

Comité de Estudio A2 - Transformadores

**DESEMPEÑO DE AISLADORES PASANTES Y SU EFECTO EN EL
INDICE DE FALLAS EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA**

Eduardo Velázquez Castillo*, M. Sc. Ing.
Dpto. de Ingeniería de Mantenimiento
Central Hidroeléctrica de Itaipu
Hernandarias – Paraguay

Nora Díaz Mora, Dra. Ing.
LaMat - Laboratorio de Materiais
UNIOESTE/PTI - Foz do Iguacu
Foz do Iguacu - Brasil

***RESUMEN** - De una revisión bibliográfica sobre el índice de fallas de los transformadores de potencia, se puede concluir que un gran porcentaje de las causas, guardan relación con el desempeño de los aisladores pasantes de alta tensión, los cuales son empleados para el paso del conductor a través de una superficie puesta a tierra, como es la cuba principal del transformador. La gran importancia de los aisladores pasantes, es inherente a la propia función que desempeñan, ya que deben ser capaces de transportar la corriente de los transformadores en régimen normal y de sobrecarga, mantener el aislamiento tanto para la tensión nominal como para las sobre tensiones y al mismo tiempo resistir a los esfuerzos mecánicos solicitados. En este trabajo es presentada una discusión del desempeño de los aisladores pasantes de alta tensión de los transformadores principales (18/550 kV) de los generadores de la Central Hidroeléctrica de Itaipu-CHI. Por medio de un análisis comparativo entre el aislador tipo OKTG-OIP (Oil Impregnated Paper) y el tipo EKTG-RIP (Resine Impregnated Paper), es enfatizada la relación directa del desempeño de los mismos con los índices de fallas en los transformadores. Los autores concluyen que el desempeño de los aisladores pasantes no depende del tipo (OKTG-OIP o EKTG-RIP) y si de factores tales como especificaciones técnicas, proyecto, control de calidad en el proceso de fabricación, formas de almacenamiento, cuidados/métodos de mantenimiento y las condiciones de operación, para lo cual, un aspecto determinante es acompañar el comportamiento de los parámetros más importantes y adecuados, por medio de un sistema de monitoreo eficiente.*

Palabras-clave: Transformador de Potencia - Falla - Aislador Pasante - Material Aislante - Degradación.

1. INTRODUCCION

En la Central Hidroeléctrica de la Itaipu - CHI, desde la entrada en operación de la primera unidad generadora, los aisladores pasantes de alta tensión instalados en los transformadores principales de los generadores - TUs, inicialmente fueron en su totalidad del tipo OKTG – OIP (*Oil Impregnated Paper*).

Con el objetivo de minimizar el elevado índice de fallas de esos aisladores pasantes, la Itaipu Binacional adoptó varias medidas, que incluyeron entre otras, exigencias más rigurosas en las especificaciones técnicas, algunas modificaciones de proyecto, control de calidad del proceso de fabricación y ensayos de aceptación en fabrica más exigentes, con la utilización en ciertos casos, de laboratorios de terceros y más recientemente, inclusive la sustitución de todos los aisladores pasantes del tipo OKTG – OIP por los del tipo EKTG – RIP (*Resine Impregnated Paper*), iniciada en el año 2004 y concluida en 2007. Al mismo tiempo, en la búsqueda de alternativas para optimizar el parque de aisladores de reserva, se vienen planteando nuevos contratos con otros fabricantes para el suministro de más aisladores pasantes.

En el caso de la CHI, una falla en esos transformadores, debido a la gran capacidad de transformación de energía y a su importancia energética/operacional, podrá ocasionar grandes pérdidas por lucro cesante en la

interrupción del suministro de energía para el mercado eléctrico brasileño y paraguayo. Además de los perjuicios en el suministro de energía, están envueltos elevados costos en la reconstitución del sistema, sustitución del transformador fallado, sumados a las implicancias técnico/económicas de un reparo, sea en la fábrica o en el campo (en las instalaciones de la CHI) y/o adquisición de nuevos transformadores [1], para la reposición.

