

OPTIMIZACIÓN DEL CONTROL DE CAPACIDAD DE LAS UNIDADES COMPRESORAS DE GAS ESTACIÓN REFORZADORA 1-8, BASADO EN SISTEMAS HÍBRIDOS Y DETECCIÓN DIFUSA DE EVENTOS

(Optimization of capacity control units compressors gas booster station 1-8, based on hybrid systems and detection of diffuse events)

Recibido: 01/11/2011 **Aceptado:** 04/04/2013

Bourghoul, Marbely
PDVSA, Venezuela
bourghoulm@gmail.com

Chirinos, William
PDVSA, Venezuela
williamchirinosc@gmail.com

RESUMEN

La investigación tiene como propósito fundamental optimizar el control de capacidad de las unidades compresoras de gas Estación Reforzadora 1-8, basado en sistemas híbridos y detección difusa de eventos; empleando un conjunto de reglas que permiten la anticipación de acciones apropiadas de control. La investigación es de tipo descriptiva, de campo y proyectiva. El diseño de investigación es no experimental, con base en las técnicas de identificación de sistemas de Ljung (1994). El estudio está estructurado en 5 fases: la recopilación de los datos de las unidades turbocompresoras a través del análisis del comportamiento del sistema de control existente, el desarrollo del modelo matemático del proceso aplicando las funciones de Laguerre (1879), la identificación de los parámetros de entonación de los lazos PID convencionales, el desarrollo de la dinámica continua y discreta del sistema híbrido y el diseño del esquema de control basado en el razonamiento difuso a través de la herramienta de Matlab Versión 7.6.0; posteriormente se simuló y analizó el comportamiento de ambas estrategias. Se observó finalmente, las ventajas del sistema inteligente propuesto sobre las acciones de regulación de velocidad de las turbinas en las unidades compresoras de la Estación Reforzadora R1-8, características que demuestran una funcionalidad operativa elevada.

Palabras claves: Control de capacidad, Unidades turbocompresas, Lógica difusa.

ABSTRACT

The research has as primary purpose optimize the capacity control units compressors gas booster station 1-8, based on hybrid systems and diffuse detection of events; using a set of rules that allow the anticipation of appropriate control actions. The research is descriptive, field and projective. The research design is not experimental, based on system identification techniques of Ljung (1994). The study is divided into 5 phases: collection of data units through the turbocompressors to analyze the behavior of existing control system, mathematical model development process using Laguerre (1879) functions, the identification of the parameters of intonation conventional PID loops, the development of

continuous and discrete dynamic system and design of hybrid control scheme based on fuzzy reasoning through the Matlab tool, 7.6.0 version and later was simulated and analyzed the behavior of both strategies. Was finally observed, the advantages of the intelligent system proposed regulatory actions on speed turbine compressor units at Station Booster R1-8, which show features high operational functionality.

Keywords: Capacity control, Turbocompressor units, Fuzzy logic.

INTRODUCCIÓN

Efectuar el desarrollo de técnicas de control inteligente para mejorar las dificultades asociadas a la automatización de sistemas dinámicos complejos, representa uno de los principales objetivos en la industria petrolera, PDVSA (2009). Usualmente esta necesidad está relacionada a la presencia de fenómenos no lineales, que afectan el desempeño de los controladores básicos presentes en la industria.

En el distrito Lago Sur de PDVSA, se encuentra la Estación Reforzadora 1-8 (Rosales, 1995), esta planta fue creada en 1993 y está constituida por dos paquetes turbocompresores Solar, los cuales se encuentran en paralelo y comparten la succión y descarga de la planta; cada paquete presenta una capacidad nominal de 30 MMPCED. Dentro de los sistemas de control operativos en la estación reforzadora se encuentra el control automático de capacidad, diseñado para monitorear y ajustar la velocidad de las turbinas en función a los cambios de la presión de succión, de esta manera mejorar el desempeño de los compresores. No obstante, ante la presencia de perturbaciones no conocidas o parcialmente conocidas el sistema de control clásico no realiza eficazmente las acciones que requiere la estación, ocasionando la paralización de una o ambas unidades.

El personal de ingeniería de planta, es el encargado de registrar los paros generados por fallas del proceso en la Reforzadora 1-8. Las estadísticas de los paros correspondiente al periodo enero-agosto del año 2010, determinaron que la baja presión de succión, representa la 2da causa de paro, con un 37% correspondiente a un promedio de 69,36 horas fuera de servicio (TFS), esto es producto de acciones a destiempo del control de capacidad, originado por variaciones bruscas en la presión de succión (variable de entrada del controlador).

De continuar esta situación se estima que el tiempo fuera de servicio anual de cada unidad sería de 104,24 horas, generando una pérdida de flujo de 130,3 MMPC, además minimizaría el tiempo de vida útil de los equipos y elementos de la planta y continuaría la condición de operación riesgosa.

En tal sentido y sobre la base de lo planteado, la presente investigación pretende evaluar el comportamiento del sistema de control de capacidad de la Planta Reforzadora 1-8, por considerarla una de las problemáticas de mayor interés en esta área operacional. Este estudio propone el desarrollo de un esquema de control basado en sistemas y detección difusa de eventos, estructurada en dos niveles: un nivel de control supervisorio y un nivel de control regulatorio.

El nivel supervisorio contiene una representación del proceso basada en dominios de operación y transiciones entre ellos, Chacón y otros (1996). El detector difuso de eventos sintetiza las relaciones complejas entre las variables y los eventos que pueden generarse en el proceso, es un modelo lingüístico que evalúa el comportamiento del proceso y el desempeño del sistema de control regulatorio, a través del monitoreo de las variables del proceso.

Esta información es transmitida al autómatas en términos de eventos discretos, el autómatas o supervisor es un modelo matemático sintetizado, utiliza la información de las variables del proceso continuo para producir respuestas, creando patrones de control discretos que serán decodificados por un traductor y enviadas al sistema regulatorio en patrones de control continuo (Set Points) donde se generan las acciones directas de control que se aplican al proceso a través de los controladores básicos, Chacón y otros (1996). Este esquema facilita la toma de decisiones relacionadas con acciones de control (ajuste de consignas de controladores básicos).

