



Evaluación de la condición de interruptores de alta tensión con accionamiento a resorte – nuevos abordajes y perspectivas

Rodrigo Eduardo Chaparro Moraes y Mario Augusto Caetano dos Santos

Itaipu Binacional

Paraguay y Brasil

RESUMEN

Los interruptores de alta tensión desempeñan un papel fundamental en los Sistemas Eléctricos de Potencia, especialmente por la función crítica de interrumpir elevadas corrientes de falta de manera rápida y segura. Por lo tanto es esencial certificarse de la adecuada condición operativa de estos equipos, compuestos básicamente por mecanismos de accionamiento y cámaras de extinción. Actualmente la mayoría de las empresas del sector eléctrico adoptan una estrategia de evaluación de condición basada en mantenimientos preventivos periódicos, durante los cuales se verifican principalmente los tiempos de operación y valores de resistencias de contacto. Por otro lado, estudios demuestran que esas mediciones no son capaces de identificar algunas alteraciones importantes, como son el desgaste y desalineamiento de los contactos de arco, variaciones en los valores de los resistores de pre-inserción o fatigas y pérdidas de las características de los mecanismos de accionamiento. Cuando estos permanecen ocultos, existen grandes riesgos de evolución hacia fallas catastróficas con severas consecuencia a los activos adyacentes, a la continuidad y confiabilidad del sistema y a la vida humana.

En la Itaipu Binacional existen distintos interruptores de potencia operando en voltajes de 66, 220 y 500kV instalados en la Subestación de la Margen Derecha (SEMD). Aunque la actual política de mantenimiento de estos interruptores esté basada en las premisas anteriormente citadas, el órgano de Ingeniería Eléctrica de la Superintendencia de Mantenimiento viene estudiando la aplicación de nuevos ensayos mediante la utilización de un analizador de interruptores, accediendo así a informaciones relacionada a la velocidad y perfil del desplazamiento y amortiguamiento de los contactos, condiciones de los contactos principales y de arco, perfil de carga de los mecanismos de accionamiento y resistencia dinámica de arco. Adicionalmente se ha posibilitado la medición de los resistores de pre-inserción, sin la necesidad de mayores intervenciones en los interruptores.

Así, el propósito de este artículo es presentar las experiencias iniciales y los conceptos básicos envueltos en las mediciones anteriormente citadas, sus ventajas respecto a las técnicas convencionales y algunos resultados obtenidos en interruptores de 245kV y 550kV de la SEMD con accionamiento a resorte. Aunque la aplicación de las nuevas técnicas sea reciente, vislumbra gran potencial para evaluación de la condición de interruptores de potencia a medio y largo plazo.

PALABRAS CLAVES

Interruptores de alta tensión, resistencia dinámica, mantenimiento preventivo, analizadores de interruptores.



**XII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
25 y 26 de Agosto de 2016**

1. INTRODUCCIÓN

Dentro de los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP), los interruptores de alta tensión son equipos esenciales para garantizar la confiabilidad del suministro de energía eléctrica. Estos desempeñan la función de establecer y conducir las corrientes de carga y principalmente interrumpir las corrientes de falta. En especial para este último caso, los interruptores deben abrir en la mayor brevedad posible sus contactos, al mismo tiempo en que deben promover la extinción del arco eléctrico a través de resfriamiento y restablecimiento de la rigidez dieléctrica, aunque por lo general pasen largos periodos sin efectuar cualquier maniobra.

Un interruptor es compuesto básicamente por mecanismos de operación y cámara de extinción. Cuanto al mecanismo de operación, estos pueden variar según la forma como acumulan energía para las maniobras tanto de cierre como de apertura, siendo los principales tipos, los accionados a resorte (helicoidal o espiral), hidráulico, neumático o hidráulico-resorte. Cuando hablamos de la cámara de extinción, la misma se caracteriza por el medio utilizado para supresión del arco eléctrico, pudiendo ser gas SF₆, aire comprimido, aceite aislante o vacío (para bajos niveles de tensión)

Según el tipo de interruptor, cada empresa del sector eléctrico establece planes de mantenimientos preventivos periódicos, buscando garantizar el adecuado desempeño del equipo. A pesar de las particularidades de periodicidades y procedimientos, son prácticamente unánimes las mediciones de tiempo de operación y resistencias de contacto, aunque la experiencia muestre que el mayor índice de fallas en interruptores se concentra en el mecanismo de operación [1], lo cual no será adecuadamente diagnosticado mediante las mediciones anteriormente mencionadas.

