



DETECCIÓN DE AGUA EN EL ACEITE LUBRICANTE DE COJINETES DE HIDROGENERADORES A TRAVÉS DE LA MEDICIÓN DE ACTIVIDAD DE AGUA (aw)

**Armando L. Ortiz Torres, Nilton S. Ramos Quoirin, Hugo C. Villasanti Medina,
Marco Aurelio S. Mauro, Joao Maria Marra, Felipe Trevisan**

Itaipu Binacional

Paraguay - Brasil

RESUMEN

Este trabajo presenta un estudio para la implementación experimental de un sensor de actividad de agua (aw) para la detección de agua en el aceite de cojinetes de hidrogeneradores. El aceite puede ser contaminado con agua por pérdida en los intercambiadores de calor internos en los cojinetes. La necesidad de buscar una nueva tecnología de detección de agua en el aceite lubricante de los cojinetes de las unidades generadoras de la Itaipu Binacional se debió al mal desempeño y obsolescencia del antiguo sistema de detección. En una primera etapa, para evaluar el desempeño y aplicabilidad del sensor, fue montado un prototipo en el laboratorio con la intención de simular las condiciones de operación del cojinete. Los resultados obtenidos en la primera etapa fueron considerados satisfactorios y permitieron continuar los estudios. En una segunda etapa, se realizó la instalación del sensor en el Cojinete Guía de la Turbina (CGT) de la Unidad Generadora 01 para una evaluación del sistema en condiciones reales de operación. Para evaluar la respuesta y capacidad de detección de una pérdida de agua en el cojinete de la unidad fue realizado un ensayo en donde fue introducido agua en el cojinete en valores calculados para saturar el aceite. Se comprobó que el nuevo sensor indica correctamente la presencia del agua añadida. Después de la realización de este ensayo, no se observaron actuaciones o indicaciones indebidas del dispositivo. Otra situación en la cual se debió verificar el buen funcionamiento del sensor es cuando la unidad generadora para por conveniencia operativa, en donde la temperatura del aceite baja y podría ocurrir la saturación del mismo. Para todos los ensayos realizados y condiciones operativas impuestas, el nuevo sistema de detección de agua en el aceite tuvo desempeño satisfactorio.

PALABRAS CLAVES

Agua en el Aceite, Actividad de Agua, Cojinetes de Hidrogeneradores, Saturación del Aceite

1 INTRODUCCIÓN

El agua en fluidos hidráulicos y lubricantes puede causar efectos dañinos al desempeño del fluido, y, por lo tanto, normalmente es considerada un contaminante. El agua puede estar presente como agua libre y/o disuelta. Todo fluido tiene la capacidad de absorber una cierta cantidad de agua disuelta. El valor máximo de agua que un determinado líquido puede contener en la solución se conoce como punto de saturación. De la misma forma que se dice que el aire está con 100% de humedad relativa cuando él contiene todo el agua que soporta, se dice que un fluido está saturado cuando él contiene todo el agua que puede soportar. Cualquier cantidad de agua adicional en el fluido saturado ocasionará la formación de agua libre.

