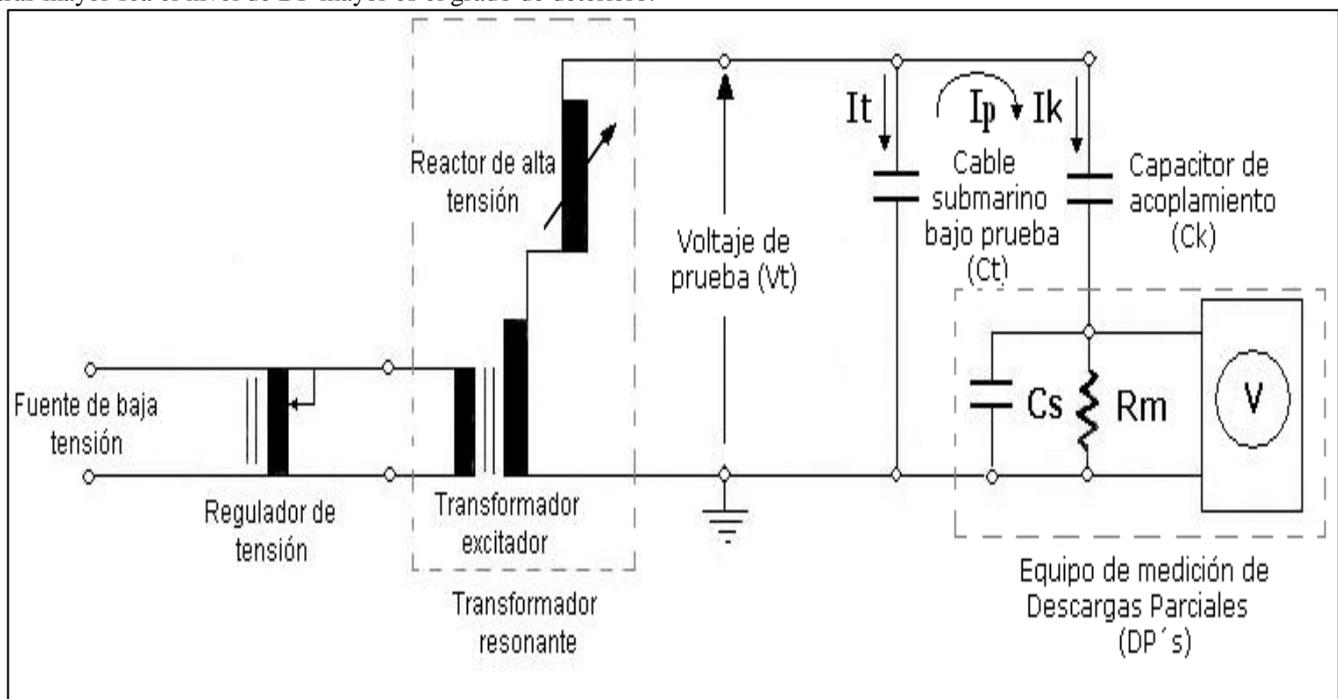


Figura 3: Circuito de prueba esquemático para la medición de DP fuera de línea.

Fuente: Autores, (2017).

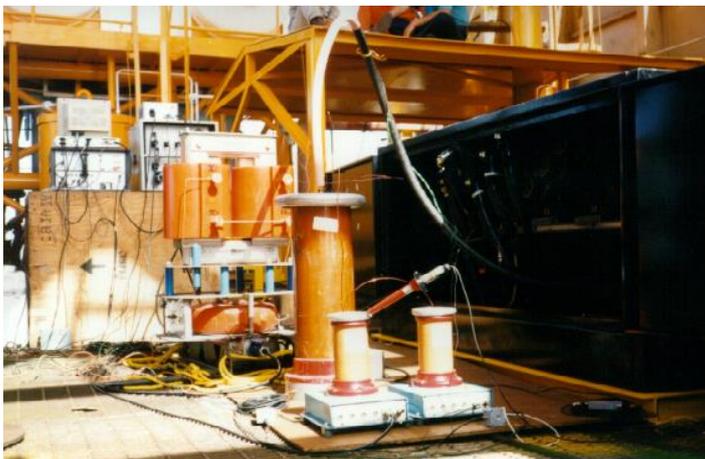


Figura 4: Circuito de prueba en sitio para la medición de DP fuera de línea.

