



Método para la determinación de fricción estática en las válvulas.

Ángel, K., Arévalo, S., Bonilla, D., Pohl, M.

Departamento de Electrónica e Informática Universidad Centroamericana "Jose Simeón Cañas", La Libertad, El Salvador
mapohl@uca.edu.sv

Abstract—La presente investigación profundiza la detección de oscilaciones y, específicamente, aquellas generadas por presencia de fricción estática en las válvulas de control de un ingenio azucarero.

Índice de términos—*Autocorrelación, oscilaciones, fricción estática, regularidad, índice de no linealidad, índice de no gaussianidad, fricción estática aparente, biespectro, bicoherencia.*

I. INTRODUCCIÓN

Una planta industrial cuenta con cientos de lazos de control. La presencia de oscilaciones en un lazo de control aumenta la variabilidad del proceso y, por lo tanto, causa y genera menor calidad en los productos, mayores tasas de rechazos de material, consumo de energía más elevado y menor confiabilidad en los procesos. Estadísticamente, aproximadamente un tercio de los lazos son oscilatorios debido a problemas en el control de válvulas [6]. Si el control de las válvulas presenta no linealidades, como la presencia de fricción estática, la salida de la válvula será oscilatoria, esto puede

tornarse como la causa principal de oscilaciones en la respuesta total del proceso.

Entre los diversos tipos de no linealidades en los lazos de control de las válvulas, la fricción estática es la más común y la que genera más problemas a largo plazo. Existen métodos no invasivos para detectar fricción estática en las válvulas, como medición de distancia de desplazamiento del vástago, etc., pero estos resultan muy costosos y poco efectivos porque se necesita de presencia de personal, gastos y tiempos excesivos que reducen la operatividad de una planta.

En este sentido, se hace necesario la implementación de métodos no invasivos que permitan mantener el control de los lazos de control mediante la detección de oscilaciones y, específicamente, aquellas que son generadas por presencia de fricción estática en las válvulas de una planta industrial.

Esta investigación presenta algunos de los métodos para la detección y diagnóstico de oscilaciones presentes en una planta azucarera. La autocorrelación es utilizada para el desarrollo de



dos índices que son de vital importancia para la detección de oscilaciones.

Un tercer índice es calculado basándose en la integral del error absoluto y la regularidad de los cruces por cero desarrollado por Forsman (1999). El cálculo de estos tres índices es fundamental ya que darán la pauta para concluir en cuáles lazos hay presencia de oscilaciones. Sin embargo, dichos índices no dan toda la información necesaria para determinar cuál es la causa de la oscilación, lo que lleva a iniciar otra etapa de los cálculos.

Una vez detectadas las oscilaciones en los lazos, se procede a determinar si éstas se deben a la presencia de fricción estática. Este método está basado en la estadística de orden superior HOS, la cual proporciona las herramientas para detección de no linealidades. Una no linealidad no siempre será por presencia de fricción estática, por lo que es necesario un método que permita identificar este fenómeno, es acá donde se desarrolla como solución el método de ajuste de la elipse. Este método, además de llevar a cabo la detección de fricción estática, permite cuantificarla y, por ende, se pueden presentar los lazos con valores de fricción estática más críticos.

II. METODOLOGÍA PARA DETECCIÓN DE OSCILACIONES

Se ha tomado la autocorrelación como herramienta central en el análisis de oscilaciones de las señales. La correlación indica el grado de similitud entre dos variables aleatorias [9].

El primer paso del modelado matemático de la señal está en determinar si se está construyendo un proceso determinístico o un proceso estocástico [3].

Para los procesos estocásticos, se puede predecir cuál es el valor de la probabilidad del valor futuro que se obtendrá entre dos límites de tiempo específicos; es decir, son procesos que se rigen por leyes probabilísticas y por ende el objeto de estudio para el caso de la autocorrelación.

Los procesos estocásticos están definidos por sus características probabilísticas: media, varianza y covarianza.

La media de un proceso estocástico se estima de la siguiente manera [3]:

$$\mu = \frac{\sum_{t=1}^N x_t}{N} \quad (1)$$

Dónde:

μ Representa la media

N es número de muestras

x_t es la muestra en cuestión.

Varianza [3]:

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (x_t - \bar{x})^2 \quad (2)$$



La importancia de estas características está en la determinación en los coeficientes de autocorrelación que permitirá descubrir la periodicidad de una señal envuelta en ruido o para identificar la frecuencia fundamental de ésta cuando no se puede distinguir entre sus armónicos. Para lograr el cálculo de la autocorrelación se obtiene previamente la autocovarianza, la cual indica que tan relacionadas están dos variables. Se muestra la covarianza de la siguiente manera [3]:

$$s_{xy} = \frac{1}{(t-1)} \sum_{t=1}^N (x_t - \bar{x})(y_t - \bar{y}) \quad (4)$$

La covarianza da el grado de variación entre dos variables. Se sabe que para la autocorrelación se necesita encontrar la relación de una variable con ella misma desplazada un tiempo t . Por lo tanto, la covarianza se adapta al proceso generando el término autocovarianza, que no es más que el mismo concepto de covarianza aplicado a una misma variable con un retardo de tiempo t [3]:

$$y_k = cov[x_t, x_{t+k}] = E[(x_t - \mu)(x_{t+k} - \mu)] \quad (5)$$

La función de autocorrelación muestra cómo la correlación entre dos valores cambia a medida que varía el desplazamiento entre ellos. Con la media, varianza y covarianza ya determinadas, la autocorrelación es la normalización de la autocovarianza [3]:

$$r(\tau) = \frac{R(\tau)}{R(0)} \quad (6)$$

Donde $R(0)$ es el valor de la autocovarianza con retardo 0, es decir, el punto donde se da el mayor valor.