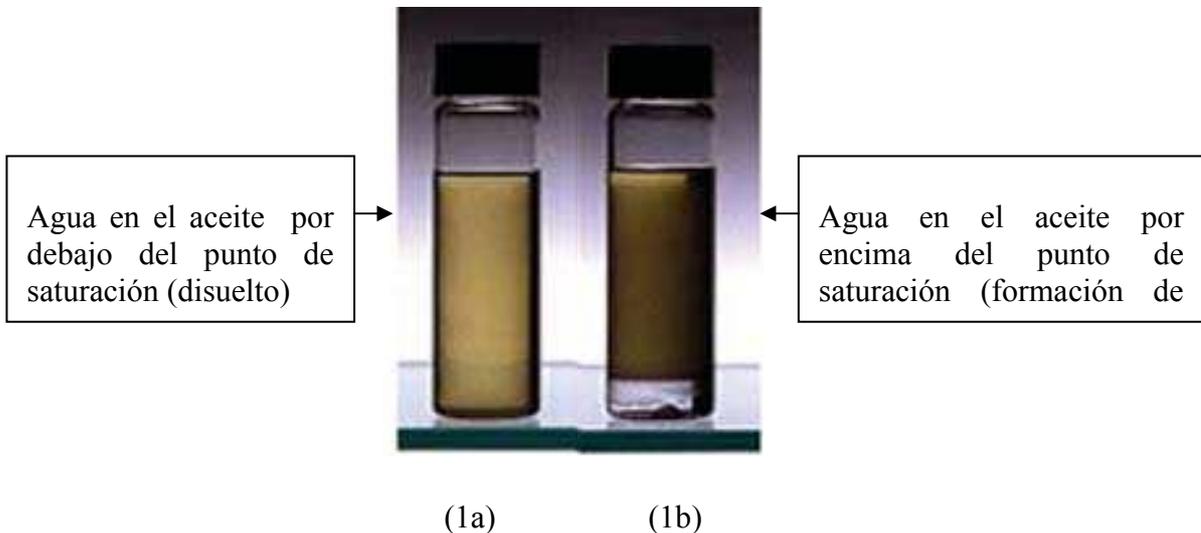


Figura 1 - Muestra de aceites con agua disuelta (1a) y agua libre (1b)

Es aceptado que el agua libre representa la mayor causa de problemas asociados a la contaminación de fluidos hidráulicos y lubricantes. A continuación presentamos una lista de problemas causados y/o agravados debido a la presencia de agua libre en fluidos [1].

- **Corrosión:** Produce óxidos abrasivos, como la herrumbre que raya las superficies, bloquea los claros de lubricación y se parte y fracciona para dañar las partes en movimiento.
- **Pérdida de resistencia de película:** Cuando el agua contamina la película lubricante, ésta desplaza al aceite. El agua no permite que las superficies se mantengan separadas, ocasionando alta fricción, desgaste adhesivo e incluso agarrotamiento.
- **Oxidación del aceite:** El agua acelera la oxidación del aceite. Las consecuencias negativas incluyen incremento de viscosidad, acidez y resinas insolubles.
- **Agotamiento de aditivos:** Cuando los aditivos migran al agua libre, la concentración de algunos aditivos queda por debajo de los niveles efectivos.

- **Hidrólisis:** En presencia de agua, aditivos base éster y fluidos sintéticos (tales como ésteres fosfatados y poliol ésteres) se descomponen en ácidos y alcoholes.
- **Reducción en la vida de fatiga:** El agua disuelta entra en micro-grietas donde se presenta contacto rodante, disociando el agua en gas hidrógeno, el cuál debilita el acero del rodamiento en un proceso conocido como “fragilización por hidrógeno”.
- **Crecimiento microbial:** Sus consecuencias negativas incluyen: olor rancio y nauseabundo, problemas de salud humana, lodos de biomasa, espuma y aceite ácido.
- **Gel:** Algunos aditivos interactúan con agua para formar gel. Estos geles afectan los pasajes del aceite, reducen la disipación de calor y taponan los filtros.

Por lo tanto, el agua contenida en estos fluidos debe ser medida para que el mantenedor del equipo sepa cuando la cantidad de agua está aproximándose del punto en el cual el agua libre aparecerá (punto de saturación).

Es común reportar o especificar la cantidad de agua en fluidos minerales o sintéticos a través del contenido absoluto de agua, el cual incluye el agua libre y el agua disuelta. Este valor es normalmente expresado en porcentaje o en partes por millón (ppm). El ppm describe la relación entre el agua y el aceite en función del volumen (ppmv) o de la masa (ppmw) de los mismos:

Por volumen: $1 \text{ ppmv} = 1 \text{ litro de agua} / 1000000 \text{ litros de aceite}$

Por masa: $1 \text{ ppmw} = 1 \text{ kilogramo de agua} / 1000000 \text{ kilogramos de aceite}$

La mayoría de los sistemas con fluidos tolera un cierto grado de contaminación por agua, que varía dependiendo del tipo de fluido, por encima del cual los efectos del agua se vuelven altamente perjudiciales. La diferencia entre lo que es aceptable para un fluido y no para otro está directamente relacionada al punto de saturación por agua de cada fluido. Infelizmente, la información relativa al punto de saturación es raramente disponibilizada por el fabricante del fluido, y aun cuando lo es, la cantidad de agua medida en ppm debe ser relacionada al punto de saturación para evaluar la severidad del problema. Además, el punto de saturación puede variar debido a varios factores como; temperatura, degradación o pérdida de aditivos, envejecimiento del fluido (oxidación, polimerización, despolimerización) y contaminación accidental por otros fluidos. Esto vuelve a la comparación de un nivel de agua medido en ppmw con el punto de saturación de un fluido nuevo una técnica de uso limitado. De esta forma un método más adecuado para medir la cantidad de agua es la medición del porcentaje del punto de saturación [2] o también denominado actividad de agua [3].