El objetivo general de esta investigación fue optimizar el control de capacidad de las unidades compresoras de gas estación Reforzadora 1-8, basada en sistemas híbridos y detección difusa de eventos. En consecuencia, se definieron los objetivos específicos siguientes: analizar el comportamiento del sistema de control existente, para cada dominio de operación. Obtener el modelo matemático asociado al proceso de control de capacidad. Identificar los parámetros utilizados en las técnicas de entonación de los lazos PID convencionales. Diseñar el esquema de control difuso para el objeto de estudio. Comparar el desempeño del control lógico difuso con respecto al sistema PID convencional.

Dentro de los criterios que conllevaron esta investigación se encuentra principalmente el aspecto de seguridad, la condición actual de la reforzadora afecta los equipos y elementos mecánicos que conforman la planta, producto de la pérdida del gas a la atmosfera, cambios drásticos de presión en las líneas y paralización de las unidades turbocompresoras; problemas que generan situaciones de riesgo operacional.

A nivel económico, el esquema de control propuesto genera un ahorro sustancial a la empresa en lo que respecta a las diferidas por paralización de las operaciones y gastos por mantenimientos correctivos. A nivel práctico, establece estrategias de control más eficientes sobre los procesos de la planta compresora; manteniendo los parámetros que caracterizan la eficiencia del sistema dentro de especificación. Permitirá mantener el buen funcionamiento de las turbomaquinarias y aumentar el tiempo de operación sin interrupción del proceso. A nivel metodológico, la investigación crea una metodología para la elaboración de modelos matemáticos, identificación de parámetros de entonación de controladores clásicos y diseño de sistemas híbridos basados en lógica difusa.

RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

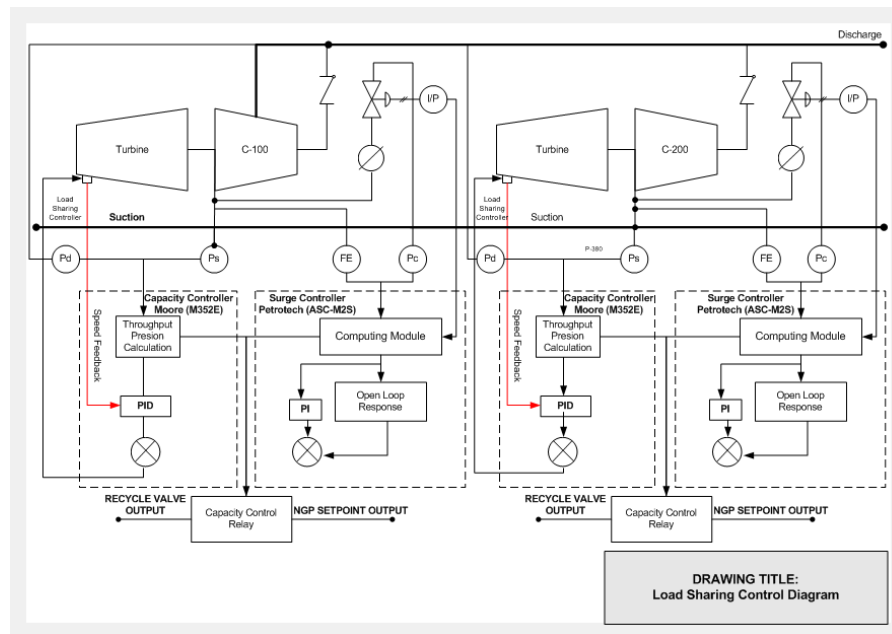
A continuación se presenta paso a paso el desarrollo de esta investigación, estructurada en cinco (5) fases:

Fase 1. Analizar el comportamiento del sistema de control existente, para cada dominio de operación

Durante esta fase se efectúa la recopilación documental que describe la filosofía de operación del sistema de control de capacidad (ver figura 1) y lista de señales de variables involucradas.

Para Rosales (1995), el control de capacidad para esta planta compresora, está diseñado para efectuar una combinación de regulación de velocidad y reciclo. Este sistema monitorea la succión de la estación y envía una señal de control para ajustar la velocidad de la turbina (para todas las turbinas operativas en esta estación), bajar o subir, según el comportamiento de la presión de succión de la estación. Si la velocidad de la turbina es disminuida hasta el mínimo y la presión de succión esta aún más abajo del punto de ajuste (set-point), entonces el controlador abrirá la válvula de reciclo de la estación, recirculando el gas a la entrada de la estación hasta que la presión de succión alcance el set-point.

Figura 1. Diagrama proceso de control de capacidad (R1-8)



Fuente: Kirk y Donald (1989).

Estas unidades regularmente operan con una temperatura de succión de 80-90 °F, y una presión de 40 PSIG. Cada turbocompresor está diseñado para comprimir 30-35 MMPCED de gas natural, generando un incremento de presión de 40 PSIG a 210 PSIG. Cada unidad presenta 238 variables, encargadas de monitorear y controlar el sistema, Solar Turbines Incorporated (1991); sin embargo, para efectuar los modelados matemáticos de las dos unidades turbocompresores se seleccionaron las variables

controladas y manipuladas que influyen directamente en los algoritmos de control PID presentes en el sistema de Control de Capacidad existente (Tabla 1).

Tabla 1. Variables manipuladas/controladas

VARIABLES	DESCRIPCIÓN	UNIDAD
Controladas	Control de velocidad de la turbina unidad 1	%
	Control de velocidad de la turbina unidad 2	%
Manipulada	Presión de succión de la unidad R1-8	PSIG

Fuente: elaboración propia.

Por un período de 2 horas, se efectuaron las pruebas al sistema control de capacidad del equipo Moore M352E existente en la Reforzadora R1-8. Las pruebas consistieron en variar la presión de succión de la Estación Reforzadora 1-8 dentro del rango de los valores de operación mínimo y máximo 30 PSIG – 60 PSIG, a fin de observar la influencia de esta en el comportamiento del sistema capacity control presente en cada unidad de compresión (U1 y U2).

La obtención de la data se realizó a través de la Interfaz Humano Maquina (IHM) ubicada en el cuarto de control local de la Estación Reforzadora R1-8. El software instalado en este equipo es RSView 32, versión 6.4, está configurado para efectuar el escaneo de la data en un intervalo de tiempo de 6 segundos. La información fue exportada a un formato .csv y posteriormente importada al Workspace de Matlab.