Para la elección del número de muestras [3] se recomienda utilizar como mínimo 50 muestras y un retardo máximo de $N/4$.

La función de autocorrelación está caracterizada por correlaciones que alternan en signo y que tienden a disminuir a medida aumenta el desplazamiento [4]. Este decaimiento es el utilizado en el análisis de un método para detección de oscilaciones. Debido a la característica de simetría, solamente se toma el lado positivo de la función de autocorrelación.

A. Método del índice de la regularidad

Los cruces por cero de la AFC permiten determinar de forma directa el periodo de oscilación de la señal. Se utilizan los cruces por cero de la AFC ya que ésta funciona como un filtro temporal que reduce el ruido en los desfases distintos al desfase cero. El principio de este índice está basado en que la media del periodo de oscilación de la señal es dos veces el intervalo promedio entre dos cruces por cero de una oscilación. Y la desviación estándar del periodo σ_{T_p} es el doble de la desviación estándar del intervalo entre los cruces por cero. La media del periodo de oscilación se define de la siguiente manera:

$$\bar{T}_p = 2 \frac{\sum_{i=1}^n \Delta t_i}{n} = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n (t_i - t_{i-1}) \quad (7)$$

El análisis de la media del periodo de oscilación y de la desviación estándar, proporcionan un indicador de oscilaciones que es el índice de regularidad. Dicho índice se representa por la letra r y se calcula mediante la siguiente ecuación [4]:

$$r = \frac{1 \bar{T}_p}{3 \sigma_{T_p}} \quad (8)$$

El valor de umbral optado para el índice de regularidad es seleccionado en base a condiciones estadísticas. Si los cruces por cero son aleatorios, cada uno de ellos presenta la misma probabilidad de llegada para cada intervalo de muestreo, entonces cada intervalo tendrá una distribución exponencial. Para esta distribución la media es igual a su desviación estándar, a partir de esta afirmación se desarrolla una hipótesis. Para esta condición la hipótesis afirma que las llegadas aleatorias tienen un comportamiento con PDF exponencial en el cual $\bar{T}_p = \sigma_{T_p}$, por lo tanto ésta será una señal aleatoria. Esta hipótesis se refuta cuando $r > 1$, ya que esto lleva a que $3\sigma_{T_p} < \bar{T}_p$ y de ningún modo se cumple la condición para una distribución exponencial, concluyendo que los intervalos por cruce por cero son regulares, por lo tanto la señal analizada es oscilatoria.

Por lo tanto cuando $r > 1 \rightarrow \bar{T}_p > 3\sigma_{T_p}$ se concluye que la señal analizada es oscilatoria y que dicha oscilación es regular porque cruza a la media de la señal en intervalos regulares [7].

B. Método del índice del decaimiento

Otra de las propiedades de la autocorrelación es que si la señal original es oscilatoria, la función de autocorrelación también lo será, recordando que el valor de ésta va disminuyendo a medida se aumenta el desfase puesto que la relación de las variables se va perdiendo. Un método para conocer la medida de qué tan oscilatoria es una señal, en el dominio del tiempo, es el índice de decaimiento. Se inicia con el cálculo para el índice de decaimiento definido como [1]

$$\mathcal{R} = \frac{a}{b} \quad (9)$$

Donde a es la distancia del primer máximo a la línea recta que conecta los dos primeros mínimos y b es la distancia del primer mínimo a la línea recta que conecta el coeficiente de desfase de cero de la autocorrelación y el primer máximo. Para el caso que la señal carezca de dos mínimos, dado que no se tiene ningún parámetro para el cálculo del coeficiente \mathcal{R} , \mathcal{R} toma un valor de cero [4].

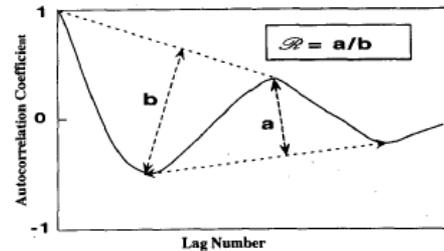


Fig. 1 Representación gráfica de los coeficientes de la autocorrelación.

Se especifica un umbral de \mathcal{R} a partir del cual se considera existencia de oscilaciones. Este umbral dependerá de la aplicación en la industria y, experimentalmente, se concluye que un buen umbral sería $\mathcal{R} = 0.5$, valores mayores a este umbral serían índice de oscilación.

Para el cálculo de \mathcal{R} se conoce que es necesario dos mínimos y un máximo en el correlograma. Sabiendo que el retraso máximo se selecciona para que sea un cuarto del número de datos [3], se debe tener un mínimo de ciclos en la señal original para lograr tener los dos mínimos necesarios. Tomando cuatro periodos de una sinodal pura, se tiene:

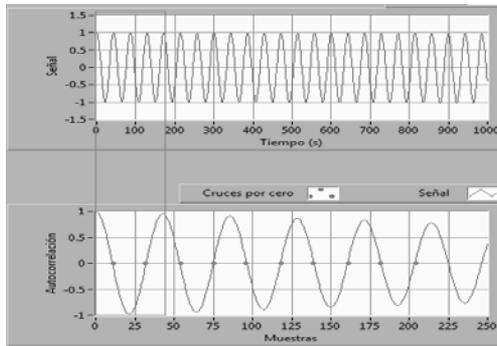


Fig. 2 Función de autocorrelación seleccionando 4 ciclos de la señal original.

