

# Informe Técnico – Pruebas comparativas entre Monitor Online de Humedad MO de Treetech y análisis de contenido de agua por Karl Fisher

Marcos E. G. Alves  
Treetech Sistemas Digitais Ltda.

## 1. Introducción

Este informe presenta los datos obtenidos con la aplicación de dos Monitores de Humedad MO en una máquina de secado de aceite en la subestación Tatuí de Elektro. Presenta también la comparación entre las mediciones online de esos equipos y los análisis de contenido de agua a través del método de Karl Fisher. Para ello, el equipo de laboratorio fue llevado a la referida subestación el día 05/04/2007, permitiendo la comparación directa entre los resultados online y los de laboratorio con reducido riesgo de contaminación de las muestras de aceite.

## 2. Configuración de la instalación

La configuración de la instalación es mostrada en la figura 1, donde se observa la máquina de secado de aceite en línea modelo Zeon acoplada a un transformador de potencia 10/12.5 MVA 138/13.8 kV llenado con aceite aislante mineral.

El aceite sale del transformador por su válvula de drenado inferior, que está conectada a la entrada de la máquina a través de tubos flexibles con paredes dobles. Luego de entrar en la máquina, el aceite pasa por el sensor del monitor de humedad online modelo MO de Treetech, pasando enseguida por una bomba de circulación de aceite y por los elementos absorbentes, que retienen el agua dejando pasar el aceite. El flujo prosigue entonces para la salida de la máquina, donde pasa por el segundo monitor de humedad MO y retorna al transformador a través de una válvula en la parte inferior del tanque conservador.



**Figura 1 – Configuración de la instalación; a) Máquina de secado Zeon; b) Sensor MO en la entrada de la máquina; c) Sensor MO en la salida; d) Módulos de interfaz; e) Medidor de contenido de agua Metrohm.**

A su vez, los Monitores de Humedad MO 1 y 2 están conectados a un modem GPRS a través de sus puertas de comunicación serial RS-485, permitiendo así la lectura remota online del contenido de agua en el aceite que entra y que sale de la máquina de secado. El acceso remoto permite también el download de datos en la memoria de masa de los monitores de humedad, tornando posible el seguimiento de la evolución del proceso de secado del aceite y el monitoreo del estado de los elementos absorbedores, que deben ser substituidos cuando se saturan en agua.

### **3. Ensayos realizados**

La configuración descrita arriba, con un sensor de humedad recibiendo aceite más húmedo en la entrada de la máquina de secado y un sensor en la salida recibiendo aceite más seco, permite que se efectúe la comparación de las mediciones online con los resultados de laboratorio en por lo menos dos diferentes situaciones de contenido de agua en el aceite. Para eso, fue instalado en una oficina de la subestación un medidor de contenido de agua marca Metrohm, del laboratorio MGM Diagnósticos Ltda. De esa forma, las diversas muestras retiradas en el flujo de aceite en la entrada y en la salida de la máquina de secado eran inmediatamente analizadas en el equipo Metrohm, permitiendo determinar sus contenidos de agua con bajo riesgo de contaminación de las muestras con humedad debido al tiempo transcurrido en el transporte.

La secuencia de las pruebas realizadas es presentada en las tablas 1 y 2 para los monitores de humedad 1 y 2, respectivamente. Al final de esos ensayos fueron retiradas dos muestras de aceite adicionales, ambas en la salida de la máquina de secado, donde se encuentran los menores contenidos de agua. Una de esas muestras fue ensayada en el laboratorio 3 horas más tarde en el mismo día. La otra muestra fue ensayada 4 días después, el día 09/4. Los contenidos de agua obtenidos fueron 2,5ppm para la muestra ensayada en el mismo día y 2,7ppm y 2,8ppm 4 días más tarde.

#### **Tabla 1 – Monitor de humedad MO 1**

Hora	Lab (ppm)	MO (ppm)	Temp del aceite (°C)	MO (RS%)	Muestra	Observaciones
10:15	2.1	0.4	26.8	0.5	1	Muestra retirada en la salida de la máquina, en su interior
10:19	2.3	0.4	26.8	0.5	1	
10:37	Sensor desplazado 10 mm, alejado del flujo de aceite					
10:52		0.6	31.4	0.7		
10:52	Sensor desplazado 20 mm, alejado del flujo de aceite					
11:02		0.5	31.6	0.3		
11:03	Sensor retornado a la posición original					
11:05	1.9	0.3	32.4	0.3	3	Muestra de la salida de la Máquina en el tanque en expansión
11:07	1.9	0.3	32.4	0.3	3	
11:27	Bomba de aceite desconectada					
11:27		0.2	32	0.2		
11:34		0.3	31.8	0.3		
11:46		0.6	31	0.7		
11:47	Bomba de aceite reconectada					
11:47		0.6	31.2	0.7		
11:50		0.3	32	0.3		
13:40		0.3	39.1	0.3		
13:53	Sensor movido hacia la entrada de la máquina de secado					
13:55		8	38.7	7		
13:57		8	38.6	6.8		
14:00		7.8	38.4	7		