Fuente: Autores, (2017).

Los cables de potencia con aislamiento EPR nuevos, para cumplir con los requerimientos de norma, deben presentar un nivel de DP menor o igual a 5.0 pC. Sin embargo, debido al ruido electromagnético presente en el sitio de pruebas, se consideró un límite máximo de 50 pC para considerar el tramo de cable submarino adecuado para ser puesto en operación.

Las condiciones ambientales promedio durante las mediciones y la calibración del circuito de medición fueron las siguientes:

- Temperatura ambiente promedio: 26 °C;
- Humedad relativa promedio: 84.7 %;
- Calibración: 1000 pC, sensibilidad: 30 pC;
- Capacitor de acoplamiento (C_q) = 100pF.

Los resultados obtenidos de DP en los siete tramos de cable submarino se indican en la Tabla 1. Como se muestra en la Tabla 1, en un tramo de cable se obtuvieron niveles de DP mayores a 50 pC en las Fases A y C, los cuales estarían fuera del criterio de aceptación para ser puestos en servicio [3].

Tabla 1: Resultados obtenidos de DP en los siete tramos de cable submarino

Tramo de cable	Fase	Voltaje (kVCA)	Q _{máx} (pC)
EKA-BTE	A	20.0	< 50.0
	B	20.0	< 50.0
	C	20.0	< 50.0
BTE-BTD	A	20.0	< 50.0
	B	20.0	< 50.0
	C	20.0	< 50.0
BTD-BTB	A	16.0	< 50.0
	B	16.0	< 50.0
	C	16.0	< 50.0
BTB-BTA	A	20.0	< 30.0
	B	20.0	< 30.0
	C	20.0	< 30.0
BTA-EKTB	A	17.0	21.0
	B	17.0	29.0
	C	17.0	27.0
EKTB-EKTA	A	17.0	55.0
	B	17.0	21.0
	C	17.0	45.0
EKTA-EKA	A	17.0	78.0
	B	17.0	22.0
	C	17.0	82.0

Fuente: Autores, (2017).

II. 2 MEDICIÓN DE DP EN LÍNEA POR EL MÉTODO DE UWB

La medición de DP en línea de los tramos de cable submarino se realizó con un sistema de detección que utiliza un sensor de corriente para alta frecuencia (UWB) sintonizado hasta una frecuencia de 80 MHz (CT100). Las señales de DP acopladas a este sensor pasan a través de un amplificador antes de ser enviadas al medidor de DP, como se muestra en la Figura 5. De esta manera se adquieren las señales electromagnéticas producidas por las DP y se sincronizan con la corriente que circula por el cable durante la medición. Con ello se obtiene un patrón convencional donde se obtiene la magnitud cualitativa de la carga, la frecuencia de repetición y el ángulo de fase donde ocurren las descargas [4].

En la Figura 6 se muestra la conexión de los sensores UWB en los cables a evaluar y el TC para obtener la señal de corriente para la sincronización de las DP.

Debido a que los cables de energía están energizados por el propio sistema eléctrico, para cuantificar la magnitud de las DP se aplicó un pulso conocido de manera indirecta, utilizando un calibrador convencional. La Figura 8 muestra el patrón al aplicar un pulso de calibración de 200 pC.