Para la obtención de los modelados matemáticos requeridos, se aplicaron las técnicas de identificación de Sistemas propuestas por Ljung (1994). Se inició el tratamiento de la data seleccionada; la variable de entrada representada por la Presión de Succión de la Estación Reforzadora R1-8 (U) y las variables de salida por la velocidad de la Turbina de la Unidad 1 (Y1) y Unidad 2 (Y2), se estudiaron en sus unidades de trabajo (Tabla 2).

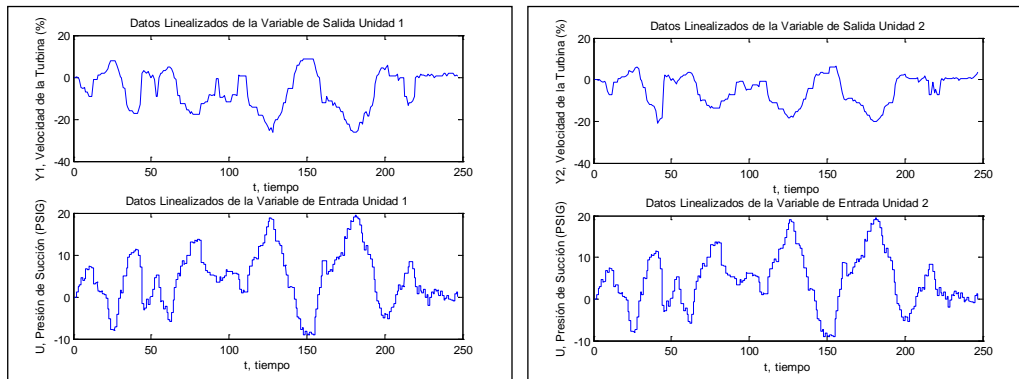
Tabla 2. Variables de estudio entrada/salida

DESCRIPCIÓN	UNIT	NOMENCLATURA MATLAB
Presión de succión unidad 2	PSIG	U
Velocidad de la turbina (ngp) unidad 1	%	Y1
Velocidad de la turbina (ngp) unidad 2	%	Y2

Fuente: elaboración propia.

Una vez seleccionada la data objeto de estudio, fue necesario verificar si los datos recogidos en ambas unidades turbocompresoras proporcionaban toda la información posible sobre el sistema. La señal de entrada debe contener el mayor número de frecuencias posibles, motivo por el cual se analizó el espectro de frecuencia de la data para determinar si contenía información suficiente para desarrollar el modelado matemático. Posteriormente se linealizaron los datos reales; es decir el primer dato de ambas variables comienza desde cero, luego se graficaron de nuevo los datos (Ver figura 2) para la verificación de las instrucciones.

Figura 2. Datos reales linealizados, presión de succión U/Velocidad turbina Y1/Y2.



Fuente: elaboración propia.

Fase 2. Obtener el modelo matemático asociado al proceso de control de capacidad

Una vez seleccionada, verificada y linealizada la data, se procede a crear los modelos matemáticos; para ello se implementó el método de las funciones de Laguerre (1879), utilizando la herramienta Simulink de Matlab Versión 7.6.0. Este método resultó conveniente por la capacidad de seguimiento del sistema ante la presencia de diversas dinámicas, lineales y no lineales; la complejidad del sistema se observó además en el orden de los modelos matemáticos obtenidos, debido a que se no se logró obtener la identificación del proceso con modelos sencillos de primer o segundo orden.

a. Procedimientos para la simulación del proceso y selección del modelo matemático.

Se efectúa el siguiente análisis a fin de verificar si el modelo obtenido se ajusta al comportamiento de la planta:

- Graficar y comparar la señal real de salida (variable dependiente) con la señal simulada (la obtenida a través de la simulación del modelo matemático). Aplicar el criterio de la suma de los errores al cuadrado.
- Realizar el análisis de frecuencia y verificar la similitud de las gráficas de espectros de frecuencia de la salida real y estimada.
- Efectuar un análisis de los residuos de los modelos anteriores para determinar la validez del número de parámetros escogidos. Además, realizar el estudio mediante la representación de polos y ceros de los diferentes modelos y de las desviaciones estándar de sus parámetros.

- Indicar finalmente, cuáles son los valores definitivos de los parámetros factor de escala de tiempo (T_a) y las ganancias del modelo matemático a través del principio de mínimos cuadrados.

b. Aplicación de las funciones de Laguerre (1879).

En esta sección se implementó el procedimiento para la identificación de los modelos matemáticos del sistema de control de capacidad para las Unidades U1 y U2 correspondiente a la Reforzadora R1-8, basándose en las ecuaciones correspondientes a las funciones de Laguerre (1879). Se generaron los siguientes programas en Matlab:

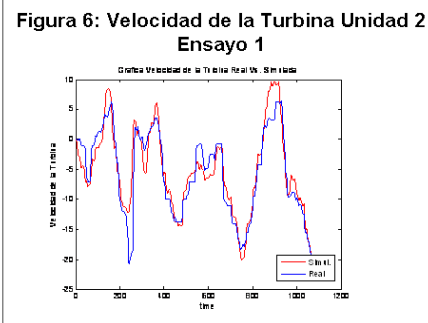
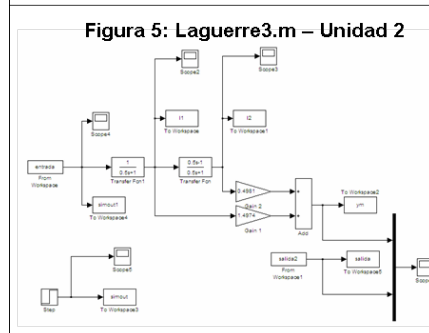
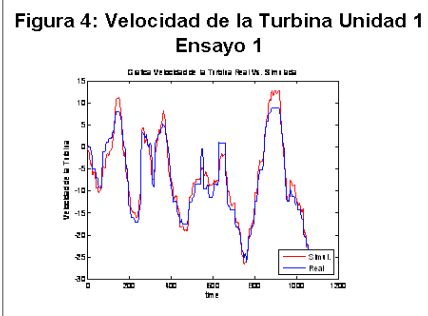
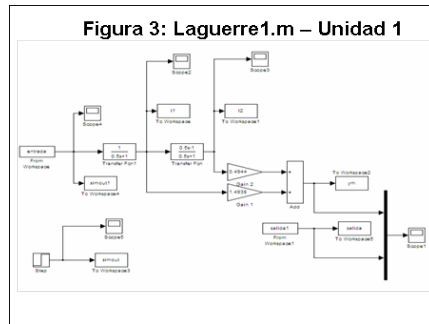
- `datosreales.m`: presenta instrucciones para cargar las variables reales del sistema.
- `ganancia1.m` y `ganancia2.m`: para determinar las ganancias del modelo matemático de 2do y tercer orden, aplicando el principio de mínimos cuadrados.
- Bloques `Laguerre1.mdl`, `Laguerre2.Mdl`, `Laguerre3.mdl`, `Laguerre4.Mdl`: con la finalidad de simular los modelos y seleccionar el mejor comportamiento de la señal descrita, tomando en cuenta el orden del polinomio.
- `graficar.m`: a fin de simular la señal real de salida vs. la señal simulada. Además se tabula la suma de las discrepancias entre la salida del sistema y la salida del modelo para diferentes instantes de tiempo, para obtener el %error del modelo de Laguerre (1994).
- `residuos.m`: con el objetivo de establecer si existe una correlación entre la variable de entrada vs. salida.

c. Resultados de simulaciones del proceso

A continuación se muestran cada una de las pruebas efectuadas para la creación del modelo matemático de las unidades turbocompresores 1 y 2, siguiendo los criterios anteriormente explicados:

Ensayo 1 – Unidades 1 y 2

La identificación de este sistema se realizó a través de 2 filtros de Laguerre (1879), aplicado a cada unidad turbocompresora, variando el valor del factor de escala de Tiempo (T_a) desde 0.05 hasta 30, para cada una de las salidas del sistema hasta obtener la mejor solución, se efectuaron 20 simulaciones.



Fuente: elaboración propia.

Los resultados de la figura 4 y figura 6, presentan un error de salida pequeño, muestran cómo la señal simulada sigue el comportamiento dinámico del proceso, con un valor de $T_a=0.5$. Posteriormente, se efectuó la verificación de los modelos diseñados a fin de determinar si cumplían con los criterios requeridos para obtener el modelo matemático del proceso:

1) Análisis de frecuencia: se observó en la gráfica de la amplitud el comportamiento de la señal simulada, la cual arrojó gran porcentaje de semejanza con respecto a la señal real. En la gráfica de la fase, el modelo presenta un comportamiento diferente en altas frecuencias, ya que hay un momento donde la señal simulada no sigue a la señal real.

2) Lugar geométrico de las raíces: se plantean las ecuaciones que contienen todas las constantes obtenidas de la simulación:

Unidad 1	$k_0 = 1.4974$ $k_1 = 0.4981$
Unidad 2	$k_0 = 1.4938$ $k_1 = 0.4944$

$$y_m = \left(k_0 \frac{1}{(T_a s + 1)} + k_1 \frac{1}{(T_a s + 1)} \frac{(T_a s - 1)}{(T_a s + 1)} \right) * U_1$$

Se resuelve la ecuación y una vez efectuadas las operaciones se obtienen las funciones de transferencia de los procesos correspondiente a las Unidades 1 y 2.

Unidad 1	$\frac{ym}{U1} = \frac{s+1}{0.25s^2 + s + 1}$
Unidad 2	$\frac{ym}{U1} = \frac{0.9s + 0.9}{0.25s^2 + s + 1}$

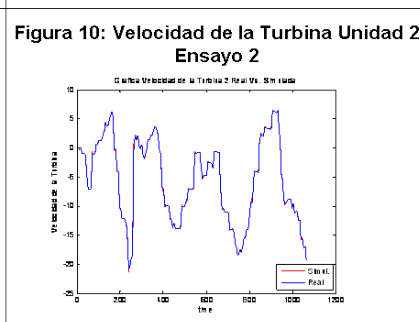
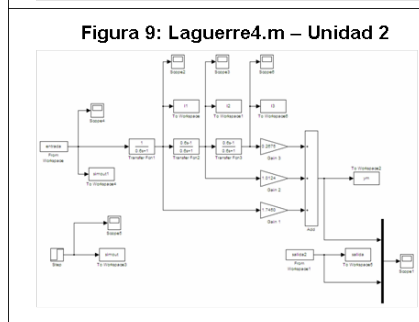
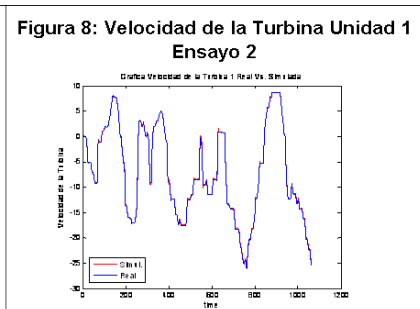
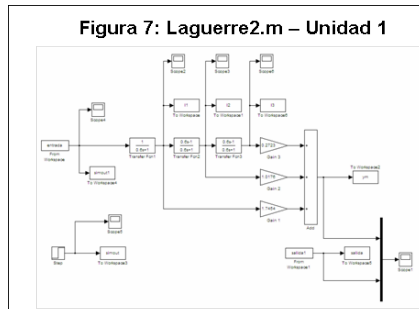
Se realizó la verificación de la no cancelación de polos y ceros. El sistema es estable porque los valores correspondientes a cada función de transferencia se encuentran en el semiplano izquierdo.

3) Análisis residual: el 95% de la señal se encuentra dentro de los límites de la función de correlación residual, es decir, del intervalo de confianza. Sin embargo, se apreciaron picos que sobrepasan los límites de tolerancia lo que es indicativo de que un porcentaje de los residuos de la salida no guarda relación con los puntos generados en la entrada. Razón por la cual se hizo necesaria la búsqueda de un nuevo modelado matemático.