Por otro lado, debido a que la localización de estos transformadores es subterránea y que la parte activa de los mismos está sumergida en grandes volúmenes de aceite mineral aislante (de 30.850 a 48.350 litros), fallas incipientes que no sean detectadas en tiempo hábil, pueden resultar en explosiones frecuentemente acompañadas de incendios y/o pérdidas de aceite, colocando en riesgo la integridad de las personas y el medio ambiente, además de provocar severas e incalculables consecuencias a los demás equipos e sistemas instalados en la casa de maquinas [1].

2. AISLADOR PASANTE

Definido como pieza o estructura de material aislante, que permite el paso aislado de un conductor a través de una pared no aislante [2], los aisladores pasantes pueden ser clasificados de acuerdo a las normas técnicas, del punto de vista de la aplicación, instalación, características constructivas y a veces hasta por los tipos de materiales aislantes utilizados. Este trabajo se limita a tratar los dos tipos de aisladores pasantes de alta tensión utilizados en los transformadores principales de los generadores de la Central Hidroeléctrica de Itaipu - CHI, que son tipo OKTG-OIP (*Oil Impregnated Paper*) y EKTG-RIP (*Resine Impregnated Paper*).

2.1 Características principales

Los dos tipos aquí analizados son denominados Aisladores Pasantes Capacitivos, en los cuales las capas conductoras de aluminio, son dispuestas dentro del material aislante a fin de garantizar la distribución conveniente del campo eléctrico; la parte inferior de estos aisladores está sumergida en el aceite mineral aislante del tanque principal del transformador y la parte superior es conectada a la Subestación Aislada a Gas SF₆ (GIS), por medio de un involucro aislado con dicho gas.

El aislamiento principal del aislador pasante tipo OKTG-OIP (*Oil Impregnated Paper*) consiste en un núcleo formado por papel impregnado con aceite aislante. La diferencia fundamental con el tipo EKTG-RIP (*Resine Impregnated Paper*), es que en este caso, el papel es impregnado con resina.

Los principales componentes de los aisladores pasantes son indicadas en la Fig. 1.

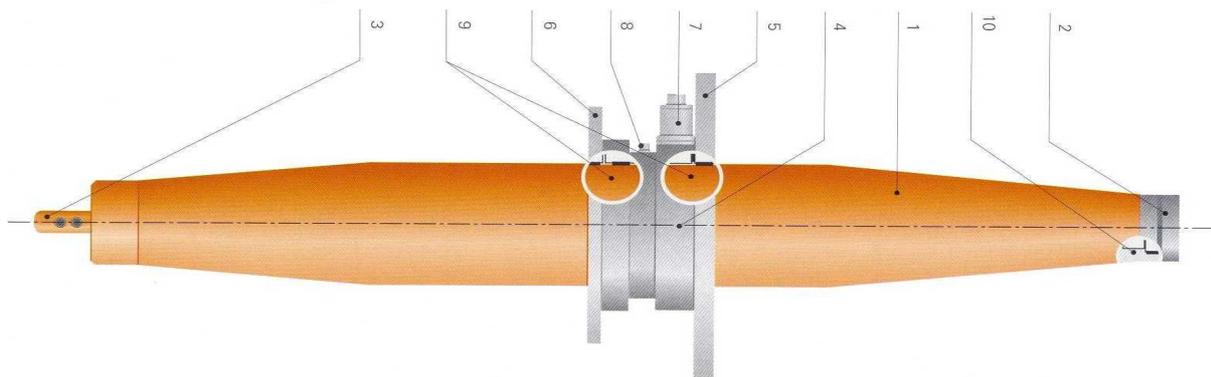


Fig. 1: Partes principales de un Aislador Pasante [Fuente HSP]

(1: Cuerpo condensivo, 2: Conexión SF6, 3: Conexión al transformador, 4: Flange, 5: Disco de fijación lado SF6, 6: Disco de fijación lado aceite, 7: Tap de potencial, 8: válvula de gas 9: sistema de sellado del flange, 10: sistema de sellado del líquido).