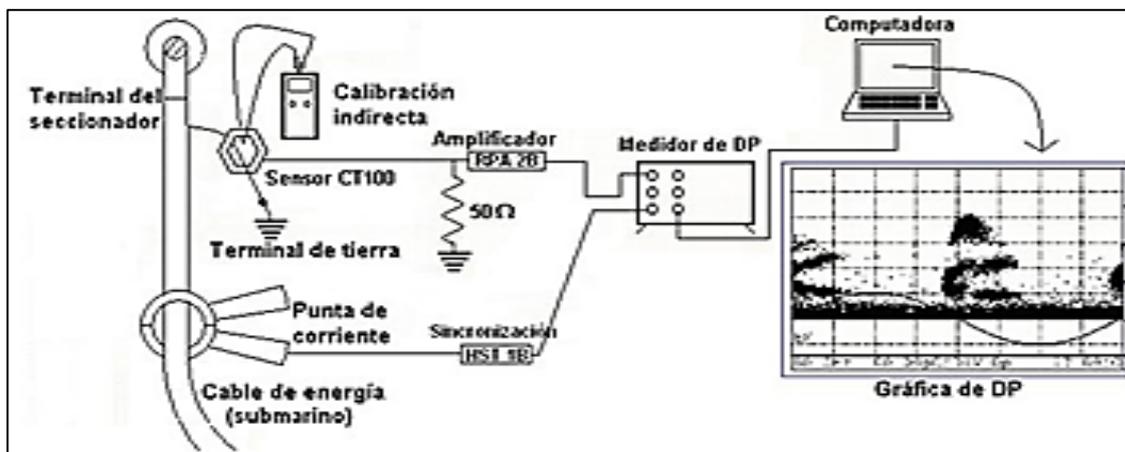


Figura 5: Diagrama esquemático para la medición de DP mediante la técnica de UWB.

Fuente: Autores, (2017).



Figura 6: Medición de descargas parciales en línea en las terminales del cable submarino.

Fuente: Autores, (2017).



Figura 7: Equipo de medición de DP.

Fuente: Autores, (2017).

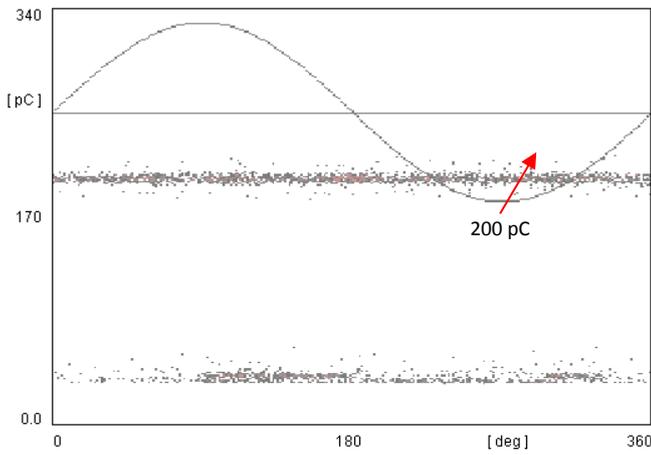


Figura 8: Inyección de un pulso conocido de 200 pC para la calibración del medidor de DP.

Fuente: Autores, (2017).

Como una de las posibles desventajas del empleo de técnicas en UWB se tiene el hecho de que al ser utilizada alta frecuencia, la longitud “vista” del objeto bajo prueba estará limitada a la longitud de onda correspondiente a la frecuencia de medición [4].

Debido a que la medición de los pulsos de DP son a 80 MHz o más, la sensibilidad de detección de los pulsos está en función de la longitud de onda λ , por lo tanto la distancia aproximada de detección del pulso en el cable será de:

$$\lambda = v/f \quad (1)$$

Donde v es la velocidad de propagación en el dieléctrico y se calcula como:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \epsilon_r \mu_0 \mu_r}} \quad (2)$$

Considerando que:

$\epsilon_0 = 10^7/(4\pi C^2)$ F/m (permitividad del vacío)

$\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ H/m (permeabilidad del vacío)