Ensayo 2 – Unidades 1 y 2

La identificación de este sistema se realizó a través de tres filtros de Laguerre (1879), variando el valor el factor de escala de Tiempo (T_a) desde 0.05 hasta 30, para cada una de las salidas del sistema hasta obtener la mejor solución, se efectuaron 20 simulaciones. Procedimiento aplicado a cada unidad turbocompresora.

En la figura 8 y figura 10, se aprecia un error de salida muy pequeño, lo que representa un excelente ajuste de la señal simulada con respecto a la señal real, es por ello que se seleccionó para efectuar el respectivo ensayo, este resultado se obtuvo con un valor de $T_a=0.6$.



Fuente: elaboración propia.

Posteriormente, se efectuó la verificación de los modelos diseñados de acuerdo a los siguientes procedimientos:

1) Análisis de frecuencia: la señal simulada arrojó gran porcentaje de semejanza con respecto a la señal real. Las gráficas, al igual que en las simulaciones del ensayo 1, presentan pequeños picos de la señal real, producto del Filtro FIR de las funciones de Laguerre (1879). Sin embargo, se puede concluir que el comportamiento del modelo en el análisis de la frecuencia es bueno.

2) Lugar geométrico de las raíces: se plantean las ecuaciones que contienen todas las constantes obtenidas de la simulación:

Unidad 1	$k_0 = 1.0438$
	$k_1 = -0.3708$
	$k_2 = -0.4229$
Unidad 2	$k_0 = 1.0431$
	$k_1 = -0.3890$
	$k_2 = -0.4319$

$$ym = \left(k_0 \frac{1}{(T_a s + 1)} + k_1 \frac{1}{(T_a s + 1)} \frac{(T_a s - 1)}{(T_a s + 1)} + k_2 \frac{1}{(T_a s + 1)} \frac{(T_a s - 1)^2}{(T_a s + 1)^2} \right) * U_1$$

Se resuelve la ecuación y una vez efectuadas las operaciones se obtienen las funciones de transferencia de los procesos correspondiente a las unidades 1 y 2.



Unidad 1	$\frac{ym}{U1} = \frac{0.09s^2 + 1.76s + 1}{0.22s^3 + 1.08s^2 + 1.8s + 1}$
Unidad 2	$\frac{ym}{U1} = \frac{0.08s^2 + 1.77s + 1}{0.22s^3 + 1.08s^2 + 1.8s + 1}$

Se realizó la verificación de la no cancelación de polos y ceros. El sistema es estable porque los valores correspondientes a cada función de transferencia se encuentran en el semiplano izquierdo.

3) Análisis residual: se observó correlación entre los residuales y las entradas al proceso. Los modelos presentaron una buena actuación, debido a que los residuos penetraron rápido en el margen de confianza y después se mantuvieron dentro de este.

El ensayo 2 generó resultados favorables, razón por la cual se seleccionaron estos modelos por suministrar la mejor identificación de la dinámica del proceso y el menor error de salida.

El último paso consistió en determinar si el modelo obtenido para cada unidad, satisface el grado de exactitud requerido para la aplicación en cuestión. Para la validación del modelo fue necesaria la recolección de una nueva data, tanto para la señal de entrada como para la de salida, esos datos fueron introducidos en el modelo seleccionado, aplicando nuevamente los métodos de identificación anteriores para comparar los resultados obtenidos.

De esta manera se validó la señal real vs. la simulada, análisis de frecuencia, lugar de las raíces, análisis residual y se evaluó la respuesta escalón al modelo seleccionado, arrojando resultados satisfactorios. Por tanto, después de todas las pruebas de validación realizadas, se concluyó que los modelos seleccionados presentan la mejor representación matemática del proceso de control de capacidad de las unidades 1 y 2.

Fase 3. Identificar los parámetros utilizados en las técnicas de entonación de los lazos PID convencionales

El primer paso para el diseño del sistema de control, fue la identificación del sistema, para cada dominio de operación. Los controladores que conforman la plataforma regulatoria son los PID clásicos, por lo tanto es importante identificar los parámetros de entonamiento de los diferentes controladores responsables de la estabilidad de todo el sistema regulatorio.

a. Desarrollo del control de los lazos proporcional-integral-derivativo.

El desarrollo de los controladores PID se realizó utilizando los métodos de sintonía empíricos más conocidos. El objetivo es por tanto, seleccionar un controlador para el

proceso que sea capaz de seguir a la entrada de referencia y rechazar perturbaciones. A continuación se indican los métodos de lazo abierto seleccionados:

Tabla 3. Métodos de sintonización PID

Método	Kp	Ti	Td
Ajuste Ziegler – Nichols	$1.2 \frac{T}{KL}$	$2L$	$0.5L$
Chien-Hrones-Reswick	$0.6 \frac{T}{KL}$	T	$0.5L$
Cohen - Coon	$\frac{T}{KL} * \left(\frac{4}{3} + \frac{L}{4T} \right)$	$\frac{L * (32T + 6L)}{(13T + 8L)}$	$\frac{(4TL)}{(11T + 2L)}$
López, Miller, Smith y Murril	$a \left(\frac{L}{T} \right)^b$	$\frac{T}{c} \left(\frac{L}{T} \right)^{-d}$	$eT \left(\frac{L}{T} \right)^f$
Kaya y Sheib	$a \left(\frac{L}{T} \right)^b$	$\frac{T}{c} \left(\frac{L}{T} \right)^{-d}$	$eT \left(\frac{L}{T} \right)^f$
Sung, O, Lee, Lee y Yi	$-0.67 + 0.297 \left(\frac{L}{T} \right)^{-2.001} + 2.189 \left(\frac{L}{T} \right)^{-0.766} \zeta$	$2.212 \left(\frac{L}{T} \right)^{0.520} - 0.3$	$\frac{T}{A}$
$A = -1.9 + 1.576 \left(\frac{L}{T} \right)^{-0.530} + \left[1 - \text{EXP} \left(-0.15 + 0.939 \left(\frac{L}{T} \right)^{-1.121} \right) \right] \left[1.45 + 0.969 \left(\frac{L}{T} \right)^{-1.171} \right]$			

Fuente: Astrom (1995).