2.2 Proceso de fabricación

A pesar que el proceso de fabricación conste de varias etapas comunes para ambos tipos de Aislador Pasante (OIP y RIP) y algunas que son específicas, a seguir son analizadas y destacadas apenas las etapas consideradas de mayor probabilidad de incidencia en las causas de las fallas.

- Los cortes de las hojas de aluminio para las capas conductoras (capacitivas) aunque realizados mecánicamente pueden presentar imperfecciones;
- los trabajos de doblado y acomodaciones, son realizados en forma manual y por tanto sujetos a imperfecciones por fallas humanas.
- el enrollamiento de las capas, de papel aislante y de aluminio, aunque realizado mecánicamente, bajo el control de un operador, puede resultar en pequeñas arrugas;
- el pre-secado es realizado en estufas con temperaturas controladas, que están sujetas a la absorción de humedad atmosférica e impurezas;
- La impregnación del papel aislante, con resina o aceite al igual que el secado son realizados con el cuerpo condensivo en ambiente con tiempo y temperatura que deben ser controladas para evitar la absorción de humedad atmosférica e impurezas.
- El embalaje, transporte y almacenamiento inadecuados, también pueden ser considerados causas de las fallas.

2.3 Ensayos eléctricos

Estos ensayos tienen por finalidad la determinación de las propiedades y características eléctricas para evaluar la calidad o eficiencia de un equipo o componente eléctrico [2]. Pueden ser clasificados en ensayos de aceptación en fábrica y ensayos de campo.

2.3.1 Ensayos de Aceptación en Fábrica

Son los ensayos realizados en la fábrica (de tipo, rutina y especiales), con acompañamiento del cliente, quien con base a los resultados aprueba o rechaza el equipo. Por escapar a los objetivos específicos de este trabajo no son ampliados cada uno de estos ensayos, sin embargo son descritos brevemente los considerados de mayor importancia en la detección de fallas.

2.3.2 Tensión aplicada con medida de descargas parciales

Este ensayo tiene por finalidad verificar el estado general del dieléctrico y consiste en aplicar una diferencia de potencial a frecuencia industrial, con una barradura de valores, entre los extremos del conductor central y la derivación principal, con medidas de la capacitancia principal (C_1) y disipación dieléctrica ($\tan\delta$). Este ensayo es realizado antes y después de los Ensayos de Impulso, para verificar eventuales daños en el dieléctrico a raíz de los mismos.

Las Descargas Parciales – DP [3] son descargas eléctricas que cortocircuitan parte del aislamiento entre dos electrodos y pueden ocurrir en cavidades del aislamiento con características dieléctricas diferentes. También pueden ocurrir junto a aristas vivas o puntas de superficies metálicas. Pueden ser causadas también por partículas metálicas, humedad, polvos o fibras, dentro o en la superficie del aislamiento. Cada DP individual origina un pulso único de corriente en el dieléctrico y en el circuito externo conectado al objeto sobre ensayo.

Una disminución en la intensidad de DP, no siempre es indicio de normalidad, ya que con frecuencia se debe a la fragilización del aislamiento y consecuente reducción de la resistencia mecánica, pudiendo esto preceder a una descarga disruptiva, llamado así al fenómeno asociado a la falla del aislamiento bajo sollicitación eléctrica, en la cual la descarga interconecta los electrodos del aislamiento ensayado, reduciendo la tensión entre ellos a cero o próximo a cero.

2.3.3 Ensayos de impulso

El ensayo de impulso iniciado por 1930 [4], fue idealizado para aplicar esfuerzos al dieléctrico que corresponden aproximadamente a la acción de surtos de tensión debidos a descargas atmosféricas o maniobras eléctricas y tiene la finalidad de verificar el estado general del dieléctrico ante las sollicitaciones, por medio de la capacitancia total equivalente (C_1).