ϵ_r = Permitividad relativa del aislamiento del cable (aproximadamente 3)

μ_r = Permeabilidad relativa del aislamiento (igual a 1)

C = Velocidad de la luz en el vacío (3×10^8 m/s)

f = Frecuencia dada como $1/4\tau$ (cada mitad de semiciclo)

τ = Tiempo del frente de la descarga parcial (1-10ns)

III.1 ANÁLISIS DE LAS MEDICIONES DE DP

El circuito eléctrico del cable submarino está compuesto por siete tramos de cable. En cada extremo el cable con sus terminales se conecta a un seccionador de cuchillas como se indica en la Figura. 6. Las mediciones de DP por el método de UWB se efectuaron en cada extremo de los cables. Uno de los principales problemas para la medición fue la presencia de ruido eléctrico y los pulsos de armónicos debido a la operación de variadores de frecuencia (VDF). Debido a estos inconvenientes, el pulso de calibración mínimo se ajustó a 50 pC y en algunos casos mayor de 100 pC [5].

En varios tramos de cable se detectaron altos niveles de DP y en dos de ellos en ambos lados como se muestra en las Figuras. 9 a 12.

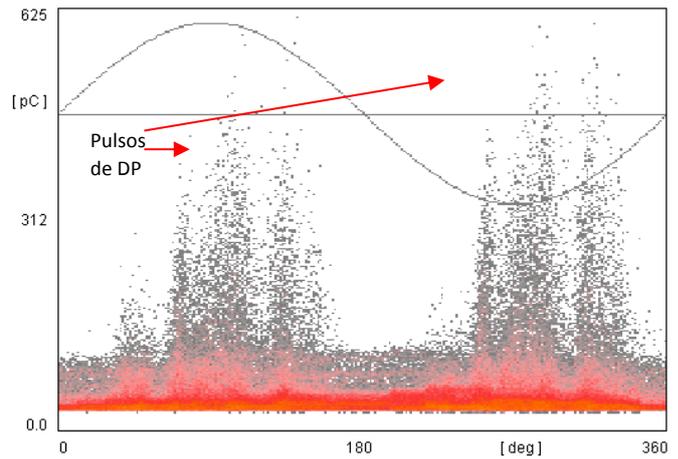


Figura 9: Pulsos de DP en la Fase C (BTE-BTD).

Fuente: Autores, (2017).

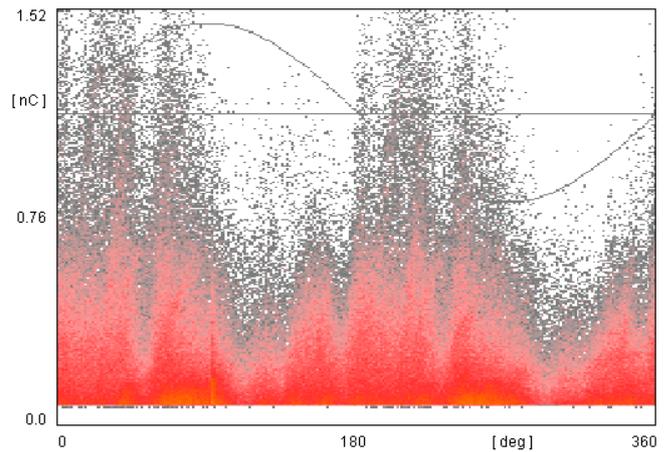


Figura 10: Pulsos de DP en la Fase C (BTD-BTE).

Fuente: Autores, (2017).