En la búsqueda por métodos de ensayos y diagnósticos mas relevantes para la evaluación de las condiciones de los interruptores, se vienen adoptado mediciones de desplazamiento, velocidad y resistencia dinámica de los contactos (DRM – Dynamic Resistance Measurement), pero los resultados todavía son poco divulgados y poco discutidos, especialmente cuanto a la evaluación para obtención de diagnósticos consistentes.

Posterior a la ocurrencia de dos fallas en sus interruptores con mecanismos accionados a resorte y extinción a gas SF₆ (uno en 245kV y otro en 550kV), la Itaipu Binacional adquirió un analizador de interruptor capaz de realizar las mediciones anteriormente citadas, entre otras funcionalidades que serán descriptas a seguir.

2. MECANISMO DE ACCIONAMIENTO

La operación del mecanismo de un interruptor de potencia accionado a resorte, podría ser resumida de la siguiente manera: El resorte helicoidal de cierre de los interruptores es comprimido por un motor eléctrico, almacenando gran cantidad de energía para la maniobra, hasta que el pestillo de cierre del interruptor es liberado por la bobina de cierre y toda la energía almacenada en él es transmitida por una leva excéntrica simultáneamente, a los contactos móviles para cerrar el interruptor y al resorte de apertura, comprimiéndolo y proveyéndolo de la energía necesaria para abrir el interruptor cuando fuere necesario.

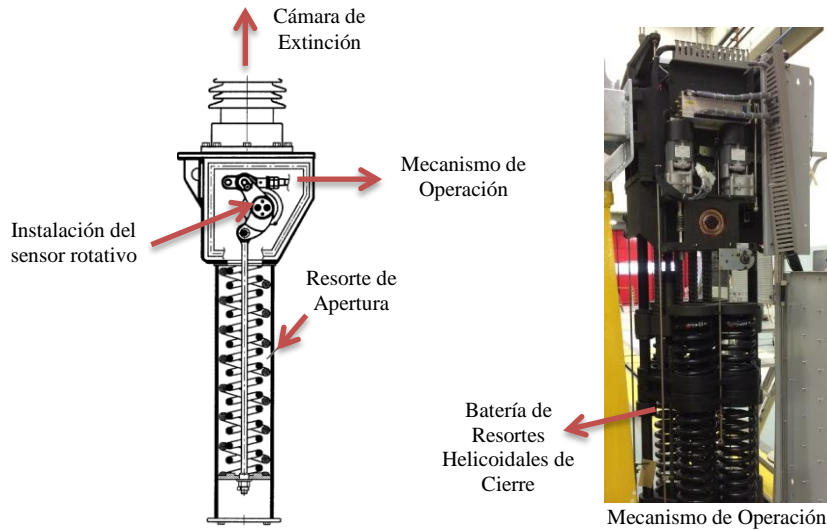


Figura 1: Interruptor tipo HPL 550kV - ABB

2.1 Medición de desplazamiento y velocidad

Los tiempos de actuación de los interruptores de potencia, son indicadores de su correcta operación, por lo cual, el conocimiento de la curva de desplazamiento en función del tiempo, tanto durante la maniobra de apertura como durante la maniobra de cierre, será una información muy importante.

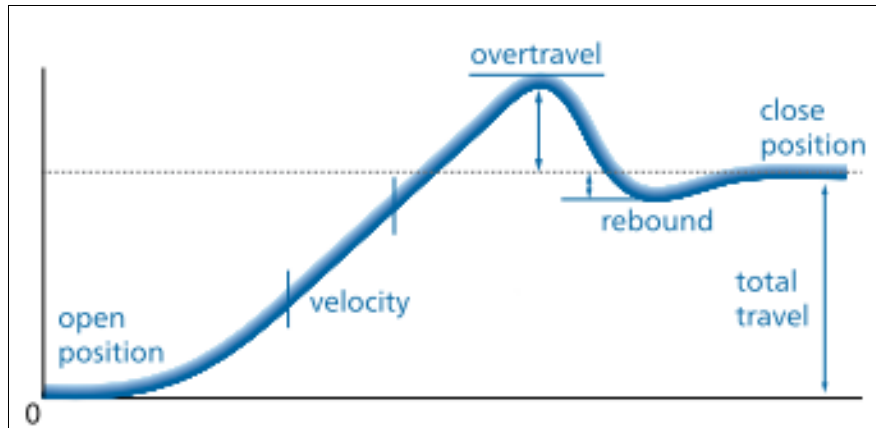


Figura 2: Definición de medidas en el desplazamiento (Fuente: Omicron, 2015)