**Tabla 2 – Monitor de humedad MO 2**

Hora	Lab (ppm)	MO (ppm)	Temp del aceite (°C)	MO (RS%)	Muestra	Observaciones
10:30	8.8	6.4	33.7	6.7	2	Muestra de la entrada de la máquina, en la salida del transformador
10:32	8.8	6.4	33.7	6.7	2	
11:20	7.3	6.5			4	Muestra de la entrada de la máquina, en la salida del transformador
11:22	8.3	6.5			2	
11:25	8.7	6.5			4	
11:27	Bomba de aceite desconectada					
11:27		6.5				
11:34		7.5	32.4			
11:46		7.6	31			
11:47	Bomba de aceite reconectada					
11:47		7	33.3			
11:50		6.9				
13:40		7	38.7	6.1		
13:53	Sensor movido hacia la salida de la máquina de secado					
13:55		2.7	38.1	1.9		
13:57		1	37.9	0.8		
14:00		0.4	37.5	0.3		

#### 4. Análisis de los resultados

##### 4.1. Repetibilidad y estabilidad de las mediciones

El gráfico de la figura 2 permite la comparación visual entre las mediciones online a lo largo de los ensayos y los resultados obtenidos por el método de Karl Fischer. En ese gráfico se observa una buena correlación entre ambos métodos.

También la repetibilidad de las mediciones es comprobada a través de la inversión de los sensores, cuando el sensor originalmente localizado en la entrada de la máquina (aceite más húmedo) fue cambiado hacia la salida (aceite más seco) y viceversa.

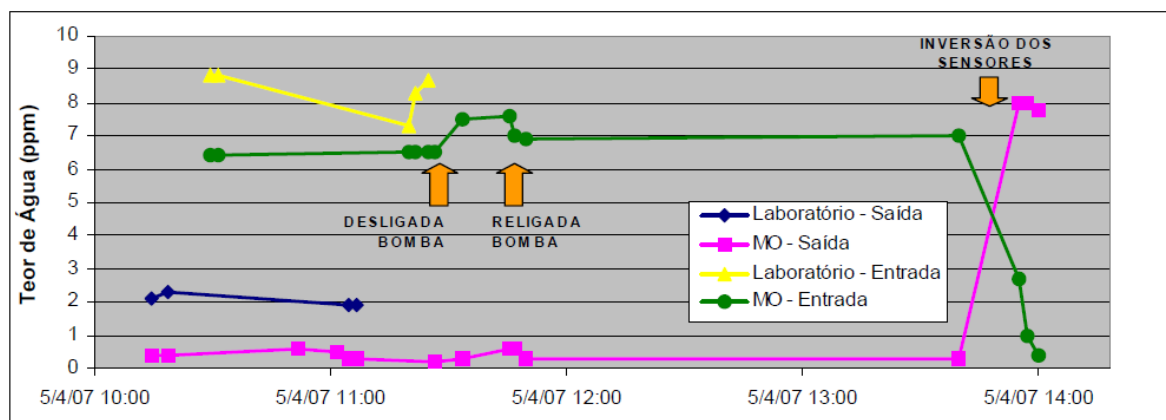


Figura 2 – Mediciones de contenido de agua online y de laboratorio.

A partir del gráfico de la figura 2 se puede concluir que la medición online presentó gran estabilidad, ya que no fue influenciada por factores relacionados con la retirada, el manejo y procesamiento de muestras, como ocurre con las mediciones en laboratorio. Ese hecho puede ser constatado observándose que, mientras las mediciones online en la entrada de la máquina permanecieron estables en torno de 6,5ppm desde las 10:30 a las 11:30h, las mediciones de laboratorio presentaron variación de hasta 1,5ppm, iniciando con 8,8, reduciéndose a 7,3 y retornando a 8,7ppm.

#### **4.2. Tiempo de respuesta del sensor de humedad online**

La inversión de los sensores efectuada durante las pruebas permitió cuantificar el tiempo de respuesta de los sensores online a un cambio de grado en el contenido de agua. Tomando las mediciones del sensor que fue movido de la entrada (mayor contenido de agua) para la salida de la máquina (menor contenido de agua), se observa que la medición pasó de su valor inicial de 7ppm a las 13:53h hasta el valor final de 0,4ppm a las 14:00h.