Actividad de Agua

El concepto de actividad de agua (a_w) está relacionado a la cantidad de agua no ligada y que se encuentra disuelta en el fluido, o sea, la porción de agua que no reacciona con las moléculas del fluido y que tiende a evaporarse y condensarse en un proceso cíclico hasta alcanzar un punto de equilibrio. En el caso de aceites de cojinetes, esa dinámica es influenciada por la temperatura, tipo de aceite y material con que el aceite está en contacto.

IX SEMINARIO DEL SECTOR ELÉCTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
13, 14 y 15 de Octubre de 2010

El valor de a_w es definido por la relación entre la presión de vapor de agua en la sustancia y la presión de vapor de agua pura en la misma temperatura. Así, se trata de un número adimensional que varía de 0 a 1, siendo que el valor 0 indica ausencia total de agua y 1 significa la existencia de agua libre, o sea, saturación del aceite por agua.

Dependiendo de las características del aceite (temperatura, grado de envejecimiento, aditivos presentes) la cantidad de agua que puede ser disuelta en el aceite es alterada. Un aumento de temperatura resulta en un mayor punto de saturación. De esta manera, el valor de a_w tiende a bajar con el aumento de la temperatura.

La ventaja del uso del porcentaje de saturación o a_w con relación a la medición absoluta (ppmw) es que al contrario de la medición en ppmw, la a_w es relacionada al punto de saturación. Cualquier variación en el punto de saturación (por temperatura, tipo de aceite y/o su grado de oxidación) será reflejada por una variación en la a_w . El punto real de saturación no necesita ser conocido, al contrario de mediciones en ppmw.

La Figura 2 muestra datos típicos para varios tipos de fluidos encontrados en equipos. Se observa que el punto de saturación varía con el tipo de fluido y con la temperatura para el mismo fluido. Es importante destacar que las curvas son genéricas y sirven apenas como ejemplo. [2]

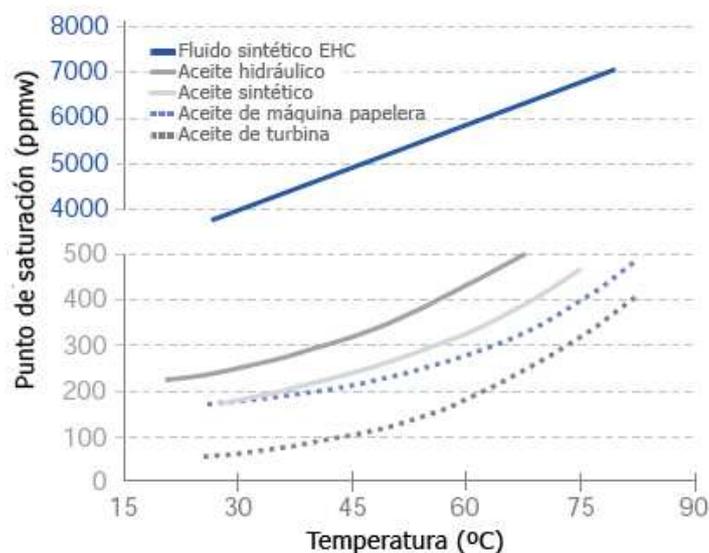


Figura 2 - Punto de saturación en función de la temperatura para varios tipos de fluidos

Actualmente, para la medición *on-line* de la actividad de agua (a_w) en aceites se utilizan sensores del tipo capacitivo que operan por el principio de absorción. El sensor consiste en un capacitor cuyo dieléctrico absorbe y rechaza moléculas de agua, cambiando la constante dieléctrica y consecuentemente la capacitancia del sensor. La absorción de agua es proporcional a la actividad de agua en el fluido. Los beneficios de la utilización de esta tecnología son el monitoreo continuo de la actividad de agua en los fluidos (en tiempo real), respuesta rápida, alta durabilidad química de los sensores y aplicabilidad para una gran gama de tipos de fluidos [3].

2 ENSAYOS Y ESTUDIOS

2.1 Desarrollo de Ensayos en Laboratorio

2.1.1 Determinación de Coeficientes Específicos del Aceite

Previo desarrollo de los ensayos, fue necesario determinar los coeficientes específicos del aceite utilizado en el ensayo propuesto para cálculo de curvas teóricas para posterior comparación con curvas obtenidas en mediciones. El aceite utilizado en los cojinetes guía de las turbinas de las unidades generadoras de la Itaipu Binacional es el MARBRAX TR50. Cada cojinete guía de la turbina contiene aproximadamente 2800 litros de este aceite.