En la figura 2, pueden ser observadas las distintas definiciones dadas por las normas técnicas, a los tramos de desplazamiento durante una maniobra de cierre. La sobrecarrera (overtravel) es definida como la diferencia entre la máxima distancia recorrida por el contacto y su posición de cierre (close position); ya el rebote (rebound) es definido como la diferencia entre el valor mínimo alcanzado posterior al valor máximo de sobrecarrera y la posición de cierre.

XII SEMINARIO DEL SECTOR ELÉCTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
25 y 26 de Agosto de 2016

Por lo general, las empresas del sector eléctrico utilizan registradores gráficos para obtención de los tiempos de cierre (C), apertura (O) y de corto-circuito (medido en el ciclo CO) de los interruptores. Estos tiempos son importantes y sus variaciones respecto a los valores de referencia denotan generalmente algún tipo de problema, entretanto sin revelar la parte del interruptor donde probablemente este se encuentre.

Para permitir la medición del desplazamiento durante las operaciones de apertura y cierre, los analizadores modernos utilizan sensores de posición mayormente de características lineales o rotativos digitales (encoder) que en los modelos de interruptores ensayados en la Itaipu, son acoplados a la biela del cárter inferior del aislador soporte. Esta biela, por ser un punto intermediario para transmisión de movimiento entre el mecanismo de operación y la cámara de extinción, no refleja directamente el desplazamiento de los contactos, careciendo de aplicación directa en una tabla de conversión que transforme el ángulo medido por el encoder (en grados) en un desplazamiento lineal, en milímetros.

Aunque sea posible construir una tabla simplificada conociéndose el ángulo total del giro de la biela y el desplazamiento nominal de los contactos (dato generalmente indicado en el manual del interruptor), tal conversión no llevará en consideración el impacto de las formas y dimensiones constructivas de las diversas partes envueltas en la transmisión de la energía desde el resorte hasta los contactos móviles. De ello resulta importante la obtención de una tabla de conversión suministrada por el fabricante, a fin de que las mediciones en campo sean lo más fidedignas posibles respecto a las realizadas en fábrica y que a partir de ello, se pueda efectivamente acompañar e identificar los desvíos de las condiciones operativas del interruptor.

En la Figura 3 se observa la diferencia cuando son sobrepuestas dos curvas de desplazamiento durante una maniobra de cierre en un polo de un interruptor de 245kV con mecanismo a resorte, siendo en azul aquella originada a través de la tabla de conversión original del fabricante y en rojo aquella creada por la Itaipu.

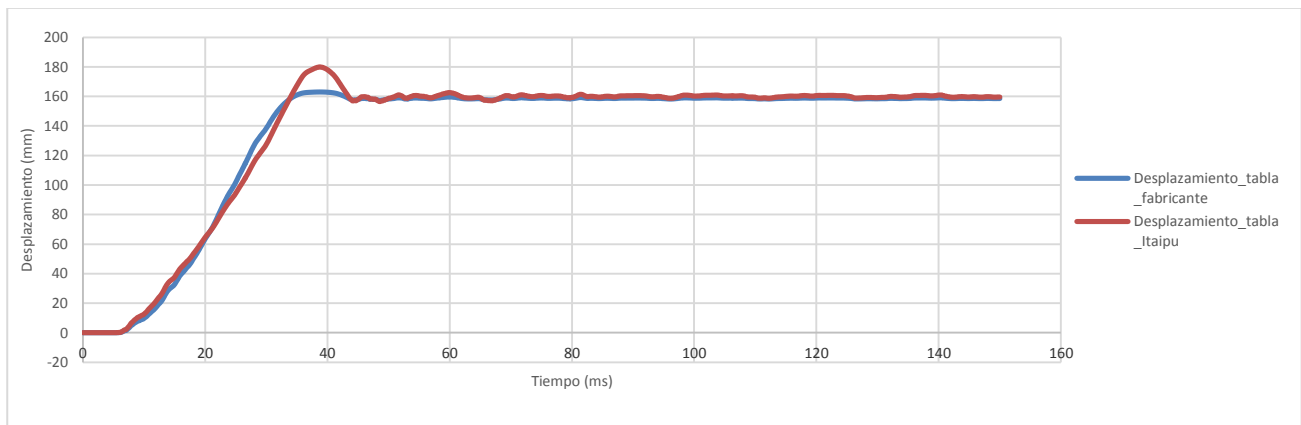


Figura 3 – Desplazamientos durante cierre (Fuente: Autor, 2016)