Con ello, el sensor respondió completamente al grado de cambio del contenido de agua en aproximadamente 7 minutos, inferior, por lo tanto, a su tiempo de respuesta nominal de 15 minutos.

#### **4.3. Influencia del tiempo transcurrido luego del muestreo en las mediciones de laboratorio**

Las mediciones de contenido de agua en las muestras transportadas para análisis posterior en el laboratorio no demostraron variación significativa en relación con las mediciones realizadas con el mismo equipo en la subestación, tanto para el análisis realizado en el mismo día como luego de 4 días.

Ese resultado confirma que, una vez que el proceso de muestreo es realizado correctamente y con equipo adecuado, las muestras pueden ser transportadas y almacenadas durante algunos días sin alteraciones en los resultados.

#### **4.4. Influencia del flujo de aceite en las mediciones online**

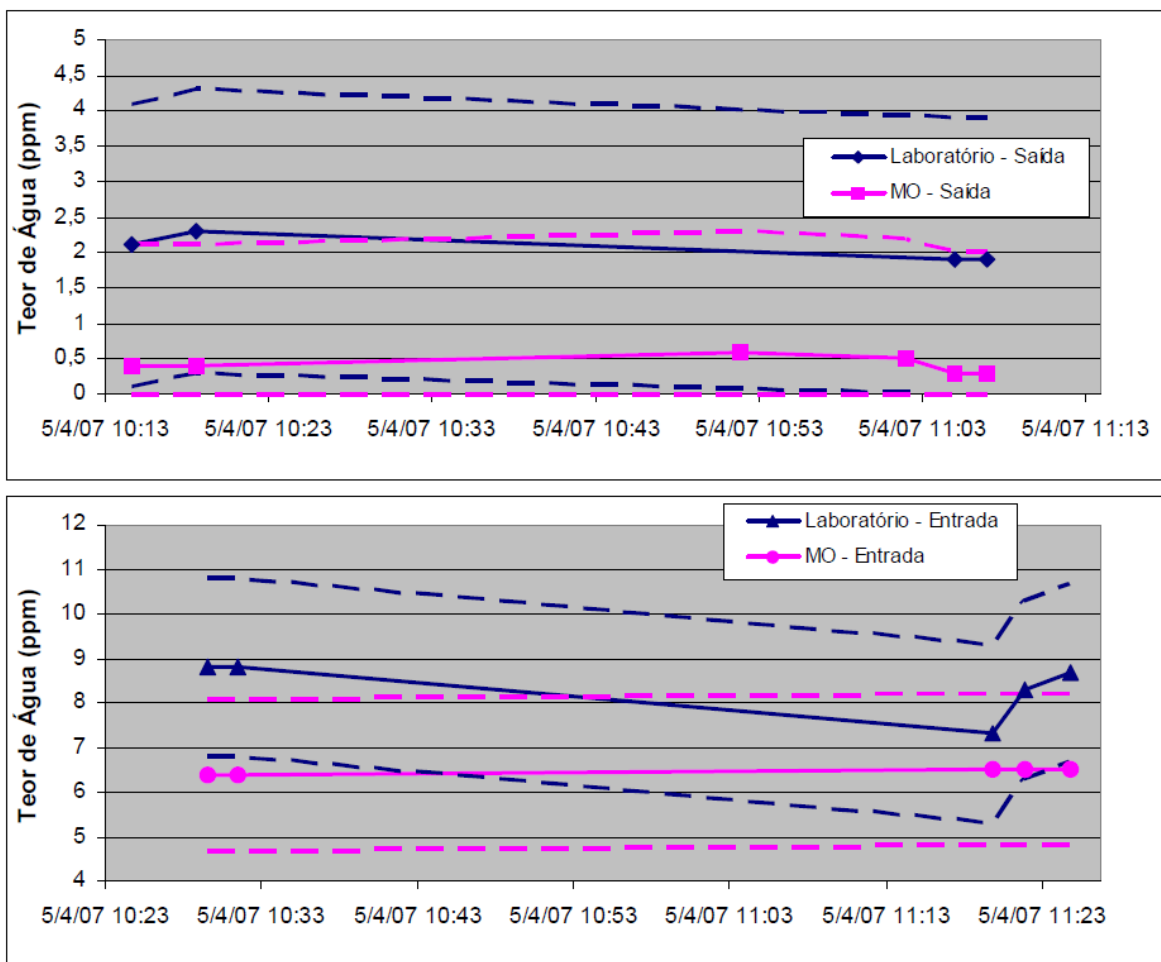
La influencia de la velocidad del flujo de aceite en las mediciones online fue verificada desconectando y reconectando la bomba de aceite. El resultado puede ser observado en el gráfico de la figura 2, donde se verifica una elevación de 1ppm en la medición online de la entrada de la máquina cuando la bomba es desconectada, y una reducción de 0,5ppm al ser restablecido el flujo de aceite. La pequeña magnitud de las alteraciones contactadas indica que el efecto del flujo de aceite en las mediciones puede ser desconsiderado, aún cuando sea posible eliminarlo completamente por la inclusión de una protección en el conjunto sensor.