Fórmula del controlador:

$$G_c(S) = K_p + \frac{K_i}{S} + S * K_d \quad \begin{matrix} K_i = \frac{K_p}{T_i} \\ K_d = K_p * T_d \end{matrix}$$

Las siguientes ecuaciones representan el comportamiento del sistema regulatorio:

$$V_{T1} = \left(\frac{0.09s^2 + 1.76s + 1}{0.22s^3 + 1.08s^2 + 1.8s + 1} \right) * P_s$$

$$V_{T2} = \left(\frac{0.08s^2 + 1.77s + 1}{0.22s^3 + 1.08s^2 + 1.8s + 1} \right) * P_s$$

Estas técnicas de simulación fueron evaluadas mediante la simulación digital, programa desarrollado a través de la herramienta Matlab (Fichero: PIDla.m). De esta manera se obtienen las curvas de reacción de las dos unidades turbocompresores de la Reforzadora R1-8. Los parámetros de los controladores PID se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Resultados parámetros controlador PID

Método	Unidad Turbocompresora	Función de Transferencia	Kp	Ti	Td	Ki	Kd
Ziegler-Nichols	Unidad 1	$V_{T1} = \left(\frac{0.09s^2 + 1.76s + 1}{0.22s^3 + 1.08s^2 + 1.8s + 1} \right) * P_s$	12,697	0,147	0,011	86,196	0,140
Chien-Hrones-Reswick			6,348	0,144	0,037	44,245	0,234
Coen-Coon			8,768	0,110	0,026	79,626	0,231
Sung et al.			11,243	0,206	0,050	54,708	0,560
López-IAE			12,602	0,152	0,026	83,099	0,324
López-ITAE			12,670	0,162	0,028	78,074	0,360
López-ISE			13,893	0,115	0,041	121,005	0,565
Kaya-IAE			12,393	0,168	0,074	73,659	0,922
Kaya-ITAE			9,243	0,154	0,066	60,017	0,612
Kaya-ISE			8,232	0,142	0,050	58,093	0,411
Ziegler-Nichols			Unidad 2	$V_{T2} = \left(\frac{0.08s^2 + 1.77s + 1}{0.22s^3 + 1.08s^2 + 1.8s + 1} \right) * P_s$	11,773	0,158	0,012
Chien-Hrones-Reswick	5,886	0,153			0,040	38,481	0,232
Coen-Coon	8,149	0,118			0,028	69,159	0,230
Sung et al.	10,033	0,223			0,052	45,046	0,520
López-IAE	11,754	0,160			0,028	73,671	0,327
López-ITAE	11,795	0,171			0,030	69,138	0,359
López-ISE	12,936	0,121			0,044	106,905	0,564
Kaya-IAE	11,581	0,180			0,079	64,411	0,916
Kaya-ITAE	8,575	0,154			0,070	55,684	0,599
Kaya-ISE	7,596	0,146			0,054	51,879	0,408

Fuente: elaboración propia.

b. Criterios de Desempeño.

Evaluar el desempeño dinámico de los sistemas de control y obtener el método de sintonización más adecuado, se efectuó con base a los siguientes criterios de desempeño y robustez, establecidos para determinar la bondad de métodos de sintonización de controladores PID que operan como reguladores (Alfaro, 2002):

Error máximo: porcentaje de error máximo (PEM) dado por: $PEM = 100 * y(\max)$

Tiempo de asentamiento (Ta_2): tiempo requerido por el sistema para que el error entre en una banda del $\pm 2\%$ del valor deseado: $Ta_2 = ta |y(t) - r(t)| \leq 0.02$. (Tabla 5).

Robustez: para observar el comportamiento del sistema ante la naturaleza no lineal intrínseca del proceso, se aplica una perturbación en la entrada aumentando está en un 10%.

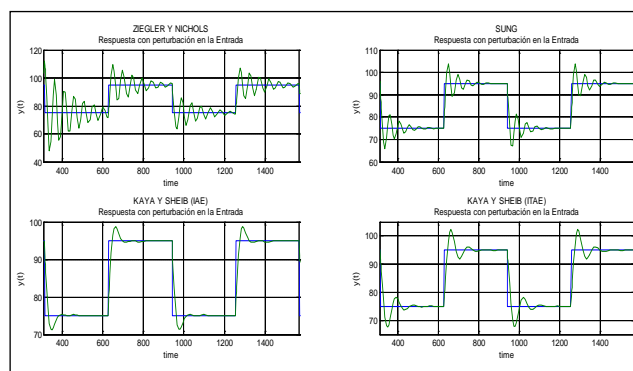
Tabla 5. Índices de desempeño

Método	Unidad Turbocompresora	PEM	Ta2	
Ziegler-Nichols	Unidad 1	30,00	145,00	
Chien-Hrones-Reswick		46,00	308,00	
Coen-Coon		54,00	348,00	
Sung et al.		18,00	125,00	
López-IAE		37,40	239,00	
López-ITAE		39,80	245,00	
López-ISE		41,00	259,00	
Kaya-IAE		24,00	149,00	
Kaya-ITAE		32,00	175,00	
Kaya-ISE		42,00	275,00	
Ziegler-Nichols		Unidad 2	36,00	149,00
Chien-Hrones-Reswick			48,00	367,00
Coen-Coon	56,00		372,00	
Sung et al.	19,00		131,00	
López-IAE	37,00		235,00	
López-ITAE	40,40		249,00	
López-ISE	42,60		273,00	
Kaya-IAE	32,00		153,00	
Kaya-ITAE	34,00		183,00	
Kaya-ISE	44,20		279,00	

Fuente: elaboración propia.

Considerando cada criterio en forma individual, se observa que el menor porcentaje de error máximo (PEM) y el menor tiempo de asentamiento (Ta2), se aprecia en los métodos de Sung y otros (1996), Kaya-Sheib (1988) y Ziegler-Nichols (1942). Partiendo de un valor nominal de operación con las ganancias ya ajustadas se seleccionan los métodos de sintonización que presentaron un mejor desempeño, a fin de aplicar una perturbación en la entrada del sistema, aumentando en un 10%. Este procedimiento permitió seleccionar el sistema de control con una operación estable ante cambios en los parámetros de la planta (Figura 11).