Como se ve, la curva en azul es más inclinada que la curva roja, mostrando que su velocidad de cierre es mayor. A título de evaluación, la Tabla I presenta: algunas referencias del fabricante del interruptor, los resultados de ensayos realizados por el fabricante en fábrica y las mediciones realizadas por la Itaipu en campo, utilizando primeramente la tabla de conversión empleada por el fabricante y luego utilizando la tabla de conversión creada por los ingenieros de la Itaipu, a partir de los datos del manual del interruptor.

Conforme se observa en las mediciones de campo, la utilización de una tabla de conversión que no sea la original del fabricante puede conducir a un diagnóstico equivocado, el cual se ve reflejado en este caso, en

XII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
25 y 26 de Agosto de 2016

subvelocidad de cierre de los contactos, cuando en realidad el interruptor está operando con la velocidad dentro de la faja admisible, aunque con aumento respecto al valor de fábrica.

Tabla I: Parámetros del interruptor ensayado (Fuente: Autor, 2016)

<i>Parámetros</i>	<i>Referencias</i>	<i>Mediciones en Fábrica</i>	<i>Mediciones en campo c/ Tabla Fabricante</i>	<i>Mediciones en campo c/ Tabla Itaipu</i>
Tiempo cierre (ms)	< 28,0	26,1	26,6	26,6
Velocidad (m/s)	7,4 a 8,0	7,6	8,0	6,4
Carrera total (mm)	157 a 163	159,9	158,6	159,6
Sobrecarrera(mm)	-	2,9	4,4	20,4
Rebote (mm)	-	1,1	1,2	3,1

Es importante destacar que los puntos de referencia para los cálculos de las velocidades fueron los mismos para ambas curvas, condición indispensable para la comparación. Tales puntos también son definidos por cada fabricante de interruptores y por cada fabricante de instrumentos de ensayo.

Cabe destacar que la utilización de una tabla de conversión que no sea aquella original del fabricante, puede afectar significativamente otros dos parámetros importantes que también deben ser analizados, que son la sobrecarrera y el rebote del interruptor. La Tabla I, expone las distorsiones significativas en los parámetros de sobrecarrera y rebote, consecuentes de la utilización de una tabla de conversión que no es aquella original suministrada por el fabricante del interruptor.

2.2 Medición de la corriente de la bobina de disparo

La energización de la bobina de cierre/apertura de los interruptores, acciona el pestillo de liberación de los resortes de cierre/apertura. La fuerza que se opone al accionamiento de estos pestillos es el rozamiento existente en el mecanismos de liberación, lo cual puede tener origen en el ajuste inadecuado del mecanismo de liberación, o en el incremento de la resistencia del pestillo debido a la oxidación que surge con el aumento de la humedad en el mecanismo a consecuencia de la inoperancia del sistema de calefacción interno del interruptor.

Un importante recurso que los analizadores ofrecen es la medición de la corriente de las bobinas de disparo de cierre y apertura, presentándolo incluso de forma gráfica. En este caso, el perfil del gráfico tiene tanta importancia cuanto el valor máximo de la corriente de la bobina.

Conforme Rusek et al. [2], inicialmente al aplicarse tensión a la bobina, la corriente aumenta rápidamente para vencer la inercia de la parte móvil de su armadura. Como el desplazamiento de la misma altera la inductancia del circuito, existe un pequeño decremento en la corriente al final de esta etapa de movimiento. En seguida, la bobina vuelve a aumentar la corriente debido al esfuerzo mecánico necesario para mover el pestillo que liberará la descarga del resorte de cierre o apertura. A partir de este instante la corriente se estabiliza y finalmente decrece con la interrupción de la aplicación del pulso de tensión. La Figura 4 ejemplifica el gráfico de corriente de la bobina de apertura para el mismo polo del interruptor de 245kV visto anteriormente.

