

Aplicación de un sistema embebido para alinear diafragmas de turbinas de vapor de alta potencia

Suárez-Lizárraga G^{1.}, Quiñonez-Osuna J.^{1.}, Huerta-Mora E.^{1.}, Balverde-Quintero J.^{1.}, Hernández-López C.^{1.}

¹Tecnológico Nacional de México campus Instituto Tecnológico de Mazatlán.
Calle Corsario 1 No. 203, Col. Urías, Mazatlán, Sinaloa, México, gsuarez@itmazatlan.edu.mx

Abstract— En este documento se ilustra cómo se llevó a cabo la implementación de un sistema embebido como auxiliar para realizar la alineación de las ruedas de álabes fijos en las turbinas de vapor de las centrales eléctricas. La importancia de este sistema, es que permite minimizar errores cuando esta práctica de mantenimiento se realiza, puesto que las mediciones del proceso se obtienen directamente con respecto a la superficie del rotor, a diferencia de la mayoría de los métodos convencionales que consideran su eje teórico.

I. INTRODUCCIÓN

La generación de energía eléctrica, es sin duda, un importante tema en el desarrollo de cualquier nación. En la actualidad, se trabaja mucho en generar energía limpia. Sin embargo, existen aún muchas regiones en México en las que se utilizan plantas termoeléctricas, debido a que no hay inversión para construir plantas modernas. Es por esto, que se intenta que las termoeléctricas operen con la máxima eficiencia posible. Uno de los factores que más influye para lograrlo, es aplicar un mantenimiento periódico a todos los elementos involucrados en el proceso de generación de energía.

Una central termoeléctrica genera energía eléctrica empleando turbinas impulsadas por vapor, el cual se genera a su vez en grandes calderas.

Actualmente, en el proceso de generación de energía eléctrica mediante vapor, existen muchos factores que afectan su eficiencia genérica. Unos de los principales, son las fugas a través de los sellos de las turbinas, ocasionadas en buena medida por el desalineamiento de los diafragmas. Una turbina como las que se utilizan en el proceso de generación eléctrica está construida internamente como se ilustra en la Figura 1.

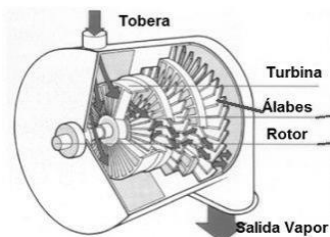


Figura 1.- Interior de una turbina [1].

En el pasado, se han diseñado esquemas que involucran el diseño mecánico para tratar de solventar el problema de las fugas de vapor. Sin embargo, se requiere de un diseño que involucre a varias disciplinas para lograr mejores resultados.

II. VINCULACIÓN EMPRESA-ACADEMIA

El primer acercamiento hacia la resolución del problema existente en CFE, fue a través de estudiantes que realizaron sus residencias profesionales en el lugar. Posteriormente, un investigador, el Dr. José Ramón Quiñonez Osuna, de la Academia de Mecánica del Instituto Tecnológico de Mazatlán, delimitó el problema que se podía atacar desde la academia.

Para recalcar la importancia de la implementación electrónica presentada en este documento, se debe retroceder a los antecedentes.

A. Fundamento teórico y antecedentes

Cuando se realiza mantenimiento a una turbina de vapor, se debe considerar la alineación interna o reubicación de ruedas de álabes fijos o diafragmas, siempre tomando en cuenta las restricciones en cuanto a dimensiones impuestas por el fabricante. Un rotor cuenta con sellos internos (montados en los diafragmas) y externos (en las cajas de los sellos en los extremos de las secciones de expansión del vapor) [1]. “La alineación en turbomaquinaria tiene un impacto severo en la seguridad y rendimiento de las plantas eléctricas. Un simple error en el proceso de alineamiento puede producir días de pérdida en la producción, peor resulta si no se detecta el error” [2].

Al realizar el mantenimiento, la turbina se debe desmontar por completo, de ahí la importancia de tomar en cuenta los detalles del fabricante respecto a la alineación para no tener errores en el funcionamiento. En la Figura 2, se muestra una turbina desmontada para su mantenimiento.