Ya que la autocorrelación se ve disminuida a una escala $N/4$, no se obtienen los dos mínimos necesarios. Al aumentar $\frac{1}{4}$ del periodo, se obtiene:

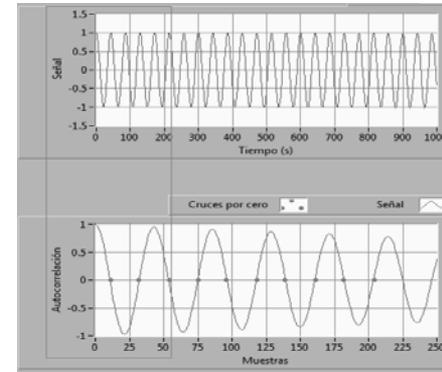


Fig. 3 Autocorrelación tomando en cuenta cinco periodos de la señal original.

En este caso se observa en la figura 3 que hay un mínimo adicional. Experimentalmente se determina que el mínimo número de ciclos que debe tener la oscilación para poder ser analizada en la autocorrelación es de 1.25, es decir, se deben tomar como mínimo 5 ciclos de la señal original. De esta manera se cumple la condición para que la función de autocorrelación presente los dos mínimos necesarios para el cálculo de a .

C. Método del índice de Forsman y Stattin

Existe un método alternativo que se desarrolla sin utilizar la evaluación del espectro con la transformada de Fourier, sino que analiza las señales en el dominio del tiempo, además no exige un cálculo ni interpretación demandante de los resultados, lo cual es una ventaja. Este método se basa en la integral del valor absoluto del error IAE definido:

$$IAE = \int_{t_{i-1}}^{t_i} |e(t)| dt \quad (10)$$

En donde e representa el error del control y t_i y t_{i-1} son los instantes consecutivos de cruces por cero. Este método está basado en la comparación de la similitud de las áreas sucesivas que se crean para cada cruce por cero, cada área positiva se compara con las siguientes áreas positivas, así mismo las áreas inferiores entre sí. El tiempo de los cruces por cero son sucesivos y las integrales de error absoluto no deberían de presentar variación significativa en el tiempo [4].

Para el cálculo del índice se definen dos constantes de sintonía, α y γ , las cuales poseen valores entre 0 y 1. Forsman y Stattin (1999) sugieren seleccionar rangos de valores $0.5 \leq \alpha \leq 0.7$ y $0.7 \leq \gamma \leq 0.8$. Estos rangos fueron obtenidos a partir de las relaciones entre diferentes cruces por cero y relaciones de áreas subsecuentes [3]. Luego de seleccionar las constantes éstas permiten calcular los índices de oscilación h_A y h_B . Estos índices funcionan para cuantificar las veces que se cumple las siguientes condiciones:

$$h_A = \#\{i < \frac{N}{2}; \alpha < \frac{A_{i+1}}{A_i} < \frac{1}{\alpha} < \frac{\delta_{i+1}}{\delta_i} < \frac{1}{\gamma}\} \quad (11)$$

$$h_B = \#\{i < \frac{N}{2}; \alpha < \frac{B_{i+1}}{B_i} < \frac{1}{\alpha} < \frac{\varepsilon_{i+1}}{\varepsilon_i} < \frac{1}{\gamma}\} \quad (12)$$

Donde N es el número de veces que la señal cruza por cero, denota el número de elementos que comprende la ecuación y A_i, B_i, δ_i y ε_i se definen en la Fig. 1.

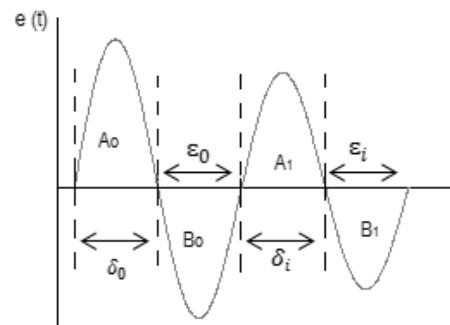


Fig. 4 Parámetros para el cálculo de los índices de oscilación [4].

Los resultados del índice pueden ser interpretados de la siguiente manera [4]:

- i. $h > 0.4$ son lazos que son oscilatorios por naturaleza, por lo tanto necesitan un análisis más profundo.
- ii. $h > 0.8$ presentan oscilaciones más críticas.
- iii. Solamente para conocer los parámetros de lo que el índice nos puede indicar, cabe mencionar el índice de oscilación para el ruido blanco, este es $h = 0.1$.



III. DETECCIÓN DE FRICCIÓN ESTÁTICA

A. Herramientas para la de detección de no linealidades.

Antes de determinar la presencia de fricción estática, se debe examinar si existen linealidades en los lazos de control, dicha detección se realiza por medio de varias herramientas de la estadística de orden superior, las cuales se detallan a continuación:

1) Biespectro: El Biespectro se define como el cumulante de tercer orden en el dominio de la frecuencia.

$$B(f_1, f_2) \triangleq \text{DDFT} [c_3(\tau_1, \tau_2)] \equiv E[X(f_1)X^*(f_1 + f_2)] \quad (13)$$

Donde DDFT indica la doble transformada discreta de Fourier y $X(f)$ es la transformada de Fourier de una serie dada $x(t)$.

La ecuación 13 muestra que el biespectro es una cantidad compleja que tiene magnitud y fase. El biespectro puede ser graficado en dos frecuencias independientes f_1 y f_2 en una figura con tres dimensiones. Y es por ello que su grafica nos permite determinar la presencia de no linealidades, sin embargo debido a que la estimación del biespectro depende de la energía de la señal en la bifrecuencia, la varianza de la estimación puede ser mayor en la bifrecuencia donde la energía es alta y menor donde la energía es baja. . Esto genera problemas en la estimación, es por ello recomendado utilizar la normalización del biespectro, porque de esta manera sus avalores oscilan en un rango de determinado [2].