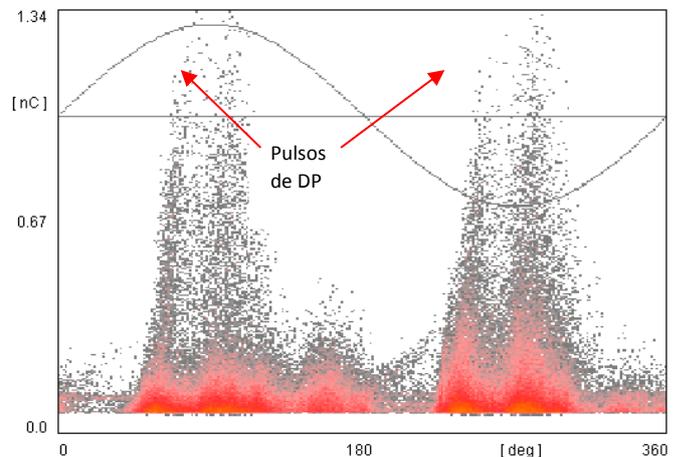


Figura 11: Pulsos de DP en la Fase B (B.TB-BTD).

Fuente: Autor, (2017).

Los circuitos que no presentaron DP o sus niveles son relativamente bajos, presentan un mapa de registro como el indicado en la Figura. 13. En este mapa no se aprecian los pulsos de descargas parciales en la pendiente positiva ni en la pendiente

negativa de la onda de 60 Hz, los cuales son característicos de DP en el aislamiento o terminales.

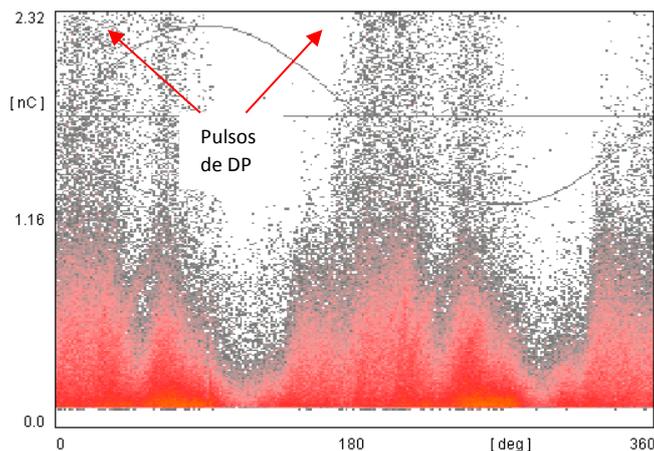


Figura 12: Pulsos de DP en la Fase C (BTD-BTA).

Fuente: Autores, (2017).

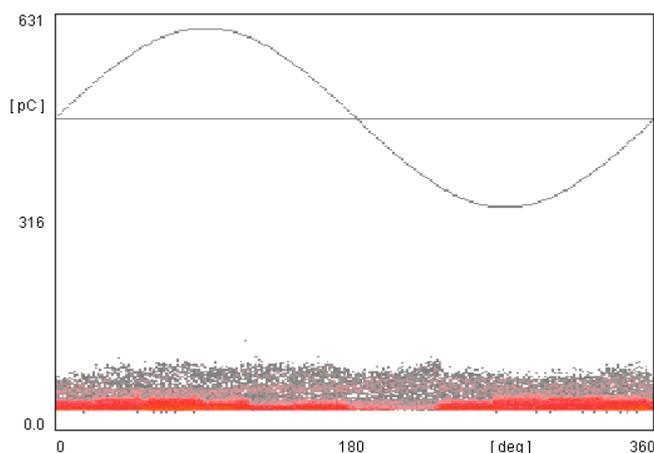


Figura 13: Patrón de registros sin DP.

Fuente: Autor, 2017.

III. 2 RESUMEN DE RESULTADOS

En la Tabla 2 se indican los tramos de cable submarino y cable superficial que conectan con los equipos de transformación de las plataformas, que presentaron altos niveles de DP. La técnica de UWB detecta las DP cercanas al sitio de localización del sensor. Por lo que el punto más susceptible de ocurrencia de las DP es en las terminales de los cables.