Figura 2.- Turbina abierta para mantenimiento.

Las principales causas del desalineamiento de los diafragmas corresponden a [3]:

- La dilatación de elementos a causa de la temperatura.
- El modo de deflexión del rotor entre sus chumaceras efecto de su propia masa y condiciones de operación.
- La traslación axial de elementos internos debido a la presión diferencial entre etapas consecutivas.

Debido a que las turbinas se encuentran en constante operación, requieren de un mantenimiento exhaustivo y lo más preciso posible para tratar de minimizar las pérdidas. El proceso de alineación, normalmente se lleva a cabo de modo manual, con la intervención de personal experto, pudiéndose llevar a cabo de dos modos distintos: a) considerando el eje teórico del rotor (métodos de alambre de piano, métodos ópticos y mediante láser) y b) empleando una barra con sensores de proximidad. Es el primero el que más se utiliza en la actualidad y se realiza tal como se ilustra en la Figura 3.

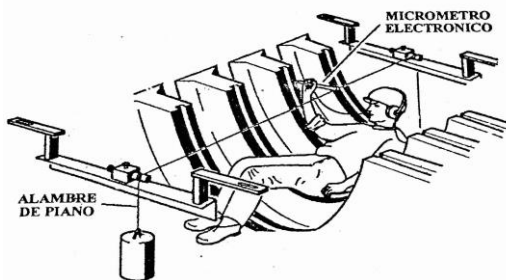


Figura 3.- Método manual de alineación de turbinas con alambre de piano [4].

Los métodos de alineamiento que involucran el uso de dispositivos optoelectrónicos tales como láseres o infrarrojos, resultan sumamente costosos e imprecisos, por considerar el eje teórico del rotor. Fue entonces cuando se pensó en diseñar un nuevo esquema que permitiera llevar a cabo el proceso de manera directa (considerando el propio rotor), sin depender en su totalidad de la apreciación del ojo humano y a la vez, hacer que fuese más económico que los que se ofrecen en el mercado.

B. Propuesta inicial.

Al inicio de este proyecto, durante los años 2015 y 2016, se diseñó una propuesta de seis etapas para desarrollar el proceso de alineación de diafragmas de turbinas de vapor, estas etapas son:

- Identificación de la necesidad (desarrollo de un calibrador para alineación de diafragmas).
- Definición del sistema de obtención de datos, el vehículo a utilizar y su respectivo software.
- Síntesis del sistema de obtención de datos, vehículo y programa.
- Análisis y optimización.
- Realización y evaluación de prototipos y programa.
- Presentación final.

Esta propuesta consiste en la utilización de dos calibradores que miden la ubicación del diafragma con respecto al rotor mediante dos distancias horizontales y una vertical, radiales a los diámetros de la ranura de los portasellos, sin necesidad de desmontar el eje. Las tres distancias alimentan dos ecuaciones para realizar el proceso de alineación.

Del total de las simulaciones realizadas en la plataforma SolidWorks (v. 2015-2016 estudiantil) para probar la confiabilidad de las medidas obtenidas por los calibradores, se consideraron tres, con las cuales se evaluaron la efectividad del calibrador horizontal, del dispositivo encargado de la medición vertical y de la ecuación logarítmica la cual otorga una medida fundamental en el proceso de alineamiento. Dichas pruebas se realizaron considerando los respectivos errores tanto de la escala lineal, como del acelerómetro, según las hojas de datos. Las mediciones obtenidas por ambos calibradores alimentan satisfactoriamente las ecuaciones para la alineación [1].

Las ecuaciones de las que se hace mención son:

$$x = \frac{r_{izq} - r_{der}}{2} \quad (1)$$

$$y = r_{inf} - \frac{r_{izq} + r_{der}}{2} \quad (2)$$

Donde:

- x = ajuste horizontal
- y = ajuste vertical
- r_{izq} = distancia izquierda
- r_{der} = distancia derecha
- r_{inf} = distancia inferior

En ambas ecuaciones los ajustes horizontal y vertical del diafragma representan los desplazamientos respectivos para localizar su centro en la posición de diseño. Las distancias definidas (izquierda, inferior y derecha), son las medidas radiales ya mencionadas, tomadas desde el rotor al diámetro de referencia del diafragma, puede verse igualmente en la Figura 4.