Con relación a la filosofía, utilidad y la finalidad del ensayo de impulso, tres corrientes dividen la opinión de los fabricantes y usuarios [4]. La primera considera que éste ensayo está destinado meramente a la verificación dieléctrica del proyecto y la graduación de los niveles de aislamiento, con la finalidad de relacionar éstos factores con la soportabilidad del material ante surtos eléctricos estandarizados dentro de limitantes económicos. Para la segunda corriente consiste principalmente en una verificación de errores groseros de proyecto y fabricación y naturalmente defiende la necesidad de éste ensayo en cada una de las unidades producidas. La tercera corriente, considerando la dificultad de la medición meticulosa del surto aplicado así como la complejidad en la detección exacta de los defectos invisibles, ocasionados durante éste ensayo, concluyen que es prácticamente imposible que una unidad pase por este ensayo, sin generar alguna fragilidad de su dieléctrico y por tanto optan por su eliminación como ensayo de aceptación, dejando su utilización al ingeniero proyectista como herramienta de laboratorio. En la actualidad, en la Itaipu Binacional independientemente de los méritos de cada línea de pensamiento, el ensayo de impulso se tornó un ítem primordial de los ensayos de aceptación en fabrica, habiendo sido incorporado además por Pradenas [5], como requisito complementar en las especificaciones técnicas, el correspondiente registro de corriente en los ensayos de aisladores pasantes, por considerar fundamental, para la detección de fallas incipientes.

3. FALLAS DE AISLADORES PASANTES

El tiempo de operación de los primeros Transformadores Principales (TUs), de los Generadores, varia entre 18 y 25 años (TABLA I), excepto los correspondientes a las dos nuevas Unidades Generatoras (9A y 18A), con casi 3 años de operación.

TABLA I. ENTRADA EN OPERACIÓN DE LAS UNIDADES GENERADORAS DE LA ITAIPU

UNIDADES 50 Hz.	FECHA	UNIDADES 60 Hz	FECHA
01	19-03-84	10	31-08-89
02	27-12-84	11	28-06-89
03	20-08-85	12	02-02-89
04	17-12-85	13	09-09-88
05	04-05-87	14	15-12-86
06	16-07-87	15	11-11-86
07	23-10-87	16	07-06-90
08	23-02-88	17	09-01-91
09	14-07-88	18	08-04-91
9A	15-06-06	18A	22-12-06

En la Tabla II, son citadas las indisponibilidades operativas ocurridas por año a partir de 1997, consistente en las paradas de las maquinas generatoras por defectos de los transformadores de potencia, clasificados por los componentes que causaron los defectos, donde se observa el número elevado de defectos debido a los Aisladores Pasantes, comparado con los otros componentes. Para los fines de este trabajo fueron adoptadas las definiciones del SOM [6] para FALLA, como siendo toda alteración física o química en el estado del equipo, que lo impide desempeñar su función requerida y lo lleva invariablemente a la indisponibilidad operativa; y para DEFECTO, como siendo toda alteración física o química en el estado del equipo que no lo impide desempeñar la función requerida, pudiendo operar con restricciones, utilizado como siendo Falla Incipiente, esto es, el inicio de la falla.

TABLA II. INDISPONIBILIDAD OPERATIVA DE LOS GENERADORES POR AÑO Y COMPONENTE

Año	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	Total
Componente													
Aislador P. de AT	01	01	01		01	03	01	01	05	04	08		26
Intercamb. de calor		01	01	02	03								07
Panel de control-KT	02	03	03	01	03	01	01		01			01	16
Transformador		01	04	02	01		01	01			03		14
Tubos de agua		01		01									02
Tubos de aceite			01										01
Sist. de monitoreo												01	01
Total	03	08	10	06	08	04	03	02	06	04	11	02	67

En la TABLA IV están indicadas en forma cronológica las fallas francas ocurridas hasta la fecha con los transformadores principales, destacando las partes donde se originaron las fallas.