A partir del gráfico se puede extraer informaciones relevantes, tales como:

- Corriente máxima: cuando más elevada que lo normal, puede indicar esfuerzo excesivo sobre el pestillo, por ejemplo, por deficiencia de lubricación de los rodillos u oxidación del mecanismo del pestillo.

- Tiempo entre aplicación de la tensión (instante cero) y el primer escalón: un tiempo menor que lo normal puede denotar un corto entre espiras de la bobina y un tiempo mayor una posible mala conexión de la misma.

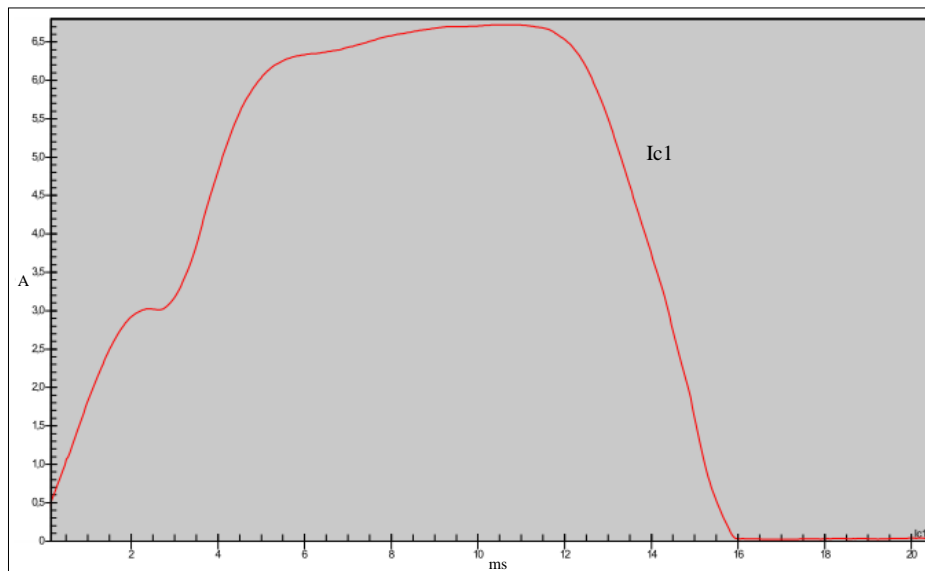


Figura 4: Gráfico de la corriente de la bobina de disparo (Fuente: Autor, 2016)

2.3 Medición de la corriente de carga de resorte

Como ya mencionado, en los interruptores con mecanismo accionados a resorte, los mismos pueden ser del tipo espiral y/o helicoidal. En general, el resorte de apertura es helicoidal y se comprime (carga) durante la maniobra de cierre de los contactos. El resorte de cierre puede ser espiral o helicoidal, siendo comprimido por uno o dos motores eléctricos. De lo anterior se desprende que el resorte de cierre debe almacenar energía suficiente para cerrar el interruptor y al mismo tiempo cargar el resorte de apertura.

El analizador utilizado por la Itaipu registra gráficamente la corriente y la tensión del motor de carga del resorte de cierre. La Figura 5 muestra este gráfico para el mismo polo del interruptor de 245kV mencionado anteriormente, destacando que en este modelo el resorte es del tipo espiral y la carga se realiza por un solo motor.

Las dos principales informaciones extraídas del gráfico son el valor máximo que alcanza la corriente (despreciando el arranque) y el tiempo total de carga. La corriente apunta al esfuerzo impuesto al motor, pudiendo indicar un defecto en el resorte de cierre o desajuste en el resorte de apertura cuando hay un aumento en relación con el valor medido en la fábrica. Ya el tiempo de carga total está vinculado a la actuación del fin de curso que determina la energía que se almacenará en el resorte, por lo tanto, un tiempo superior al medido en fábrica puede indicar un desajuste o un defecto en este dispositivo auxiliar.