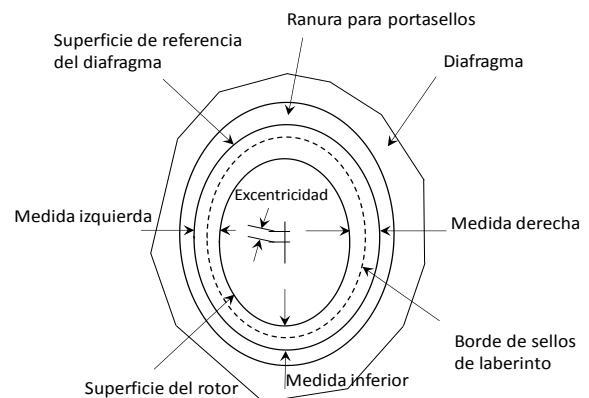


Figura 4.- Distancias radiales medidas desde el rotor simulado a un diámetro de referencia ubicado en el diafragma.

En esta propuesta, se especifica que es necesario realizar el siguiente procedimiento para cada medición horizontal:

- Ubicar el calibrador en el diámetro interno del diafragma como se muestra en la Figura 5.
- Posicionar la varilla de modo que la superficie de medición coincida justo con el diámetro interior del diafragma.
- Situar en cero la escala lineal.

- Deslizar la regla de manera que la superficie de medición tope con el rotor y en este momento adquirir la medición.

Cabe mencionar que los errores esperados (ideales) en las métricas representativas, inclinación del calibrador y proximidad del rotor, son de $\pm 0.1^\circ$ C y ± 0.01 mm, respectivamente.

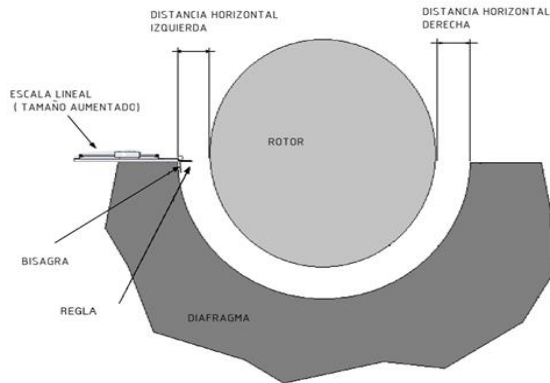


Figura 5.- Montaje del calibrador y obtención de distancias horizontales [1].

Para obtener la distancia vertical, el carro de medición es jalado por la ranura del portasellos, obteniendo la distancia al rotor mediante un medidor lineal al momento que los acelerómetros marquen una inclinación de cero grados con respecto a la horizontal, es decir, cuando el carro está posicionado en la hora 6 (considerando un sistema de referencia horario).

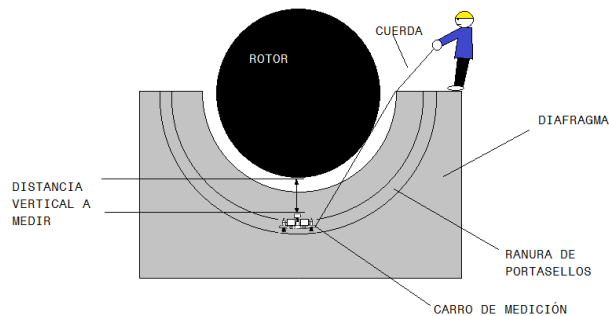


Figura 6.- Momento en que se obtiene la proximidad vertical del rotor [1].

El carro al que se hace referencia, es como el modelo que se ilustra en la Figura 7, el cual incluye dos acelerómetros, un sensor de proximidad y las respectivas tarjetas de circuito para enviar datos a una computadora.

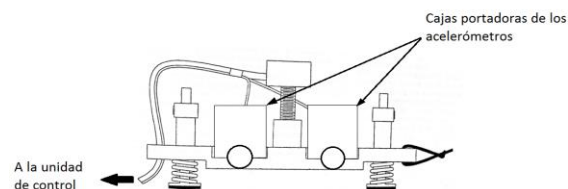


Figura 7.- Montaje de las cajas que contendrán los acelerómetros en el carro de medición [1].