Figura 11. Respuesta del sistema con perturbación en la entrada



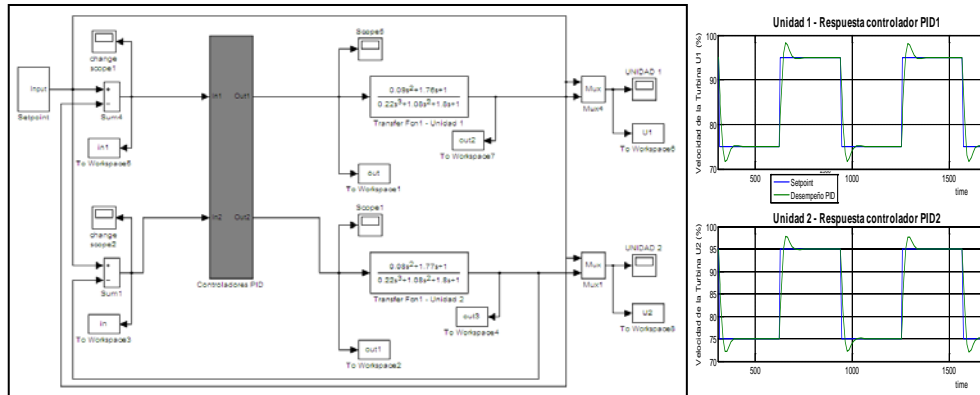
Fuente: elaboración propia.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Las curvas de respuesta correspondiente a los métodos de Kaya-Sheib (1988), figura 11, muestran claramente que el sistema de control conserva una operación estable ante cambios en los parámetros de la planta; requisito que no cumple los métodos

anteriormente indicados. Por consiguiente, se seleccionó el método de Kaya (AIE), por presentar menor porcentaje de error máximo (PEM), menor tiempo de asentamiento (Ta2) y mayor robustez. El diagrama de bloques con los sistemas de control PID ya sintonizados se aprecia en la Figura 12.

Figura 12. Diagrama de bloques del proceso – sistema de control PID



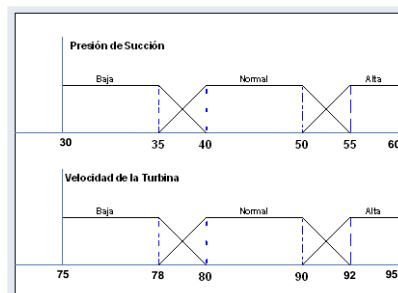
Fuente: elaboración propia.

Una vez realizado el diseño del controlador PID, se realiza el desarrollo del controlador con lógica difusa, para su posterior comparación.

Fase 4. Diseñar esquema de control supervisorio para el objeto de estudio.

El objetivo de control es mantener los parámetros que caracterizan la eficiencia del sistema de control de capacidad dentro de unos rangos específicos. Estos parámetros son considerados los mejores indicadores para caracterizar los eventos del proceso. De acuerdo a la documentación de filosofía de operación del sistema de control de capacidad, al conocimiento de los expertos del proceso y a la identificación dinámica correspondiente, las funciones de membresía apropiadas para estos parámetros se ilustran en la Figura 13.

Figura 13. Funciones de membresía, control de capacidad



Fuente: elaboración propia.

Las acciones del sistema de control de capacidad (Subir/Bajar Velocidad) dependerá de los posibles eventos asociados a la Entrada del Sistema (Presión de Succión de la Estación). Estos eventos fueron agrupados en tres grupos α , β y ϵ , de acuerdo al tipo de acción de control que debe ser aplicada y al dominio de operación correspondiente. Si un tipo α u β ocurre, se deben efectuar cambios en los puntos de ajuste de los controladores básicos, de lo contrario si un evento tipo ϵ ocurre ningún cambio debe ser efectuado. La Tabla 6 muestra la base del razonamiento difuso asociada a la detección de eventos.

Tabla 6. Base de razonamiento difuso para la detección de eventos

Presión de Succión (Ps)	Baja	Normal	Alta
Baja	β	α	α
Normal	β	ϵ	α
Alta	β	β	α

Fuente: elaboración propia.

DEFINICIÓN DEL SISTEMA HÍBRIDO

El sistema híbrido para el sistema de control de capacidad fue definido de la siguiente manera:

1) Dinámica continua Φ^1 : dada por las ecuaciones que representan el comportamiento de las variables de operación del sistema: presión de succión P_s , velocidad de la turbina unidad 1 V_{T1} y velocidad de la turbina unidad 2 V_{T2} .

2) Dinámica discreta: corresponde a los puntos de ajustes para la velocidad de la turbina unidad 1 y unidad 2. Las regiones generadas por la evolución de las diferentes variables, determinan los dominios de operación. Cada dominio tiene asociado un valor de referencia para cada punto de ajuste.

Velocidad U1 (Aceleración/Desaceleración/Sobrevelocidad)= V_{T1}

Velocidad U2 (Aceleración/Desaceleración/Sobrevelocidad)= V_{T2}

Los valores de referencia están ajustados a las siguientes restricciones:

$$80\% < V_{T1} < 90\%$$

$$80\% < V_{T2} < 90\%$$

Cada dominio de operación tiene asociado diferentes subdominios que representan las subregiones que definen el conjunto de valores que puedan tomar las variables discretas en una vecindad del dominio de referencia. Por tanto existen tres posibles valores por variable en cada dominio.

$$\tilde{V}_{T1} = s_a, s_b, s_c; \tilde{V}_{T2} = s_d, s_d, s_e$$

Donde:

$$s_a = \tilde{V}_{T1} - \Delta\tilde{V}_{T1}, s_b = \tilde{V}_{T1}, s_c = \tilde{V}_{T1} + \Delta\tilde{V}_{T1}$$

$$s_d = \tilde{V}_{T2} - \Delta\tilde{V}_{T2}, s_b = \tilde{V}_{T2}, s_c = \tilde{V}_{T2} + \Delta\tilde{V}_{T2}$$

$$\Delta\tilde{V}_{T1} = 5\%, \Delta\tilde{V}_{T2} = 5\%$$

3) Semigrupo de acción sobre $X^2 : S^2$. Está estructurado por todos los elementos finitos de las cadenas en X^2 (espacio de estados discretos). Ver Tabla 7.

$$S^2 = s_a s_e, s_a s_f, s_b s_d, s_b s_e, s_b s_f, s_c s_d, s_c s_e, s_c s_f, s_a s_d$$

La figura 14, presenta las transiciones del autómata para mejorar la eficiencia del sistema de control de capacidad. La evolución en tiempo discreto presenta la integración de las entidades, utilizando el modelo del autómata híbrido.

$$H = \{X^2, F, E, X^2\}$$

X^2 = Nodo Origen, set finito de eventos asociados con H.