2) Bicoherencia: Como se mencionó en el párrafo anterior, es necesario normalizar el biespectro para obtener una mejor estimación de la presencia de no linealidades. A dicha normalización se le conoce como: Bicoherencia. La bicoherencia se define de la siguiente manera:

$$\text{bic}^2(f_1, f_2) \triangleq \frac{|B(f_1, f_2)|^2}{E[|X(f_1)X(f_2)|^2] E[|X(f_1 + f_2)|^2]} \quad (14)$$

Donde $X(f)$ es la transformada de Fourier de la serie $x(t)$.

La utilidad de la bicoherencia reside en que está delimitada entre 0 y 1[1].

El biespectro se calcula con el método directo el cual se detalla en el siguiente flujograma (ver figura 5).

B. Prueba de gaussianidad y linealidad de las señales.

A continuación se muestra el cálculo de los diferentes índices que darán la pauta para la detección de no linealidades.

1) Índice de No-Gaussianidad(NGI): Se utiliza la bicoherencia para construir una prueba chi-cuadrado para poder examinar no linealidades en las señales de tiempo. Dicha prueba consta de dos índices los cuales son el índice de no gaussianidad (NGI) e índice de no linealidad (NLI). La magnitud de estos índices está delimitada entre los valores -1 y 1 ya que la bicoherencia que se utiliza en su cálculo también es un valor delimitado (0 y 1) [1].

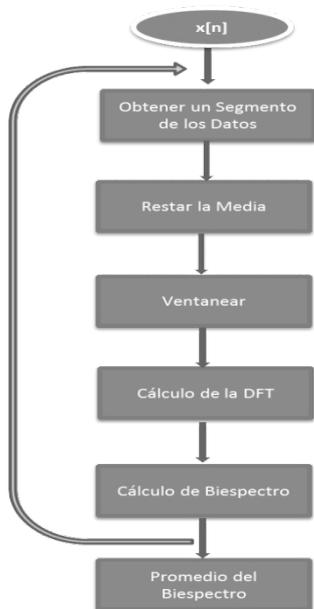


Fig. 5 Esquema del método de estimación del biespectro.

A continuación se describe el desarrollo de dicha prueba:

Una señal discreta en el tiempo, $x(k)$ se llama lineal cuando se puede representar como se muestra en la siguiente ecuación:

$$x(k) = \sum_{n=0}^{M-1} h(n) e^{(k-n)} \quad (15)$$

Donde $e^{(k)}$ es una secuencia de variables aleatorias independientes idénticamente distribuidas con $E[e^{(k)}] = 0$, $\sigma_e^2 = E[e^2(k)]$ y $\mu_3 = E[e^3(k)]$, en base a esto se obtienen las siguientes relaciones en el dominio de la frecuencia [1]:

Espectro de potencia:

$$P(f) = \sigma_e^2 |H(f)|^2 \equiv |X(f)X^*(f)| \quad (16)$$

Biespectro:

$$B(f_1, f_2) = \mu_3 H(f_1)H(f_2)H^*(f_1 + f_2) \quad (17)$$

Donde:

$$H(f) = \sum_{n=0}^{M-1} h(n) e^{-2\pi i f n} \quad (18)$$

La ecuación del cuadrado de la bicoherencia puede ser escrito como:

$$bic^2(f_1, f_2) \equiv \frac{|B(f_1, f_2)|^2}{E[|P(f_1)|]E[|P(f_2)|]E[|P(f_1+f_2)|]} \quad (19)$$

Para una señal lineal, al sustituir la ecuaciones 16, 17 y en la 14 se obtiene la siguiente ecuación 19:

$$bic^2(f_1, f_2) = \frac{\mu_3^2}{\sigma_e^4} \quad (20)$$

Al observar la ecuación 20 se puede concluir que para una señal lineal x , el cuadrado de la bicoherencia es independiente de las bifrecuencias. Esto representa una constante en el plano de la bifrecuencia. Por lo tanto si el cuadrado de la bicoherencia es cero, la señal x es gaussiana. [8]

La información anterior se utiliza para construir las hipótesis estadísticas que sirven para examinar la bicoherencia en las



bifrecuencias. Una desventaja de esta prueba es que mientras se aplica a cada bifrecuencia en la gráfica del cuadrado de la bicoherencia, la probabilidad de tener una detección falsa se incrementa debido al gran número de bifrecuencias en el dominio principal [2]. Por lo tanto, se sobreestima el número de bifrecuencias en las cuales la magnitud de la bicoherencia es insignificante [1].

Con frecuencia el dominio principal de la gráfica de bicoherencia contiene más de 1000 bifrecuencias que son utilizadas en el análisis de no linealidades. Para poder determinar si una señal es lineal, se debe evaluar primero si es gaussiana. Para realizar dicho estudio, se define un índice conocido como índice de no-gaussianidad (NGI) el cual se define a partir de la siguiente prueba [1]:

La hipótesis nula (H_0) de esta prueba establece que: la señal es gaussiana.

La hipótesis alterna (H_1) establece que: la señal es no gaussiana.

Partiendo de la hipótesis nula, el índice de no gaussianidad puede expresarse en base a las condiciones del cuadrado de la bicoherencia que se muestran a continuación [1]:

$$P(\overline{bic^2} > \overline{bic_{crit}^2}) = \alpha \quad (20)$$

Donde:

$$\overline{bic_{crit}^2} = \frac{1}{4KL} [c_{\frac{\chi^2}{2}}^2 + \sqrt{4L-1}]$$

, L es el número de bifrecuencias dentro del dominio principal del biespectro, K es el número de

datos usados en el cálculo de la DFT, α es el nivel de confiabilidad y $c_{\frac{\chi^2}{2}}^2$ es el valor crítico calculado de la tabla de distribución central chi-cuadrado (χ^2) para un nivel significativo de α con dos grados de libertad. Típicamente se elige $\alpha=0.5$, lo que da $c_{\frac{\chi^2}{2}}^2=5.99$ [1].