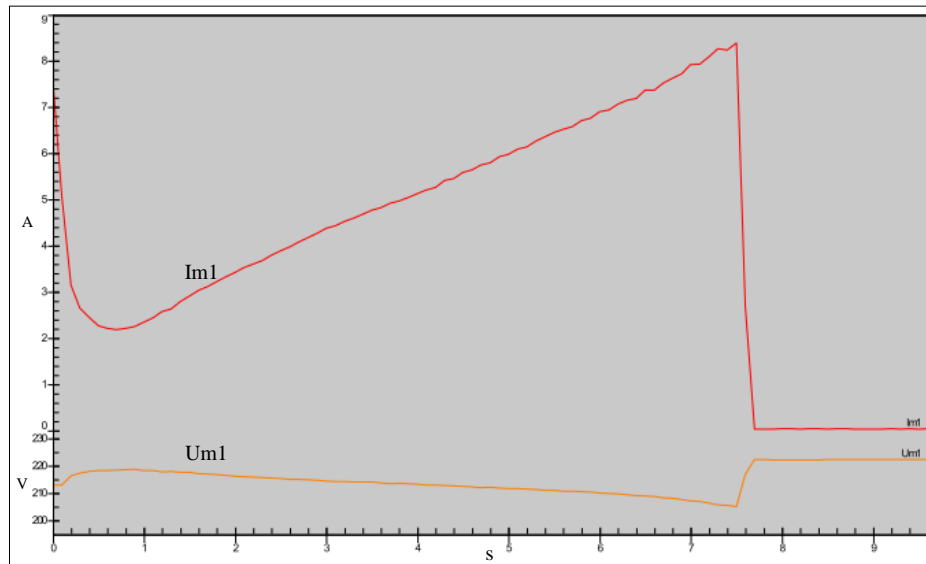


Figura 5: Corriente y tensión en el motor de carga de resorte (Fuente: Autor, 2016)

3. CÁMARA DE EXTINCIÓN

3.1 Medición de la resistencia dinámica (DRM)

Las cámaras de extinción de los interruptores actuales son compuestas por dos conjuntos de contactos, el principal y el de arco. Los contactos principales tienen por función conducir la corriente posteriormente a que la misma se haya establecido por los contactos de arco (también conocidos como contactos de sacrificio) y son construidos de cobre recubierto por plata, mientras que los contactos de arco son responsables por el establecimiento o interrupción de la corriente, incluyendo a las de corto circuito, siendo por lo tanto construidos de ligas de cobre-tungsteno para soportar elevadas temperaturas.

La medición de resistencia de contacto tradicionalmente realizada en interruptores (aquí denominada resistencia estática) es aquella obtenida cuando el interruptor se encuentra en la posición cerrado, utilizándose un método a cuatro cables, donde debe aplicarse una corriente de al menos 50A (conforme norma IEC) o 100A (conforme norma ANSI) [3], para medir la caída de tensión presente. Debe aclararse que tal resistencia evalúa apenas los contactos principales, una vez que los contactos de arco poseen una resistencia muy elevada respecto a los principales [4].

La medición de la resistencia dinámica permite evaluar el nivel de desgaste del contacto de arco. Para el caso del analizador utilizado por la Itaipu, el mismo aplica una corriente de 200A proveída por un ultra capacitor y mide la caída de voltaje a una tasa de muestreo de 25kHz. La Figura 6 presenta un ejemplo de resultado de medición de resistencia dinámica, con tres gráficos: corriente aplicada (rojo), caída de tensión (azul) y desplazamiento de contactos (blanco).

Conforme puede ser observado, es posible diferenciar claramente el inicio del movimiento, donde los contactos principales aún se encuentran cerrados, pasándose entonces al momento de transición cuando los contactos principales se abren, permaneciendo apenas los contactos de arco. La detección de esta transición

XII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
25 y 26 de Agosto de 2016

solo es posible en virtud de la diferencia de resistencia asociada a los contactos principales respecto a los de arco.

Tan importante como observar los valores de resistencia medidos, es verificar el tiempo de permanencia de los contactos de arco (overlapping), el cual es un indicador de la longitud remanente de este contacto, y por lo tanto, del nivel de desgaste del mismo.