La conversión entre valores de actividad de agua (a_w) y valores en partes por millón (ppm) sigue la siguiente relación [5]:

$$\text{ppm} = a_w 10^{(B+A/T)} \quad (1)$$

Donde la temperatura es dada en Kelvin y A y B son coeficientes específicos para cada tipo de aceite. La determinación de estos coeficientes puede ser realizada a partir del siguiente procedimiento [4] [5]:

- Definir el contenido de agua en una muestra de aceite utilizando análisis químico;
- Realizar la medición de la actividad de agua de esta muestra en dos temperaturas T_1 y T_2 con diferencia de 20 K;
- Calcular los valores de los parámetros A y B de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

$$A = \frac{\log(\text{ppm}_{\text{sat}}[T_2]) - \log(\text{ppm}_{\text{sat}}[T_1])}{1/T_2 - 1/T_1} \quad (2)$$

$$B = \log(\text{ppm}_{\text{sat}}[T_1]) - A/T_1 \quad (3)$$

Donde ppm_{sat} es el valor inicial de ppm de agua en el aceite dividido por la a_w medida por el sensor en análisis para cada temperatura.

El análisis químico de la muestra de aceite utilizado identificó una cantidad de 30 ppm de agua en el aceite. Las medidas en las dos temperaturas necesarias para el cálculo de los coeficientes A y B son presentadas en la Tabla I:

Tabla I – Medidas para la determinación de los coeficientes A y B

T (°C)	a_w	ppm_{sat}
27,1	0,575	$30/0,575 = 52,17$
50,0	0,316	$30/0,316 = 94,94$

Utilizándose las ecuaciones presentadas anteriormente (2) y (3), se determina el valor de los coeficientes específicos para el aceite en uso:

$$A = -1.100,46; \quad B = 5,38$$

2.1.2 Determinación de comportamiento del sensor de aw

Con el objetivo de conocer mejor el funcionamiento del sensor de medición de actividad de agua y simular las condiciones de operación del cojinete guía de la turbina, para evaluación de desempeño, fue montada una bancada para ensayo en el laboratorio de Itaipu. El sistema propuesto para el ensayo se ilustra en la Figura 3.

Se utilizó básicamente un tanque principal para acomodar el dispositivo sensor y el aceite, un tanque auxiliar para calentar el aceite a una temperatura de trabajo igual al cojinete de la unidad (50°C), agitador y una motobomba para forzar la circulación entre ambos recipientes simulando el movimiento de aceite en el cojinete de la turbina.

Fueron utilizados para el ensayo aproximadamente 50 litros de aceite lubricante nuevo igual al utilizado en los cojinetes de las unidades generadoras de Itaipu (MARBRAX TR50). Comparaciones fueron realizadas a partir de resultados de muestras del mismo aceite analizadas por proceso químico (determinación de ppm de agua en el aceite)

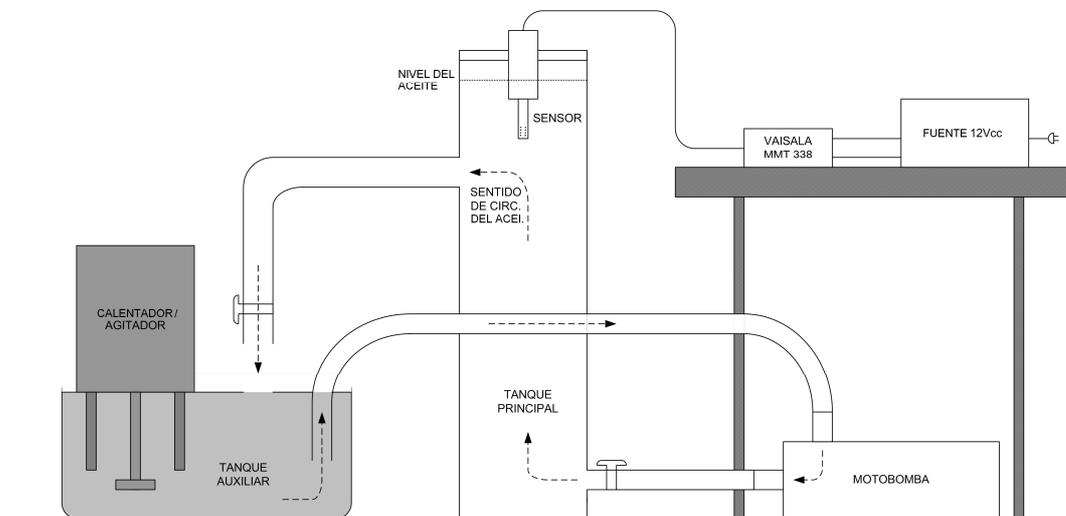


Figura 3 - Diagrama esquemático del ensayo

Con el objetivo de entender el comportamiento del sistema y levantar curvas para análisis, inicialmente se procedió al calentamiento del aceite nuevo a 50 °C, simulando de esta manera las condiciones de operación del cojinete. Posteriormente, se inició un proceso gradual de contaminación con agua. A cada adición de agua se aguardó entre 15 y 20 minutos para realizar la lectura en los instrumentos, obtener la muestra para el análisis químico y hacer una nueva adición de agua.