El problema con este diseño, es que los dispositivos electrónicos propuestos resultaban voluminosos, ineficaces e implicaban un riesgo de contacto con el rotor durante la obtención de la medición.

C.- Propuesta del sistema embebido.

Para esta propuesta, se cambiaron los dispositivos que inicialmente propusieron para montarse en el carro. Estos cambios incluyen el uso de un giroscopio MEMS de 3 ejes, un sensor infrarrojo y un microcontrolador.

La idea principal, era obtener los datos de posición para poder hacer la alineación de manera precisa y por supuesto que el dispositivo tuviera cabida exenta de riesgo de golpes dentro de las ranuras.

III. RESULTADOS

A partir de los resultados obtenidos con la propuesta inicial (los cuales fueron todos en simulación), se optó por crear un prototipo del sistema, de manera física, para que la simulación fuera lo más cercana posible al funcionamiento real esperado. De este modo, se decidió trabajar con otros componentes totalmente distintos a los propuestos por los ingenieros mecánicos.

En primera instancia, se eligió un acelerómetro con giroscopio MEMS de 3 ejes que permite medir la rotación alrededor de 3 ejes. Con esta elección, se asegura un mejor resultado en las mediciones requeridas debido a su sensibilidad, su facilidad en el manejo del offset correspondiente y por supuesto, el rango que es capaz de manejar.

La manera en la que el giroscopio detecta el giro o rotación, se ilustra en la Figura 8.

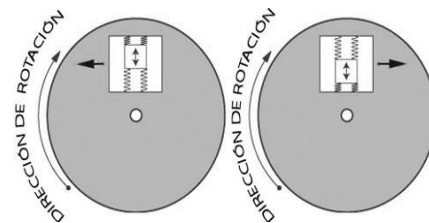


Figura 8.- Esquema de detección de giro.

Cabe aclarar sin embargo, que para esta primera etapa del diseño del sistema embebido, este giroscopio no se ha utilizado aún, debido a que falta construir el prototipo para poder hacer las pruebas.

Se eligió el sensor infrarrojo CNY70 debido a que en el mismo encapsulado tiene al fototransistor y al LED que permiten que al pasar un objeto entre ellos, detecta su presencia al percibir la falta del haz de luz infrarrojo. Es un sensor de corto alcance, pero permite para esta aplicación en particular, un excelente resultado ya que prácticamente obvia otro tipo de luz que no sea la del LED IR para realizar la detección. Este sensor cuenta con las dimensiones físicas adecuadas para formar parte del circuito, además de tener la capacidad de detectar efectivamente mediciones de hasta 2 cm con offset de 0.3 mm. Para optimizar el funcionamiento del sistema embebido, en la actualidad se está incluyendo el uso

de un sensor cuyo fabricante indica en sus hojas de especificaciones que tiene un offset de 0.15 mm.

Por supuesto, se necesitó un circuito acondicionador de señal para poder llevar a cabo las mediciones requeridas, haciendo uso de amplificadores operacionales. La tarjeta final de circuito aparece fotografiada en la Figura 10.

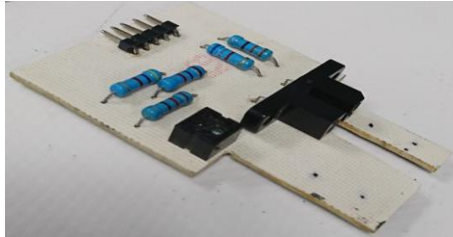


Figura 9.- Tarjeta de circuito para sensores.

Una vez montados los sensores, se procedió a conectar con un sistema de procesamiento de señales que hizo uso del microcontrolador PIC18f4550, para lo cual, hubo que linealizar los resultados de las mediciones del sensor. Esta elección se hizo por practicidad para usar los periféricos, así como del ADC interno del dispositivo, por otra parte, se trataba también de optimizar costos. Se graficaron los resultados de las mediciones haciendo uso del software MATLAB (v. R2013a estudiantil) que sirvió como apoyo para realizar la labor de linealización. La gráfica resultante se muestra en la Figura 11.