En la salida de la máquina, con contenido de agua reducido, la influencia del flujo en la medición fue aún menor, del orden de 0,3ppm.

#### **4.5. Comparación entre mediciones online y lecturas de laboratorio**

Las comparaciones entre las mediciones online y las de laboratorio, considerando los límites de error de cada proceso – +/- 1,7ppm a 30°C para la medición online y +/- 2ppm para la medición de laboratorio – son mostradas en los gráficos de la figura 3 para la entrada y salida de la máquina de secado. Las líneas intermitentes arriba y abajo de cada medición indican, respectivamente, los valores de tolerancia superior e inferior de la medición, obtenidos sumando y substrayendo la medición o su límite de error.

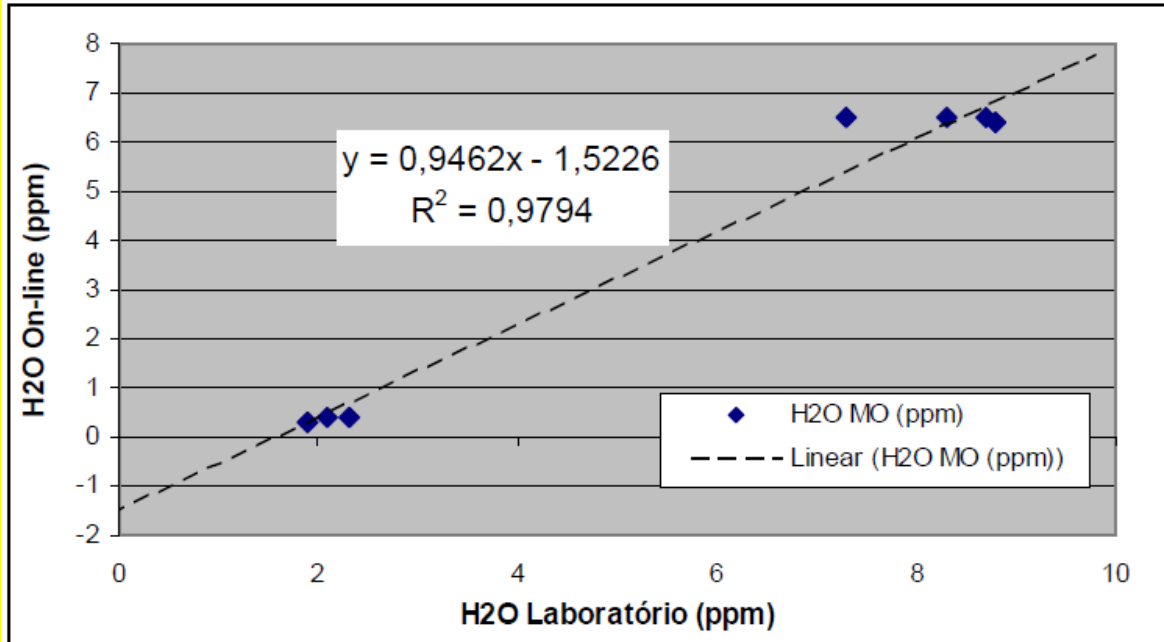
En esos gráficos se observa visualmente la existencia de una gran área de intersección entre las mediciones online y las de laboratorio. Tanto en la salida como en la entrada de la máquina de secado, el límite de tolerancia superior de la medición online llega a alcanzar la medición de laboratorio, y el límite de tolerancia inferior y la medición de laboratorio llegan a alcanzar la medición online. Queda comprobado, por lo tanto, que las diferencias verificadas entre las mediciones online y de laboratorio no superan los límites de error de ambos métodos.



**Figura 3 – Tolerancias superior e inferior de las mediciones de contenido de agua online y de laboratorio**

#### 4.6. Correlación entre mediciones online y de laboratorio

La correlación entre los dos métodos de medición puede ser más fácilmente visualizada a partir del gráfico de la figura 4, en el cual son mostradas las mediciones online (eje vertical) en función de las mediciones en laboratorio (eje horizontal).