IX SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
13, 14 y 15 de Octubre de 2010

La tabla II muestra la medición de a_w indicada en el instrumento de medición, el ppm calculado conforme procedimiento descrito en el ítem 2.1.1 y el ppm real obtenido por análisis químico (método Karl Fischer) para cada cantidad de agua adicionada.

Tabla II – Resultados del Ensayo

Agua Adicionada	% volumen	a_w	ppm(cálculo)	ppm(química)
-	0,008	0,316	30,0	30,0
+2 ml	0,012	0,524	50,23	67,0
+2 ml	0,016	0,622	59,63	80,0
+4 ml	0,024	0,832	79,76	105,0
+3 ml	0,030	0,888	85,12	115,0
+3 ml	0,036	0,926	88,77	130,0

La Figura 4 presenta gráficamente los resultados mostrados en la Tabla II. Se observa que los valores de ppm de agua en el aceite obtenidos por el análisis químico y por el cálculo utilizando la Ecuación 1 presentan diferencias. Posibles causas para estas diferencias son:

- Cálculo aproximado de los coeficientes A y B (método propuesto por el fabricante del sensor);
- La presencia de aditivos (antioxidantes y antiespumantes) en el aceite pueden interferir en el proceso de análisis químico de la muestra.

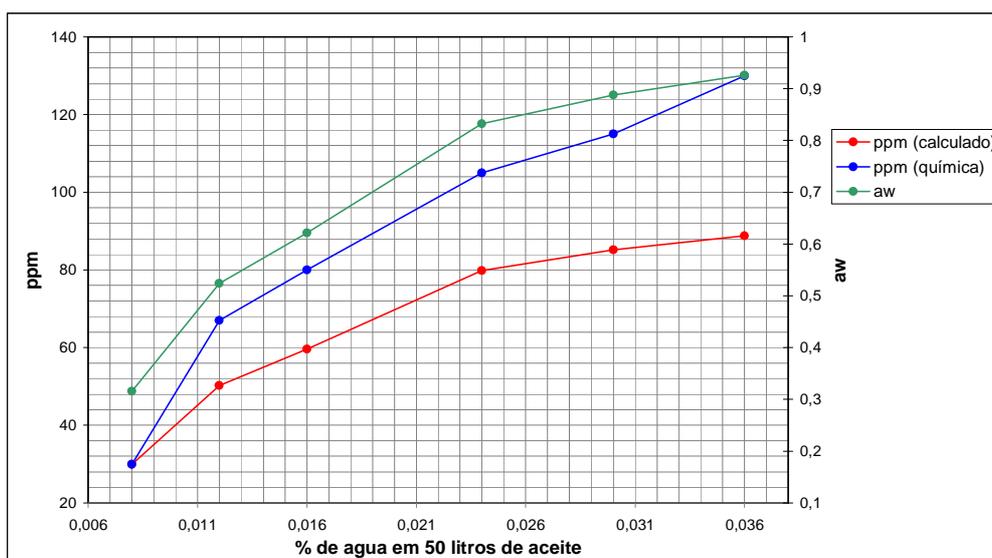


Figura 4 - Variación de ppm y a_w en función de la adición gradual de agua en el aceite

2.1.3 Ensayo de Saturación del Aceite

Otro ensayo realizado en laboratorio fue la verificación del tiempo de respuesta del sensor de a_w cuando sometido a un derramamiento real, simulando una pérdida de agua en el intercambiador de calor. Antes del ensayo, el sensor indicaba un valor de $0,5 a_w$ a $50\text{ }^\circ\text{C}$, o sea, aproximadamente 50 ppm de agua en el aceite. La simulación de pérdida de un intercambiador fue realizada a través de la adición de 180 ml de agua (0,36% de los 50 litros de aceite). Después de aproximadamente 5 minutos el sensor indicó un valor de $0,92 a_w$, indicando saturación del aceite. La Figura 5 ilustra una fotografía del gráfico de tendencia registrando la elevación de la actividad de agua en el aceite.