III. 3 CAUSAS POSIBLES DE DAÑO EN LAS TERMINALES

La primera evaluación de los tramos de cable fuera de línea, se efectuó antes de la colocación de las terminales tipo codo. Por esta razón es difícil definir si las DP localizadas en la última evaluación están presentes desde la instalación de los codos o han evolucionado a través del tiempo debido al esfuerzo dieléctrico y a la contaminación imperante en la zona. De las 81 terminales evaluadas, 36 presentaron problemas de DP lo que equivale al 44% del total de terminales tipo codo.

Los gabinetes donde están localizadas las terminales no son completamente sellados y la contaminación marina como es la humedad y la sal están presentes, por lo que es factible el ingreso de estos contaminantes en las terminales, aunado al esfuerzo dieléctrico, la temperatura y el tiempo de servicio.

Por consiguiente, debido a que la carga del bombeo electrocentrífugo (BEC) es primordial para la extracción de petróleo, se recomendó la sustitución de las terminales con alto nivel de DP, para evitar posibles fallas dieléctricas.

Tabla 2: Terminales que presentan niveles altos de DP y que requieren mantenimiento preventivo.

Plataforma	Seccionador	Cables hacia	Observaciones
BTE	08	BTD	Programar actividades de mantenimiento preventivo en las terminales
		TR-35	
BTD	07	BTE	
		BTB	
		TR-24	
BTB	05	BTD	
		BTA	
		TR-27	
BTA	04	BTB	
		EKTB	
		TR-34	
		TR-32	

Fuente: Autor, 2017.

IV CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos de la evaluación en línea de los tramos de cable submarino y superficial, se definieron dos grupos de análisis. En el primer grupo se definen los cables que no presentaron actividad de DP o que presentaron un patrón generado por los equipos de los variadores de frecuencia (VDF). Los cables y terminales de este grupo pueden continuar en operación sin requerir algún mantenimiento preventivo.

En el segundo grupo se tienen los cables con actividad eléctrica de DP en la zona de terminales que requieren algún tipo de mantenimiento. Para estos cables de energía, se recomendó programar actividades de mantenimiento preventivo a las terminales que son los más susceptibles de que en este punto se estén originando las DP.

Es probable que la contaminación salina imperante en la zona así como la humedad, la temperatura ambiente superior a los 30 °C y el esfuerzo dieléctrico, este provocando la degradación de las terminales, por lo que se debe mejorar mecánicamente la hermeticidad de los gabinetes para evitar el ingreso de estos contaminantes.

IV REFERENCIAS

- [1] I. Rosales Sedano, V. Vargas H, "Compensación del Efecto del Cable Submarino en una Red Eléctrica Aislada con Baja Carga", Congreso Internacional sobre Alta Tensión y Aislamiento Eléctrico ALTAE2007, Cuernavaca, Mor, México, 29 oct. al 2 de nov. 2007.
- [2] IEC Publication 60270, **High Voltage Testing. Partial Discharge Measurements**, International Electrotechnical Commission, Third Edition, 2000.
- [3] V. Vargas H, et. al, "Evaluación del cable submarino y de los seccionadores del Campo Ek- Balam de PEMEX Exploración y Producción", Gerencia de Equipos Eléctricos, Instituto de Investigaciones Eléctricas, Ref.: IIE/03/32/11073/RF-02/1998.

[4] Azcárraga, C.G., García Colón, V.R. “**Comparación entre Técnicas Convencionales y de Banda Ultra Ancha para la Detección de Descargas Parciales en Cables de Energía**”, Decimoquinta Reunión de verano de Potencia y Aplicaciones Industriales RVP-AI/2002, Acapulco, Guerrero, México, Julio 7-13, 2002.

[5] I. Rosales S., A. Nava G, V. Vargas H., “**Evaluación de los Equipos de Distribución y Revisión de su Especificación debido al Incremento de la Producción en el Campo Ek-Balam**”, PEMEX Exploración y Producción, Gerencia de Equipos Eléctricos, Instituto de Investigaciones Eléctricas, Ref. IIE/03/32/13624/RF/2009.