En base a lo anterior el índice de no gaussianidad que se define como [4]:

$$NGI = \overline{bic^2} - bic_{crit}^2 \quad (21)$$

Indica que:

$$P(NGI > 0) = \alpha \quad (22)$$

Por lo tanto para un nivel considerado de α se pueden establecer las siguientes condiciones:

NGI ≤ 0 La señal es gaussiana

NGI > 0 La señal es no – gaussiana

El índice de no gaussianidad tiene una gran utilidad ya que facilita la determinación de no linealidades y evita el trabajo de estar evaluando el gráfico de la bicoherencia en cada bifrecuencia [4].

2) El índice de no linealidad (NLI): Si el resultado de evaluar el NGI es que la señal es gaussiana, entonces se asume que la señal es lineal, pero si se da un caso de no gaussianidad, no se puede concluir si es o no lineal. Es por ello que se define

el índice de no linealidad, éste es una prueba para evaluar no linealidades y se define así: [4]:

$$NLI = bic_{max}^2 - \left(\overline{bic_{robusta}^2} + 2\sigma_{bic_{robusta}^2} \right) \quad (30)$$

Donde \bar{y} y σ son respectivamente la media robusta y la desviación estándar robusta del cuadrado de la bicoherencia. Ellos se obtienen excluyendo un porcentaje del extremo superior e inferior de la bicoherencia, respectivamente. El valor que se recomienda usar es 10 [1].

Idealmente el NLI debería ser cero para procesos lineales, lo que implica que la magnitud del cuadrado de la bicoherencia es constante o que la superficie de la gráfica de bicoherencia es plana. La razón de esto es si el cuadrado de la bicoherencia es una constante en todas las frecuencias, la varianza deberá ser cero y tanto el máximo como la media del cuadrado de la bicoherencia tendrán el mismo valor [4]. Por lo tanto se concluye que :

Sí $NLI \leq 0$ la señal es Lineal

Si $NLI > 0$ la señal es no – lineal

Para los algoritmos de detección de no linealidades, se recomienda usar un alto número de datos (4096 muestras, por ejemplo).

Los índices descritos en este apartado nos permiten determinar la no gaussianidad y no linealidad de una señal, sin embargo no pueden indicar si dichas no linealidades se deben a la fricción

estática o a otra causa. Es por ello que se debe realizar un método para determinar y cuantificar la fricción estática, este método se describe en el siguiente apartado.

C. Deteccion y cuantificaciòn de fricción estática

Este método consiste en graficar PV vrs OP. Al graficar PV vs OP se obtiene una gráfica en forma de elipse. En base a la gráfica obtenida, se ideó un método para poder cuantificar la fricción estática y se conoce como ajuste de la elipse, y consiste en cuantificar el ancho máximo de la elipse medido en dirección OP[7].

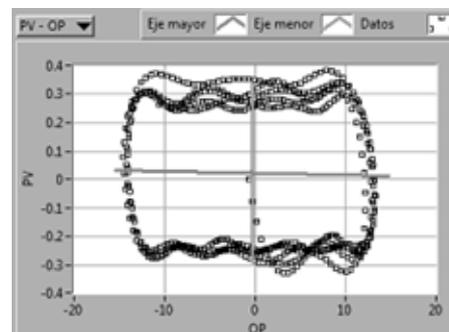


Fig. 6 PV vs OP

El cálculo del valor de fricción estática se determina por la ecuación 24:

$$Stiction\ aparente(\%) = \frac{2ab}{\sqrt{a^2 \sin^2 \alpha + b^2 \cos^2 \alpha}} \quad (24)$$

Dónde: a y b son la longitud del eje mayor y del eje menor de la elipse ajustada, respectivamente, α es el ángulo de rotación medido desde el eje positivo de las x .

La fricción estática que se determina es aparente, porque representa un porcentaje de la cantidad de fricción estática real presente en la válvula debido a la dinámica del lazo reflejada en OP y PV, en particular debido al efecto del controlador para regular PV lo cual suaviza el efecto de fricción estática [1].

IV. RESULTADOS

A. Resultados de secuencia de análisis en tiempo real.

En el apartado anterior se ha explicado el funcionamiento y secuencia de los cálculos, ahora se muestran los resultados del programa de análisis en línea. Este programa mantiene la lectura de las variables en tiempo real automáticamente, cada intervalo de tiempo previamente insertado por el usuario. El programa se encarga de analizar cada variable y determinar el índice de oscilación e índice de fricción estática. Al final de cada corrida se presentan los resultados con el nombre del lazo y su índice respectivo.

Para la validación del programa se hizo uso de la herramienta “Análisis de oscilaciones manual” y “Análisis de detección de stiction manual”, previamente validados por CASSA para la tesis de “Detección de oscilaciones en un lazo de control de un ingenio azucarero. Para la validación del correcto funcionamiento CASSA proporcionó casos de lazos de control reales que se presentan a continuación:

En un caso, se muestran los resultados obtenidos al analizar la válvula de control de nivel del melador No. 3, con datos del problema de no linealidad presente en la misma. En el otro caso, se demuestra cómo se hace un análisis a una válvula con problemas de stiction detectados y comprobados físicamente en CASSA.

Se realizó un VI capaz de guardar los datos en tiempo real en la base de datos, esto como una herramienta adicional para lograr la validación. Una vez los datos estaban siendo guardados, se procedió a la ejecución en tiempo real.

B. Control de flujo de licor crudo en refinería.

En esta parte se presentan los resultados de analizar una válvula con presencia de fricción estática.