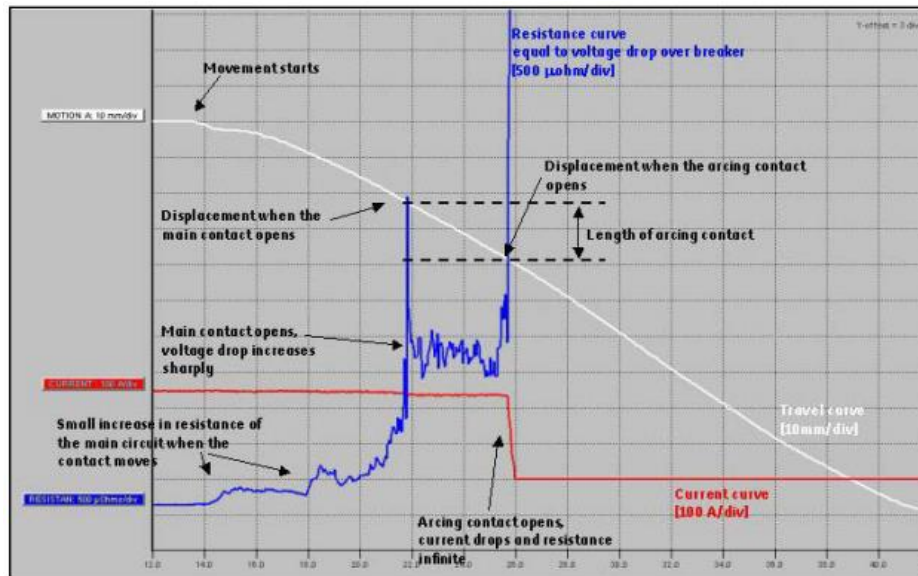


Figura 6: Ejemplo de medición de resistencia dinámica (Fuente: Programma)

3.2 Medición del tiempo y la resistencia de pre-inserción

Los interruptores de pre-inserción son utilizados en algunos interruptores, buscando atenuar las sollicitaciones transitorias y sustentadas aplicadas a los sistemas debido a la inserción súbita de una línea de transmisión, transformadores, reactores y banco de capacitores durante la maniobra de cierre. Estos resistores son instalados en paralelo con las cámaras de extinción, siendo la inserción de los mismos algunos milisegundos antes de la entrada de los contactos de arco.

La figura 7 presenta una oscilografía del polo B de un interruptor de 500kV con dos cámaras de extinción (B1 y B2) y con sus respectivos resistores de pre-inserción asociados, donde el tiempo de pre-inserción es definido como el intervalo entre el inicio de la conexión del resistor (líneas azul y violeta) y el primer toque de los contactos de arco (líneas amarilla y verde). En el presente caso, el tiempo verificado fue de 10,8ms para ambas cámaras, lo cual debe atender a criterios definidos por los estudios eléctricos de transitorios de maniobra y por especificaciones del fabricante.

En algunos sistemas con resistores de pre-inserción, se puede presentar la situación donde la retirada de los resistores de pre-inserción para realización de mediciones de resistencia toma mucho esfuerzo y tiempo del personal de mantenimiento. Es por ello que algunos instrumentos para evaluación de interruptores, disponen la opción de realización de medición de esta resistencia, mediante el empleo de un resistor auxiliar de referencia [5]. Los valores obtenidos para este interruptor fueron $R_{B1}=227\Omega$ y $R_{B2}=228\Omega$.

XII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
25 y 26 de Agosto de 2016