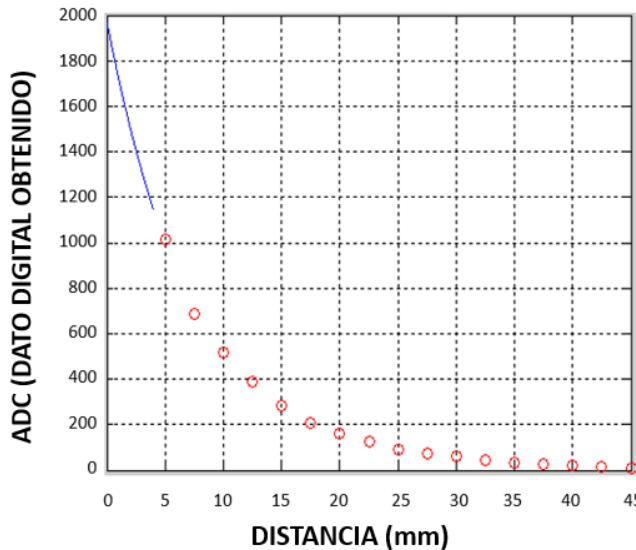


Figura 10.- Gráfica distancia (mm) vs Dato ADC para linealizar el sensor de distancia.

La ecuación que se obtuvo gracias a estas mediciones fue:

$$DISTANCIA = \frac{\log\left(\frac{VALORADC2}{1970.0}\right)}{\log\left(\frac{datomayor}{datomenor}\right)} * 5 \quad (3)$$

Los valores obtenidos ya linealizados, tienen un offset de 0.15 mm. Con ello, se pudo terminar de construir el sistema embebido, el cual, una vez empaquetado para su aplicación en el prototipo, quedó como se ilustra en la Figura 11.



Figura 11.- Presentación final del sistema embebido.

Este sistema fue presentado el pasado mes de Junio y sus pruebas en el prototipo de turbina a escala fueron exitosas.

IV. CONCLUSIONES

Este proyecto es en realidad, una parte del proyecto “Construcción y caracterización metrológica de un calibrador de distancias verticales para alineación de diafragmas de turbinas de vapor”. Se asume que de hecho, aún queda mucho trabajo futuro, sin embargo, debido a los resultados obtenidos con la creación del prototipo, se considera que ha habido un gran avance y que en adelante, sólo se hagan mejoras a lo ya diseñado. El proyecto se encuentra en la etapa de evaluación de prototipos con resultados acorde a lo esperado.

AGRADECIMIENTOS

Al personal de la Central Termoeléctrica “José Aceves Pozos” involucrado en este proyecto, al cuerpo académico “Ingeniería Mecánica y Automatización” del Instituto Tecnológico de Mazatlán, al TecNM y al PRODEP por las facilidades para realizarlo.

REFERENCIAS

- [1] Quiñonez-Arce J. R., Tesis: *Propuesta de dos calibradores para el proceso de alineación de diafragmas de turbinas de vapor de alta potencia*. Instituto Tecnológico de Mazatlán. Abril 2016, pp 65.
- [2] Mcketta J. J., de *Encyclopedia of Chemical Processing and Design*, New York, MARCEL DEKKER, 1997, pp. 313-314.
- [3] Sanders W., «Turbine Steam Path: Manufacturing Errors and their Potential to Influence Blade System Performance,» de *Turbomachinery Publications, Monograph Series No. S-3*, Connecticut, Turbomachinery International Publications, a division of Business Journal, 1987, pp 1-52.
- [4] Comisión Federal de Electricidad, «Procedimiento para Alineación de Máquinas Rotativas,» de *Procedimientos SG de Comisión Federal de Electricidad*, Central Termoeléctrica Río Escondido, 1987, pp. 4-43.
- [5] Coughlin R. y Driscoll F. *Amplificadores Operacionales y circuitos integrados lineales*. 5ª edición. Ed. Prentice-Hall, E.U., 2006, pp 544.
- [6] Pérez, F. E. V., & Areny, R. P. *Microcontroladores: fundamentos y aplicaciones con PIC* (Vol. 1149). Marcombo. Barcelona, 2007, pp 344.