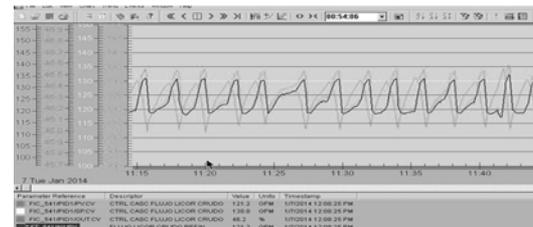


Fig. 7 Comportamiento de válvula en análisis

Se puede observar en la tendencia de la Fig. 7 que hay indicadores de presencia de oscilaciones y de fricción estática. Se procede a analizar, como primer paso, la detección de oscilaciones:

Se guardaron los datos en la base de datos desde las 9:09 pm a 9:20 pm del 05/08/2014. Luego de tener los datos en Citadel, se

analizó la presencia de oscilaciones. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

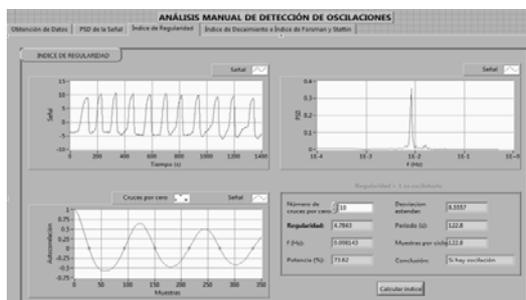


Fig. 8 Índice de regularidad

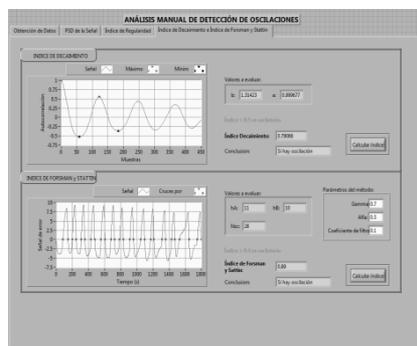


Fig.9 Índices de método decaimiento y Forsman y Stattin.

Al ver los índices de oscilación de cada método se concluye que la señal es oscilatoria. Para la validación del programa en línea se procede a guardar los datos en Citadel al mismo tiempo que son leídos por el índice del programa. Luego de haber verificado la lectura en tiempo real, el programa realiza el análisis y arroja los resultados de los índices.

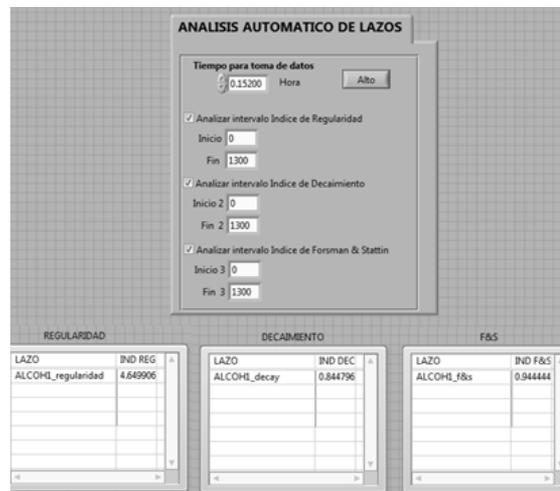


Fig.10 Resultado de índices en el programa automático en línea.

El programa presenta el lazo y el índice por método. En la librería de escritura en la base de datos, los índices se van guardando también en cada variable previamente creada. De igual manera se concluye, mediante el estudio de los índices, que la señal leída en tiempo real es oscilatoria. A continuación se presenta la comparación que demuestra la validación de la herramienta en línea:

TABLA I.
COMPARACIÓN DE ÍNDICES PARA VALIDACIÓN

Índice	Manual	En línea
Regularidad	4.78	4.649
F&S	0.89	0.94
Decaimiento	0.79	0.844

Fuente: Elaboración Propia

Una vez el programa en línea ha detectado oscilaciones, se procede a correr el programa en línea de detección de fricción estática. De la misma manera que la validación anterior, se hará el análisis en la herramienta manual y luego en la herramienta en línea, pudiendo así comparar los resultados que demuestren el correcto funcionamiento del programa en línea.

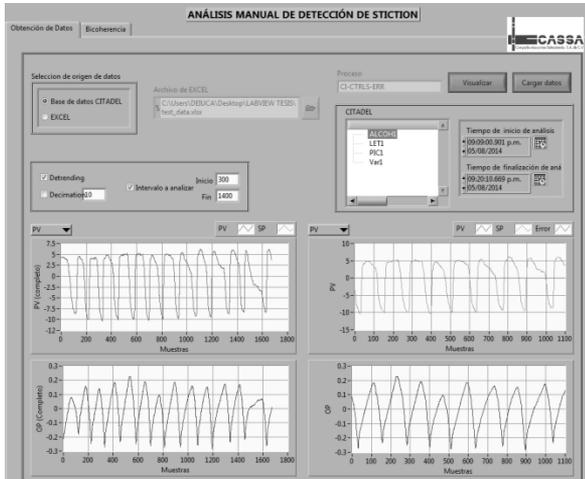


Fig. 11 Presentación de datos a analizar en detección de fricción estática.

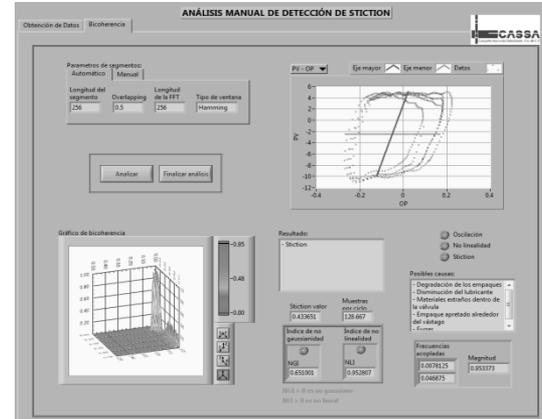


Fig.12 Resultado de detección de fricción estática.