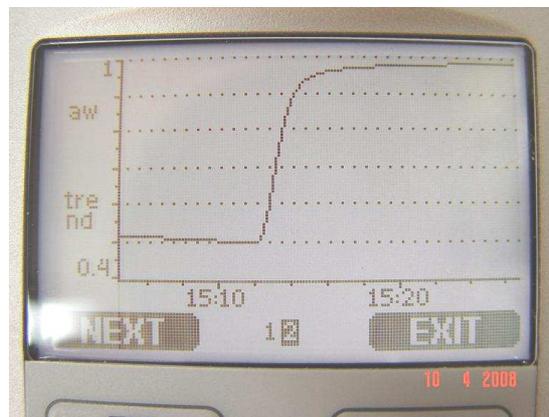


Figura 5 - Gráfico de tendencia

2.2 Ensayos y estudios en una Unidad Generadora

Fue instalado de forma experimental, en el Cojinete Guía de la Turbina de la Unidad Generadora 01 de la Itaipu Binacional, un sensor de actividad de agua (a_w) con la finalidad de evaluar el comportamiento del dispositivo en condiciones reales de operación. El sensor fue instalado aprovechando una parada para mantenimiento de la unidad. Básicamente tres condiciones fueron estudiadas y evaluadas:

- La ausencia de señalización indebida de presencia de agua en el cojinete;
- La rápida indicación de saturación del aceite en el caso de pérdida de agua en los intercambiadores de calor;
- La viabilidad de instalación de este tipo de sensor para condiciones en que la unidad para por conveniencia operativa y la temperatura del aceite baja hasta estabilizarse con la temperatura ambiente, habiendo posibilidad de saturación del aceite para temperaturas bajas.

La primera condición (señalización indebida de presencia de agua) no ocurrió hasta ahora, con casi dos años de instalación del sensor.

El funcionamiento adecuado del sensor en caso de pérdida de agua en los intercambiadores de calor fue verificado añadiendo agua directamente al aceite del

IX SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
13, 14 y 15 de Octubre de 2010

cojinete con la máquina en operación. La Figura 6 ilustra el resultado de este ensayo. Al inicio del ensayo ($t=0$), fue derramado 1 litro de agua a través de una escotilla de inspección del cojinete. Cerca de 2 minutos después, se observó el inicio de aumento de la actividad de agua (a_w). La indicación del sensor llegó a 0,9 a los 16 minutos del inicio del ensayo. A partir de este valor, el aceite ya puede ser considerado saturado con agua.

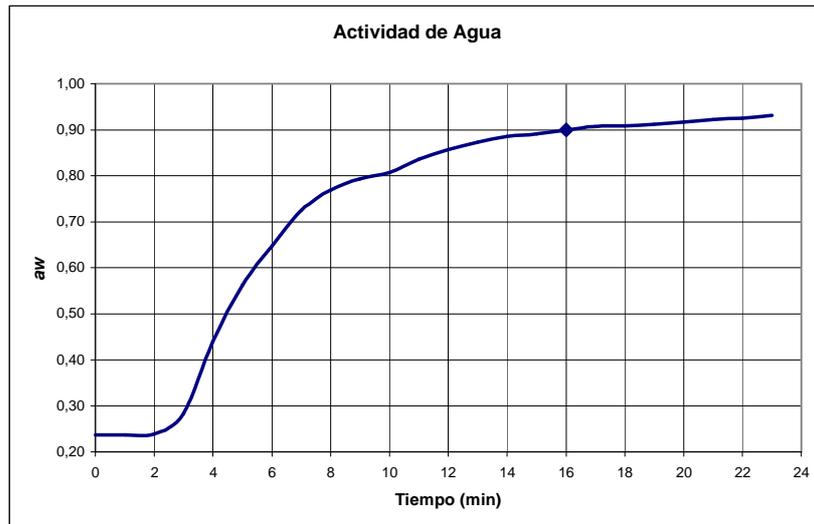


Figura 6 - Respuesta de la medición de a_w para un derramamiento de agua en el cojinete

El tiempo de 15 minutos para detección de saturación del aceite por pérdida de agua en los intercambiadores de calor es considerado muy bajo. Para justificar esta consideración, puede ser analizada la Figura 7. El gráfico muestra un caso real de perforación de un intercambiador de calor en la unidad generadora U04, ocurrido en el año 2003. La parada de la unidad por nivel alto de aceite solo ocurrió más de 6 horas después del inicio de la contaminación del aceite.