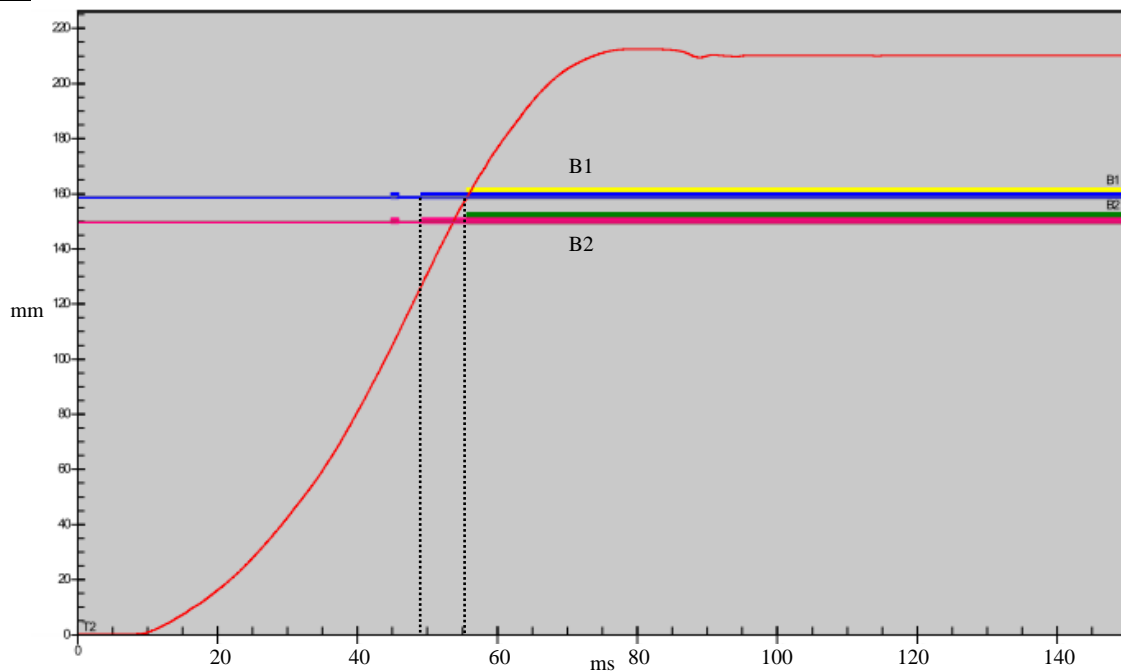


Figura 7: Medición de tiempo de pre-inserción (Fuente: Autor, 2016)

4. CONCLUSIÓN

Dada la importancia de los interruptores en el Sistema Eléctrico de Potencia, es necesario garantizar que los mismos sean evaluados adecuadamente a lo largo de su vida operativa. Técnicas usualmente empleadas, tales como mediciones de tiempo de contacto y resistencia de contacto estática no consiguen evaluar los diversos componentes de los mecanismos de operación y cámara de extinción.

Las mediciones de desplazamiento, velocidad, corriente de bobina de disparo, corriente de motor de carga, resistencia de contacto dinámica y resistencia de pre-inserción proveer datos relevantes para la obtención de un diagnóstico confiable y puntual, entretanto, la aplicación de estos ensayos demandan la consideración de algunos requisitos, bajo el riesgo de una evaluación errónea del interruptor:

- Es fundamental que se tenga para cada modelo de interruptor, su respectiva tabla de conversión proveída por el fabricante del interruptor, así como el conocimiento de los puntos de referencia que el fabricante utiliza para sus cálculos (velocidad, por ejemplo)
- Tanto el equipo que ejecuta el mantenimiento, cuanto el equipo de ingeniería de mantenimiento deben conocer en detalle los interruptores instalados, a fin de realizar adecuadamente los ensayos y las evaluaciones. Para ello se sugiere la contratación de capacitación específica junto al fabricante para cada modelo de interruptor, lo cual, en la medida de lo posible podría ser incluido en el alcance de la especificación técnica para la adquisición del interruptor.
- Diversos son los analizadores de interruptores disponibles en el mercado. Cabe a cada empresa del sector eléctrico evaluar el modelo de analizador que más se adecue a los diferentes modelos de interruptores instalados en sus instalaciones. Tal evaluación debe considerar las mediciones que se desean realizar, los accesorios y recursos adicionales ofrecidos (especialmente aquellos que permiten el acoplamiento de los transductores de movimiento), la facilidad para uso en campo (hardware y software) y la transparencia de informaciones y ajustes del software.



XII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
25 y 26 de Agosto de 2016

Como continuidad de este trabajo, se pretende mejorar el diagnóstico de los interruptores instalados en la Central Hidroeléctrica Itaipu, mediante la inclusión de las mediciones citadas en las rutinas de los mantenimientos preventivos periódicos, definiéndose incluso, valores de referencia aplicables.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] S. Frontin et al., *Equipamentos de Alta Tensão: Prospecção e Hierarquização de Inovações Tecnológicas*. Brasilia, DF: Teixeira, 2013, pág. 154.
- [2] Electric Power Systems Research. “Timings of high voltage circuit-breaker”, número 78, año 2008, páginas 2011 – 2016.
- [3] Journal of The Institution of Engineers (India): Series B. “An Overview of Dynamic Contact Resistance Measurement of HV Circuit Breaker”, volúmen 97, Junio 2016, páginas 219 – 226.
- [4] M. Landry, A. Mercier, G. Ouellet, C. Rajotte, J. Caron, M. Roy and F. Brikci, “A New Measurement Method of the Dynamic Contact Resistance of HV Circuit Breakers” in IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition Latin America, Venezuela, 2006.
- [5] Switch Analyser SA10 – User Manual, Rev. 10, Elcon AB, Sweden, 2013.
- [6] Switch Analyser Cibano 500 – Omicron, Austria, 2015.