En efecto, el programa detecta stiction en el lazo de control y cuantifica el valor de ésta en 0.4336.

Se procede a correr el programa en línea mediante el almacenamiento y lectura de datos desde las tres librerías que contienen los parámetros PV, SP Y OP.

Como se observa en la Fig. 12 el resultado también es que hay fricción estática presente en el lazo de control. Además, se introdujeron tres lazos más para validar que el programa no se detenga por algún error por falta de datos. El programa lanza los resultados de cada índice de stiction por cada lazo en una tabla y, al mismo tiempo, presenta los diez peores indicadores en otra tabla, ordenándolos de mayor a menor. En caso no haya presencia de fricción estática el resultado será cero.



Fig.13 Resultado de detección de stiction de herramienta en línea.

TABLA II.
COMPARACIÓN DE RESULTADOS ENTRE HERRAMIENTA MANUAL Y EN LÍNEA PARA SU VALIDACIÓN.

Índice	Manual	En línea
Fricción estática	0.436	0.434

V. CONTROL DE NIVEL DE EVAPORADOR DE CUARTO EFECTO.

En este apartado se muestran los resultados obtenidos al analizar la válvula de control de nivel del Melador 3, éste presenta problema de no linealidad que no es por fricción estática. Para la validación de este caso se guardaron los datos en CITADEL de 2:15 pm a 4:30 pm el 5/08/2014, el análisis con la herramienta manual de detección de oscilaciones mostró los siguientes resultados:

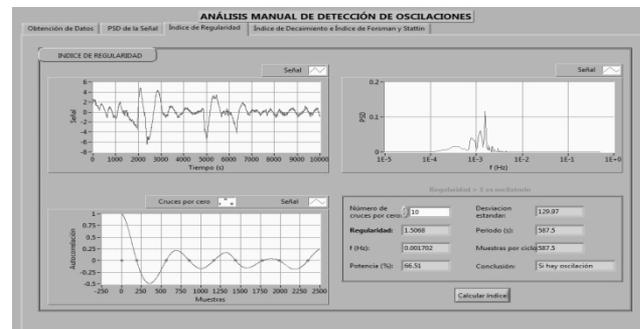


Fig. 14 Índice regularidad para control de nivel de evaporador de cuarto efecto.

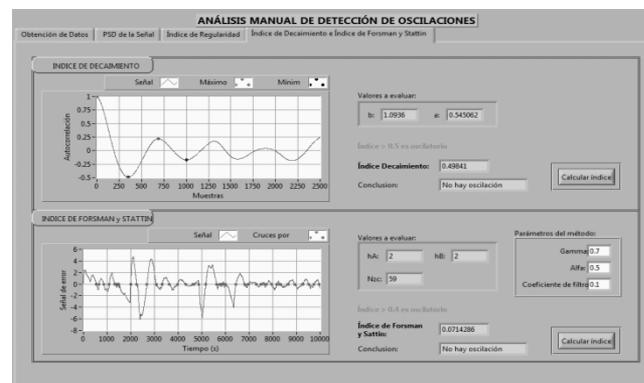


Fig.15 Índice decaimiento e índice Forsman y Stattin, para control de nivel de evaporador de cuarto efecto.

El índice de regularidad concluye que hay oscilación, mientras que decaimiento y Forsman dan como resultado que no la hay. Experimentalmente, es evidente que el resultado de regularidad es más certero, por lo que el método más fiable y robusto para detección de oscilaciones es el método de

regularidad, razón por la cual es el método implementado en el análisis posterior de stiction en línea.

El programa de detección de oscilaciones en línea genera los siguientes resultados:

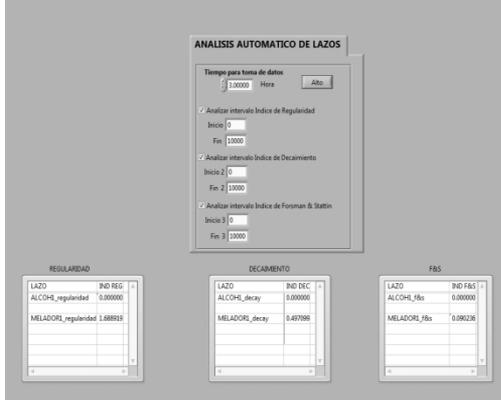


Fig. 16 Resultados análisis detección de oscilaciones en línea.

TABLA III.

COMPARACIÓN DE RESULTADOS PARA CONTROL DE NIVEL DE EVAPORADOR DE CUARTO EFECTO.

Indice	Manual	En línea
Regularidad	1.51	1.68
F&S	0.07	0.09
Decaimiento	0.498	0.497

Fuente: Elaboración Propia

Con esta comparación se validan los resultados del programa en línea, procediendo ahora al análisis de detección de fricción estática.

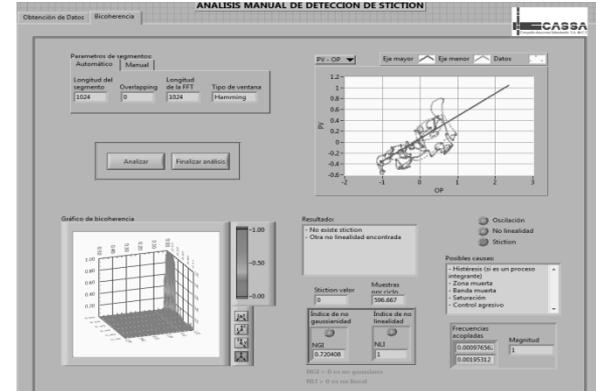


Fig.17 Resultado de stiction de válvula para control de nivel de evaporador de cuarto efecto.

Se concluye presencia de no gaussianidad y de una no linealidad.