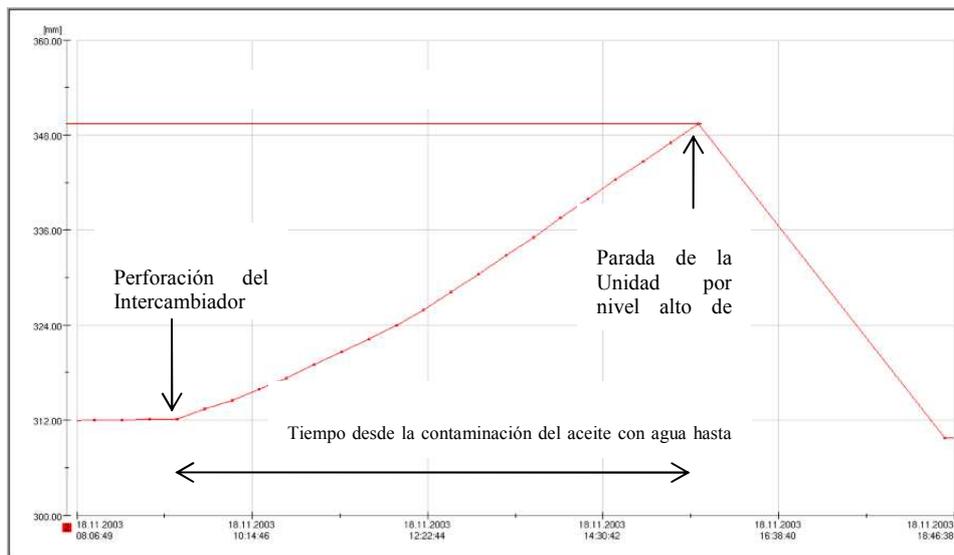


Figura 7 - Tiempo de actuación de la protección por nivel alto de aceite

IX SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
13, 14 y 15 de Octubre de 2010

El comportamiento del sensor también fue verificado en caso de parada de la unidad por conveniencia operativa. Durante una parada por conveniencia, el sistema de refrigeración de los cojinetes sigue operando, haciendo con que la temperatura del aceite baje hasta llegar al equilibrio con la temperatura ambiente. La Figura 8 ilustra la actividad de agua en función de la temperatura para el aceite MARBRAX TR50. En este caso, la unidad generadora quedó parada 4 días. Durante este intervalo, la temperatura del aceite bajó de 48,4 °C a 30,2 °C. Como una menor temperatura resulta en un punto de saturación más bajo, la disminución de temperatura fue acompañada de un aumento de la actividad del agua. Sin embargo, aun después de 4 días, la actividad de agua alcanzó 0,46, un valor muy inferior a la saturación del aceite (0,9).

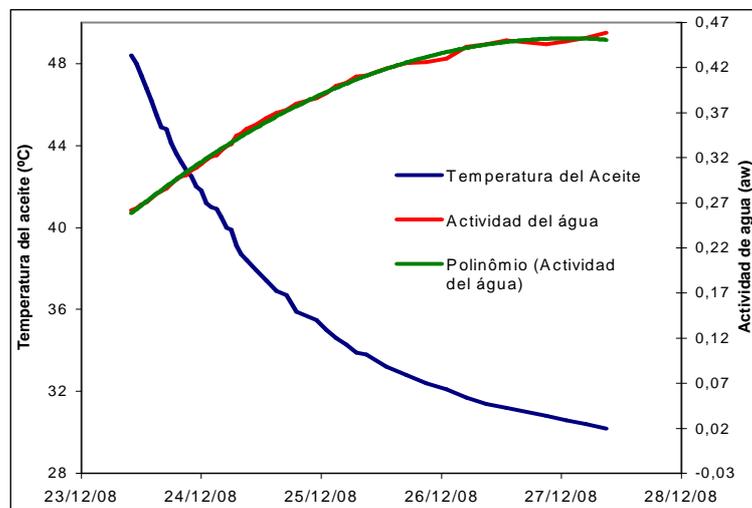


Figura 8 - Actividad de agua en función de la temperatura durante una parada por conveniencia operativa

2.3 Actuación Correcta del Sistema de Detección de Agua en el Aceite

El 13/10/2009 a las 21:21 se registró la señalización de la alarma "Agua en el Aceite del Cojinete Guía de la Turbina (CGT) de la Unidad 01", indicando una posible pérdida de agua en uno de los 4 intercambiadores de calor que se encuentran en el interior de los CGT de las unidades generadoras. Técnicos de mantenimiento se acercaron al local para verificar el origen de la alarma y constataron que efectivamente había una pérdida de agua en el intercambiador de calor número 3, la cual fue eliminada obstruyendo un tubo interno del intercambiador utilizando tapones cónicos, evitando de esta manera la parada no programada de la unidad generadora. Este procedimiento no inhabilitó completamente el intercambiador, disminuyendo apenas la eficiencia del mismo. Es importante mencionar que los CGT pueden operar dentro de límites aceptados con 3 intercambiadores de calor, siendo posible aislar completamente un intercambiador en caso de necesidad sin comprometer el desempeño del sistema.