TABLA IV FALLAS OCURRIDAS EN LOS TRANSFORMADORES PRINCIPALES - TUS

LOCAL DE INSTALACION	AÑO DE FABRIC.	FECHA DE LA FALLA	ORIGEN DE LA FALLA	EFEECTO DE LA FALLA
TU 01, Fase R-50 Hz	1982	18/10/1987	Bobinas de Alta Tensión	Explosión
TU 11, Fase A-60 Hz	1987	26/04/1990	Conmutador de derivaciones	Explosión
TU 17, Fase C-60 Hz	1989	26/04/1993	Bobinas de Alta Tensión	Explosión
TU 08, Fase T-50 Hz	1984	04/05/1997	Bobinas de Alta Tensión	Explosión
TU 07, Fase R-50 Hz	1993	12/07/2001	Bobinas de Alta Tensión	Explosión
TU 01, Fase R-50Hz	1982	10/11/2002	Aislador Pasante de Alta Tensión	Explosión
TU 15, Fase B-60Hz	1982	20/06/2003	Bobinas Alta Tensión y Núcleo	Explosión
TU 10, Fase B-60Hz	1987	03/06/2006	Aislador Pasante de Alta Tensión	Gran explosión e principio de incendio

Cabe destacar que por ventura ninguna de estas fallas, como mostrado en la Tabla III, fueron asociados a los grandes e incontrolables incendios, con desastrosas consecuencias, relatados con frecuencia en el sector eléctrico mundial, excepto algunas de las fallas que tuvieron como consecuencia explosiones y principio de incendio, sin graves consecuencias, que fueron controlados en tiempo hábil, en parte debido a los sistemas contra incendio instalados, agua nebulizada, puertas corta-fuego con retirada de oxígeno del recinto y sistema de CO₂.

3.1 Modos de falla

Para investigar el modo de las fallas en aisladores del tipo EKTG-RIP, dependiendo del estado en que se encuentra después de la falla, es realizada una disección, que consiste en cortes transversales sucesivos, hasta alcanzar el local exacto donde se produjo la descarga (cortocircuito entre camadas). Un primer corte es realizado al término del flange metálico (Foto 1), para verificar el lado del cortocircuito entre camadas, lado sumergido en el aceite o en SF₆. Esta verificación es realizada con un equipo *Megger* con la aplicación de 2,5 kVcc (Foto 2). Tantos cortes, cuanto sean necesarios son realizados en forma sucesiva, en piezas o partes cada vez menores, en la búsqueda minuciosa de evidencias de descargas.



Foto 1: RIP - Lado aceite aislante



Foto 2: RIP-Verificación de camadas en corto

En el caso de los aisladores del tipo OKTG-OIP (*Oil Impregnated Paper*), una practica común es proceder al desenrollado de las camadas aislante (papel) y conductiva (hojas de aluminio) y por inspección visual verificase la integridad de los materiales y señales de descarga. Sin embargo, dependiendo del tipo y la magnitud de una falla por el estado en que queda el aislador esto no siempre es posible, como se puede observar en las fotos 3 y 4.



Foto 3: OIP - Lado gas SF6



Foto 4: OIP - Lado aceite aislante

3.2 Causas de falla

Como mencionado anteriormente las causas de fallas de los aisladores pasantes están relacionadas con factores tales como especificaciones técnicas, proyecto, control de calidad en el proceso de fabricación, formas de almacenamiento, cuidados/métodos de mantenimiento y condiciones de operación. En ese sentido, algunas de las hipótesis más comunes sobre las causas de las fallas de los aisladores pasantes del tipo OKTG-OIP de los transformadores principales de los generadores de la Itaipu, que guardan relación con la fabricación, son irregularidades en el doblado de las hojas de aluminio e imperfecciones derivadas de los cortes tanto rectos como curvos. Estos defectos pueden tener como consecuencia una distribución no uniforme del campo eléctrico aumentando las posibilidades de descargas eléctricas en el cuerpo condensivo.

Otra causa de la fallas puede ser atribuida al exceso de humedad del núcleo, que se constituye como siendo uno de los factores catalizadores de la degradación de los materiales dieléctricos, que tiene como consecuencia directa la reducción de la soportabilidad a las solicitaciones, no siempre detectadas en tiempo hábil por medio del acompañamiento de evolución de los gases disueltos en el aceite u otras técnicas predictivas.