A pesar de la existencia de no linealidad se concluye, mediante la falta de ajuste de una elipse, que ésta no es causada por presencia de stiction en la válvula.

Al no haber stiction, el programa en línea debe mostrar un valor de cero para el lazo en cuestión, tal como se observa en la Fig. 18, mostrando de esta manera la validación en línea.

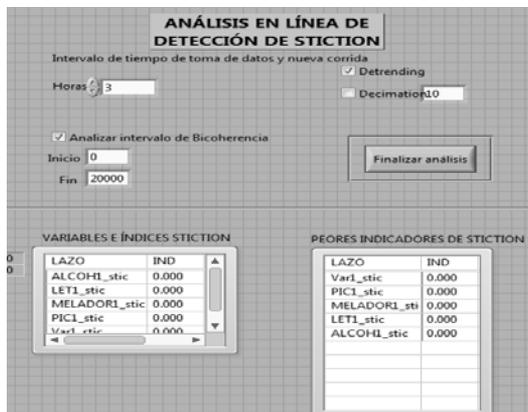


Fig. 18 Resultado en línea de stiction en válvula para control de nivel de evaporador de cuarto efecto

VI. CONCLUSIONES

Del análisis de los resultados se concluye que la eliminación de la tendencia resulta importante en el análisis de las señales, éste permite trabajar los lazos como estacionarios y manejar los datos alrededor del punto de ajuste constante, considerando la media constante en los diferentes desplazamientos de tiempo. De esta manera se eliminan tendencias a largo plazo y se hace énfasis en la relación señal-señal, en lugar de la tendencia que éstas sigan en el tiempo.

El estudio de los tres métodos de detección de oscilaciones indicó, según los resultados, que los métodos basados en la función de autocorrelación son más confiables que el método basado en la integral del error absoluto ya que la autocorrelación brinda una propiedad de filtrado, suprimiendo ruidos e interferencias envueltas en la señal original,

permitiendo de esta manera hacer un análisis más exacto. En cambio, el método basado en la integral de del error absoluto resultó más propenso a error en la detección ya que es más sensible al ruido que puede estar presente en la oscilación.

De los dos métodos basados en la autocorrelación, el de regularidad de los cruces por cero es el que mostró los resultados de manera más confiable y robusta debido a que el análisis de este índice está basado en procesos estadísticos y matemáticos que confirman su validación; por otro lado, el método de decaimiento puede conllevar a un error si la longitud de la autocorrelación es menor a la necesaria para el cálculo, uno de los mínimos necesarios para el análisis queda en la última muestra de la función de autocorrelación, tomando esta medida errónea como un valle o cero. Además con el método de la regularidad es posible la detección de múltiples oscilaciones, lo cual no se logra con el método del decaimiento.

Para en análisis del resultado de bicoherencia, cuando se obtiene un valor diferente de cero, su gráfica presenta picos en las bifrecuencias, lo cual es un claro indicio de que la señal es no lineal y esto se confirma con el hecho de que los valores de NGI y NLI son mayores que cero; sin embargo, esto no implica que haya presencia de fricción estática, por lo cual se hace necesario aplicar el método de ajuste de la elipse para identificar la presencia de la fricción estática. Además de la identificación, este método aporta la cuantificación de fricción mediante el resultado de fricción aparente cuya magnitud es un valor que muestra el nivel de severidad del fenómeno.

Con los resultados se deduce que si una señal es no gaussiana y no lineal, hay presencia de fricción estática cuando la firma



(gráfica posición de la válvula vs señal aplicada) de la válvula presenta saltos o imperfecciones en las esquinas de la elipse de la gráfica, esto se debe a que cuando la válvula trata de cambiar de posición se atasca, permaneciendo en esta posición mientras la salida del controlador sigue aumentando. La válvula logrará cambiar de posición en un determinado nivel de salida del controlador y, en este instante, la válvula da un salto brusco, lo cual ocasiona las imperfecciones en las esquinas de la gráfica.

El número de datos a tomar en cuenta en cada corrida está relacionado a la frecuencia mayor que se desea detectar. La autocorrelación requiere de 1.25 ciclos de la oscilación original para que ésta pueda ser detectada. El rango experimental se estimó en 900 muestras como mínimo, pero éste valor será variante a medida surjan nuevas oscilaciones dentro de los lazos.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] Choudhury, M.A.A.S., Shah, S.L., & Thornhill, N. (2004). Diagnostics of Poor Control Loop Performance using Higher Order Statistics. Amsterdam: Elsevier
- [2] Fackrell, J. W., & McLaughlin, S. (1996). Quadratic Phase Coupling Detection Using Higher Order Statistics. United Kingdom: IEEE publishing
- [3] G.E.P Box, "Time Series Analysis: Forecasting and Control". Prentice Hall: New Jersey, 1994.
- [4] Jelali, M. & Biao, H. (2010). Detection and Diagnosis of Stiction in Control Loops. London: Springer-Verlag
- [5] Karra, S. & Karim, M. N. (2009). Comprehensive methodology for detection and diagnosis of oscillatory

control loops. Control Engineering Practice 17 (939 - 956). New York: Pergamon.

- [6] M.A.A.S., Choudhury, S.L., Shah & N., Thornhill. "Diagnosis of process Nonlinearities and Valve Stiction". Editorial Springer-Verlag: Berlin 2008
- [7] N. Thornhill, B. Huang & H. Zhang, "Detection of multiple oscillations in control loops". Journal Control Press: New Jersey, 2003.
- [8] Nikias, C., & Mendel, J. (1993). Signal Processing with Higher-Order Spectra. New York: IEEE Signal Processing Magazine.
- [9] P., Peebles. Probability, random variables and random signal principles. McGraw-Hill: Japan 1980