IX SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
13, 14 y 15 de Octubre de 2010

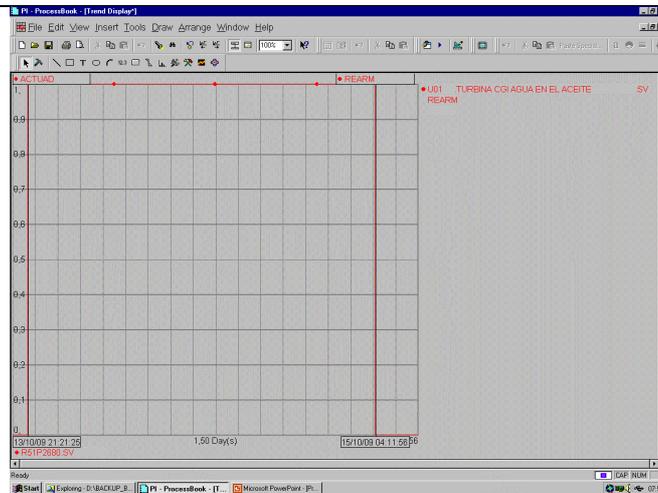


Figura 9 – Señalización en el Sistema SCADA de la actuación del sensor de Agua en el Aceite

Después de aproximadamente 1,5 días, como indicado en la figura 9, el agua que se derramó en el CGT se evaporó y el aceite dejó de estar saturado, normalizándose la lectura del indicador y consecuentemente la señalización de la alarma de agua en el aceite. Existe la posibilidad de tratamiento del aceite posterior a una saturación por agua dependiendo de la cantidad del contaminante derramado, debiendo ser evaluado por los órganos de ingeniería.

3 CONCLUSIONES

Este trabajo presentó un estudio para la implementación experimental de un sensor para la detección de agua en el aceite en los cojinetes de unidades generadoras de la Itaipu Binacional. Inicialmente, el sensor fue ensayado en laboratorio simulando las condiciones de operación del sistema. Enseguida, el dispositivo fue instalado en el Cojinete Guía de la Turbina (CGT) de la Unidad Generadora 01, aprovechando una parada programada para mantenimiento. El comportamiento del sensor fue verificado simulando la perforación de un intercambiador de calor y en condiciones de parada de la unidad por conveniencia operativa.

Tanto en el laboratorio como en el cojinete, todos los ensayos realizados con el sensor de actividad de agua presentaron resultados satisfactorios. Ninguna actuación indebida del sensor fue observada hasta la fecha. Además el dispositivo instalado evitó una parada no programada de la Unidad Generadora 01 por nivel alto de aceite, como consecuencia de una pérdida de agua en un intercambiador de calor del CGT.

En este sentido, los resultados encontrados indicaron que la aplicación del sensor de a_w es apropiada para la detección de presencia de agua libre en los cojinetes de unidades. Además, el monitoreo de la tendencia del aumento de la concentración de agua en el aceite posibilita una precoz detección de niveles de agua perjudiciales en caso de pérdida en los intercambiadores de calor, pudiendo de esta manera evitar paradas no



IX SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
13, 14 y 15 de Octubre de 2010

programadas de las unidades generadoras. Por consiguiente, serán instalados estos dispositivos en todas las unidades generadoras de la Itaipu Binacional.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] NEEDELMAN, Bill, WEBB D., David. Respiradores Delicuescentes: Un nuevo Método de Controlar el Ingreso de Agua, Machinery Lubrication, 2007.

[2] OLIVEIRA, Otavio dos Santos. Medindo o Teor de Água Através do Percentual de Saturação, Engefiltro Pall.

[3] JIROUTEK, Steve. Understanding Water Activity (a_w), Vaisala Inc, Disponible en: <http://www.vaisala.com/files/Understanding%20Water%20Activity.pdf> , accedido en 10-06-2009.

[4] TREVISAN, Felipe, et al. Detecção de Presença de Água no Óleo Lubrificante pela Medição da Atividade da Água, Relatório Técnico, IB N° 6210-50-19907-P-R0, 2008.

[5] VAISALA, Vaisala HUMICAP Moisture and Temperature Transmitter for Oil MMT330 User's Guide, 2007.