En la tabla IV es presentado un resumen de las fallas más comunes en los componentes de los aisladores pasantes, las causas, los efectos y los parámetros para la detección [7].

Como se observa en la TABLA IV, las causas de las fallas tienen relación directa con la degradación sufrida por cada uno de los materiales, sean ellos poliméricos, cerámicos o metálicos, en consecuencia de las solicitaciones transitorias o permanentes de diferente intensidad, sean ellas de naturaleza térmica, mecánica, eléctrica o química.

Con relación a la porcelana, a pesar que la mayoría de los materiales cerámicos son químicamente estables, cuando en contacto con atmósferas comunes, sufren deterioración por efecto de factores mecánicos como vibración y erosión; físicos como variaciones de temperatura y químicos como sustancias químicas agresivas y partículas disueltas que conducen a un proceso conjunto de lixiviación/erosión y comprometimiento de las propiedades dieléctricas.

Un mecanismo de falla de estos materiales cerámicos cuando sometidos a gradientes de temperatura es debido a la baja conductividad térmica y bajo coeficiente de expansión térmica que presentan, cuando se calientan las capas más calientes de la superficie se expanden con relación a las capas internas más frías y como esos materiales son frágiles pueden experimentar una fractura de la superficie en consecuencia de variaciones dimensionales no-uniformes, en lo que es conocido por choque térmico. La temperatura también afecta la constante dieléctrica relativa de esos materiales que presentan polarización iónica, en consecuencia del aumento de los portadores de carga y su movilidad iónica.

Por otro lado, sustancias sólidas derivadas de la descomposición del aceite depositadas en la superficie de la pared interna del aislador se tornan conductoras por la disociación de partículas ionizables, propiciando la formación de caminos conductivos superficiales que pueden conducir a descargas a lo largo de la superficie. De esta forma, un alto valor del factor de potencia indica la presencia de contaminantes solubles o de productos de deterioración y envejecimiento del aceite que generan iones conductores de carga, tales como agua, productos de oxidación, partículas coloidales, trazos de cobre, que pueden llevar a una reducción de la rigidez dieléctrica del aislador de porcelana.

El papel aislante impregnado, ya sea con resina o aceite, se constituye en un material polimérico y presenta estructura compleja, con mecanismos de degradación no totalmente comprendidos, pero que están directamente relacionados con la ruptura de los enlaces químicos de *Van der Waals* por fenómenos físicos (energía térmica) y químicos (reacciones químicas con el oxígeno, agentes oxidantes y la humedad). Así, condiciones severas pueden romper esos enlaces y cualquier cambio en la estructura afectará las propiedades de esos materiales [8].

Para estos materiales que poseen polarización por orientación molecular, el aumento de temperatura tiene efectos importantes debido a que la agitación térmica provoca la reducción de la constante dieléctrica. Un gradiente de temperatura afecta la estructura molecular de la celulosa inclusive en la ausencia de agentes oxidantes y humedad, debido a que el calor tiende a quebrar los enlaces glucosídicos y abrir el anillo de glucosa de las cadenas poliméricas, produciendo moléculas de glucosa libre, humedad, monóxido y dióxido de carbono y ácidos orgánicos. Por citar un ejemplo, las moléculas de agua, pueden penetrar por difusión en la estructura del papel, tensionando las fibras hasta el rompimiento y contribuyendo con un proceso continuo de desintegración del aislamiento sólido. En consecuencia, visto que las propiedades de los polímeros están directamente relacionadas con el tamaño de las macromoléculas, ese fraccionamiento provoca daños irreparables en el aislamiento, reduciendo la capacidad de las fibras de soportar esfuerzos mecánicos, que al mismo tiempo, reduce la rigidez dieléctrica, disminuyendo la capacidad de resistir a corto circuitos en detrimento de la vida útil del equipo.