**Figura 4 – Mediciones de contenido de agua online en función de las mediciones de laboratorio.**

Fue determinada, a través de los mínimos cuadrados, la ecuación que mejor relaciona los datos de mediciones de los dos métodos, considerándose una relación de 1<sup>er</sup> grado:

$$(\text{H2O Online}) = 0,9462 * (\text{H2O Laboratorio}) - 1,5226$$

A partir de esa ecuación, mostrada en línea intermitente en el gráfico de la figura 4, se constata, asumiendo que las mediciones de laboratorio corresponden a la realidad del contenido de agua presente en el aceite, que:

- 1) La medición online responde a las variaciones del contenido de agua en el aceite de forma prácticamente ideal, como demuestra el factor de proporcionalidad muy cercano a uno (0,9462);
- 2) La medición online presentó un desplazamiento (offset) de aproximadamente 1,5ppm en relación con el contenido de agua de la muestra, como muestra la constante independiente de la ecuación (-1,5226).

A partir de esas dos constantes, se constata que la diferencia anteriormente observada entre las mediciones online y de laboratorio, aún dentro de los rangos de tolerancia de ambos métodos, es causada principalmente por un error de desplazamiento (offset), del orden de 1,5ppm.

Aunque la diferencia entre las mediciones de laboratorio y online se encuentra dentro de los límites de error de los dos métodos, y la respuesta a las variaciones en el contenido de agua en el aceite no sea afectada por ese desplazamiento, el mismo puede ser compensado, si deseado, con pequeñas alteraciones en el ajuste de offset del monitor de humedad online.

Para probar ese tipo de ajuste, el mismo fue efectuado tras la finalización de las pruebas, alterándose el parámetro offset del sensor de la entrada de la máquina de 0,785 a 0,738 y el de la salida de 0,797 a 0,750. Con ello, las mediciones online se alteraron para 9,6ppm y 1,5ppm, respectivamente, más próximas a los valores obtenidos con el equipo de laboratorio.

## 5. Conclusiones

Los resultados de los ensayos descritos permiten arribar a las siguientes conclusiones:

- El monitor de humedad online MO es capaz de indicar de forma eficaz la ocurrencia de alteraciones en la humedad del aceite, ya que responde a las variaciones del contenido de agua en el aceite de forma prácticamente ideal, o sea, con factor de proporcionalidad muy cercano a 1 (uno).
- La buena respuesta a variaciones en el contenido de agua del aceite fue comprobada también a partir de pruebas con el cambio del sensor de la entrada de la máquina para la salida y viceversa, provocando así cambios de grado en los contenidos de agua en el aceite.
- La prueba de cambio de posición de los sensores demostró también la repetibilidad de las mediciones online, que no sufrieron alteraciones significativas aún después del cambio de los sensores.
- A través de la prueba de cambio de posición de los sensores fue verificado también el tiempo de respuesta a variaciones en el contenido de agua, que fue del orden de 7 minutos.
- La comparación entre las mediciones online y de laboratorio demostró que las diferencias observadas no superan los límites de error de ambos métodos.
- A través de correlación entre las mediciones online y de laboratorio se constató que la diferencia entre ambas es causada principalmente por un error de desplazamiento (offset), del orden de 1,5ppm.
- Aunque la diferencia entre las mediciones de laboratorio y online se encuentra dentro de los límites de error de los dos métodos, y la respuesta a las variaciones en el contenido de agua en el aceite no sea afectada por ese desplazamiento, el mismo puede ser compensado con pequeñas alteraciones en el ajuste de offset del monitor de humedad online.

### **Agradecimientos**

La realización de las pruebas y la elaboración de este informe solamente fueron posibles con la colaboración de diversas personas y empresas. Nuestros agradecimientos a:

- Elektro Serviços de Eletricidade S.A. – Ings. José Daniel Eurico, Adriano Cabrino y equipo regional de Tatuí, por el soporte para la realización de las pruebas durante el proceso de secado de uno de los transformadores de la SE Tatuí.
- MGM Diagnósticos SA – Ing. Cláudio Galdeano, por el soporte y la consultoría técnica en todo el proceso y por la cesión del equipo de medición de contenido de agua en el aceite y del técnico para la realización de los análisis en campo.
- Ing. Henrique Hossri – por el soporte y la consultoría técnica en todo el proceso y auxilio en la retirada de muestras de aceite y manipulación de los sensores.