La celulosa es completamente susceptible a la presencia de contaminantes como el oxígeno atmosférico, producto de un proceso de secado ineficiente. Los productos de la reacción de oxidación dependen de la naturaleza del agente oxidante y del pH, que tanto con valor alto (alcalinidad) o bajo (acidez) favorecen a la oxidación, que obviamente provoca la fragilización del enlace glucosídico, produciendo aun mas humedad.

En el caso del aceite mineral aislante, las propiedades físicas y químicas son afectadas por reacciones químicas con contaminación con partículas externas, humedad, oxígeno del aire atmosférico y otras impurezas generadas por la degradación del papel. El oxígeno, además de degradar el papel aislante, ataca fuertemente el aceite, formando ácidos que atacan el propio papel y en una etapa mas avanzada de degradación, se forma borra que dificulta la circulación del aceite provocando el aumento de la temperatura. Por otro lado, una elevada concentración de humedad interna, reduce la rigidez dieléctrica del aceite, estableciendo las condiciones propicias para fallas eléctricas internas. La contaminación por agentes degradantes puede también ocurrir por efecto de variaciones de temperatura sea del ambiente o por

variaciones del régimen de carga del equipo, que provocan la expansión o la contracción del volumen de aceite.

La formación de burbujas o pequeños espacios vacíos en el sistema papel-aceite aislante, es extremadamente preocupante, considerando la baja rigidez dieléctrica de las burbujas y los elevados riesgos de fallas eléctricas. Así, los riesgos de formación de burbujas, durante la sobrecarga, están asociados a factores tales como: cantidad de gases disueltos en el aceite; humedad en la celulosa; variaciones bruscas de la presión atmosférica; temperatura ambiente.

4. RECOMENDACIONES

Fueron adoptadas otras medidas que ayudaron a mitigar las fallas de los aisladores pasantes, expresadas a seguir como sugerencias o recomendaciones:

- Contar con métodos de detección de fallas incipientes que acompañen las últimas actualizaciones tecnológicas en lo que se refiere a parámetros analizados y la confiabilidad de los mismos, como ser el monitoreo *on line* de la variación de capacitancia y $\tan\delta$.
- Vista la falta de precisión en la lectura de los Dispositivos de Potencial de *Bushing* (DPB), analizar las implicancias de prescindir de su uso, posibilitando el monitoreo conjunto y más confiable de la capacitancia y $\tan\delta$.
- Mantener un banco de datos de fallas (histórico), confiable y actualizado con las informaciones adecuadas para un análisis estadístico rápido y eficaz.
- Es sumamente importante certificarse si el laboratorio está equipado adecuadamente y reúne todos los requisitos exigidos para la confiabilidad necesaria a los ensayos de aceptación en fábrica a ser realizados.
- Realizar simulaciones y estudios conclusivos sobre las solicitaciones a que son sometidos los aisladores durante la operación, especialmente con relación al VFT (*Very Fast Transient*), cuando el transformador está asociado a una subestación no convencional como por ejemplo la aislada a gas SF6 como es el caso de la Itaipu Binacional.

FALLAS Y COMPONENTE	CAUSAS TÍPICAS DE LA DETIORACION	EFFECTOS TÍPICOS DE LAS FALAS	PARAMETROS CLAVE
Daños en la Porcelana	- Variaciones bruscas de temperatura. - Condiciones ambientales extremas. - Productos conductivos derivados de aceite, depositados en la pared interna del aislador	- Formación de depósito de suciedad. - Ingreso de agua. - Reducción de la rigidez dieléctrica	- Alteraciones de $\tan \delta$
Deterioración del aislamiento del cuerpo condensito	- Temperaturas elevadas de operación. - Pérdida de aceite y desimpregnación, secado de papel y ruptura del mismo.	- Descarga parcial localizada promoviendo deterioración adicional del papel e aceite (avalancha térmica)	- Descarga parcial. - Alteraciones de corriente y $\tan \delta$
Deterioración del aceite	- Mecanismos similares a los ocurridos en los transformadores.	- Descarga parcial localizada promoviendo deterioración adicional del papel e aceite (avalancha térmica)	- Descarga parcial. - Alteraciones de I y $\tan \delta$.
Cortocircuito entre capas conductivas	- Defectos de proyecto y/o fabricación. - Envejecimiento del papel y/o aceite. - Migración de tinta conductiva.	- Elevación de la capacitancia y elevación de la corriente capacitiva.	- Elevación de capacitancia C1. - Elevación de capacitancia C2.
Pequeños espacios vacíos en el material aislante	- Burbujas en el sistema de aislamiento.	- Daños localizados en aislamiento. - Formación de carbono y/o cortocircuito e/ capas conductivas.	- Descarga parcial. - Alteraciones de I y $\tan \delta$.
Elevadas variaciones de temperatura en otros componentes del aislador pasante	- Coeficientes de expansión térmica diferentes en los componentes del aislador pasante. - El enfriamiento rápido puede crear burbujas de aire y/o gas en el aceite.	- Ciclos térmicos frecuentes resultan en la deterioración excesiva y comprometen la estanqueidad. - Consecuente pérdida de aceite y/o ingreso de agua y/o humedad. - Daños de aislamiento de papel y posible corrosión en la cámara del TAP	- Elevación de $\tan \delta$. - Elevación de descarga parcial. - La $\tan \delta$ se torna sensible a la temperatura.

TABLA IV. FALLAS TÍPICAS EN AISLADORES PASANTES

5. CONCLUSIONES

Con base a los datos levantados se puede concluir que los Aisladores Pasantes de Alta Tensión fueron los principales causantes de los defectos y fallas de los Transformadores Principales de los Generadores de la Central Hidroeléctrica de Itaipu en los últimos años.

El análisis estadístico sobre el índice de fallas y defectos de los TUs refuerza más aun la necesidad de tomar medidas preventivas para mitigar dichas fallas, con cuidados cada vez mas rigurosos y minuciosos en el análisis de riesgos, vista especialmente la edad adulta, cada vez mas próxima del fin de vida útil de los mismos, llevando indefectiblemente en consideración las implicancias de una falla, casi siempre acompañada de explosión e incendio, con graves consecuencias.

El desempeño de los aisladores pasantes dependen de varios aspectos, tales como especificación técnica y proyecto adecuados; estricto control de calidad en el proceso de fabricación, ensayos de aceptación en fábrica rigurosos; formas de almacenamiento y métodos de mantenimiento actualizados y condiciones de operación acorde a la soportabilidad.

Es de fundamental importancia la experiencia y pericia del inspector, ya que además de los criterios de aprobación del equipo, debe llevar en cuenta las particularidades y/o limitaciones de las instalaciones y equipos de laboratorio.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

[1] Velázquez, C.E. - Aplicação de Ontologia e Sistema Especialista para Diagnóstico de Falhas em Transformadores de Potência - Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC - Brasil, Novembro 2003.

[2] NBR 5034 – Buchas para Tensões Alternadas Superiores a 1 kV – ABNT, 1989.

[3] NBR 6940 – Técnicas de Ensaio Elétricos de Alta Tensão – Medição de Descargas Parciais - Procedimento – ABNT, 1993.

[4] Rheinboldt, D.A. – O Ensaio de Impulso – Engenharia de Controle de Qualidade – G.E.S.A. – Campinas –SP-Brasil -

[5] Pradenas M, L.A. – Consultor autonomo - Contacto personal - São Paulo - BR. pradel@ig.com, 09/2008.

[6] SOM - Descrição geral. Manual G01. Itaipu Binacional - Foz do Iguaçu, março 1995.

[7] Mendes, J.C. – Sistemas de monitoreo de Buchas – ABB Asea Brown Boveri . Divisao de Transformadores – Guarulhos – SP- Brasil – 2008.

[8] Diaz M, N. – Materiales para Engenharia - Notas de Aula – Unioeste – UHI/PTI – Foz do Iguaçu – PR – Brasil – 2008.