F= Región de operación.

E= Eventos registrados.

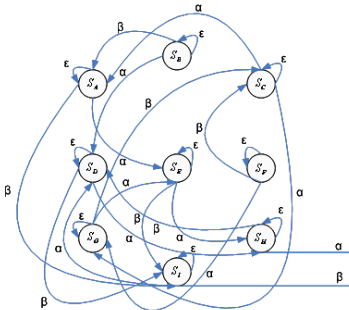
X^{2l} = Nodo Destino.

El dominio de Φ^2 es: $\text{Dom}(\Phi^2) = \{S_A\} \cup \{S_B\} \cup \{S_C\} \cup \{S_D\} \cup \{S_E\} \cup \{S_F\}$
 $\cup \{S_G\} \cup \{S_H\} \cup \{S_I\} \times \tilde{S} \subset X^2 \times S^2$

Tabla 7: Estados del Autómata

Biqueta de Estado	Tripleta de puntos de Ajuste
S_A	s_a, s_e
S_B	s_a, s_f
S_C	s_b, s_d
S_D	s_b, s_e
S_E	s_b, s_f
S_F	s_c, s_d
S_G	s_c, s_e
S_H	s_c, s_f
S_I	s_d, s_d

Figura 14: Autómata Control de Capacidad



Fuente: elaboración propia.

Esta representación de las funciones de transición del Autómata, se denotan de la siguiente manera $f : X \times E \rightarrow X$:

$$f(S_A, \alpha) = S_E, f(S_A, \epsilon) = S_A, f(S_A, \beta) = S_C,$$

$$f(S_B, \alpha) = S_D, f(S_B, \epsilon) = S_B, f(S_B, \beta) = S_A,$$

$$f(S_C, \alpha) = S_G, f(S_C, \epsilon) = S_C, f(S_C, \beta) = S_A,$$

$$f(S_D, \alpha) = S_H, f(S_D, \epsilon) = S_D, f(S_D, \beta) = S_I,$$

$$f(S_E, \alpha) = S_H, f(S_E, \epsilon) = S_E, f(S_E, \beta) = S_I,$$

$$f(S_F, \alpha) = S_G, f(S_F, \epsilon) = S_F, f(S_F, \beta) = S_C,$$

$$f(S_G, \alpha) = S_E, f(S_G, \epsilon) = S_G, f(S_G, \beta) = S_C,$$

$$f(S_H, \alpha) = \text{Cambio de Dominio}, f(S_H, \epsilon) = S_H, f(S_H, \beta) = S_D,$$

$$f(S_I, \alpha) = S_D, f(S_I, \epsilon) = S_I, f(S_I, \beta) = \text{Cambio de dominio}.$$

El subdominio correspondiente a los nodos:

$f(S_H, \alpha) = \text{Cambio de dominio}$. En este caso se generan mensajes de alarma a los operadores indicando sobrevelocidad producto del incremento excesivo de la presión de succión, en esta fase comienza a operar el controlador AntiSurge.

$f(S_1, \beta)$ = Cambio de dominio. La disminución de la presión de succión hasta llegar a su punto crítico genera la apertura de la válvula de reciclo general, a fin de tratar de compensar y estabilizar el sistema.

DESARROLLO DEL CONTROLADOR CON LÓGICA DIFUSA

Finalmente, se procedió a diseñar un controlador basado en lógica difusa, Zadeh (1973). El objetivo de este sistema de control inteligente propuesto es tomar decisiones apropiadas sobre los controladores básicos, de tal manera que los parámetros que caracterizan la eficiencia del sistema sean automáticamente mantenidos dentro de especificación. Se realizó utilizando la herramienta Matlab Versión 7.6.0, software Fuzzy Logic Toolbox Versión 2.2 y se estructuró de la siguiente forma:

a. Identificación de las variables de operación.

Estructurado por siete (07) variables de entrada y dos (02) variables de salida.

Variables de entrada:

- Presión de Succión R1-8(Ps), variable monitoreada. Velocidad de la turbina es controlada de acuerdo al comportamiento de la presión de succión de la estación.
- Error velocidad de la turbina VT1 (Error_VT1): es el error entre el valor deseado (VT1_Setpoint) y la salida del sistema.
- Variación del error velocidad de la turbina VT1 (dError_VT1).
- Acumulación del error velocidad de la turbina VT1 (iError_VT1).
- Error velocidad de la turbina VT2 (Error_VT2): es el error entre el valor deseado (VT2_Setpoint) y la salida del sistema.
- Variación del error velocidad de la turbina VT2 (dError_VT2).
- Acumulación del error velocidad de la turbina VT2 (iError_VT2).

Variables de salida:

- Variador de Velocidad VT1 y VT2

b. Funciones de membresía.

Presión de succión (Ps): está descrita por 3 funciones de pertenencia: Alta Presión (PA), Normal Presión (PN) y Baja Presión (PB), figura 15.

Funciones de membresía error VT1 y VT2: el setpoint de la velocidad de la turbina en las unidades 1 y 2 de la estación R1-8, corresponde al 85% del valor máximo. Estos parámetros se representan de manera porcentual, es decir:

$$VT1_{sp} = VT2_{sp} = 85\%$$

Definiendo:

$$|Error| = VT1_M - VT1_{sp} \text{ y } |Error| = VT2_M - VT2_{sp}$$

$VT1_M = VT2_M =$ Valor medido Velocidad de la Turbina.

$VT1_{sp} = VT2_{sp} =$ Valor deseado Velocidad de la Turbina.

A fin de establecer el rango de operación se obtuvo data del comportamiento de la planta, de esta manera se deduce un rango de -20% hasta 20% para ambas unidades turbocompresoras. El error de VT1 y VT2 quedó descrito por 3 funciones de pertenencia: Error negativo (Ne), Error cero (Ze) y Error positivo (Pe), figura 16.

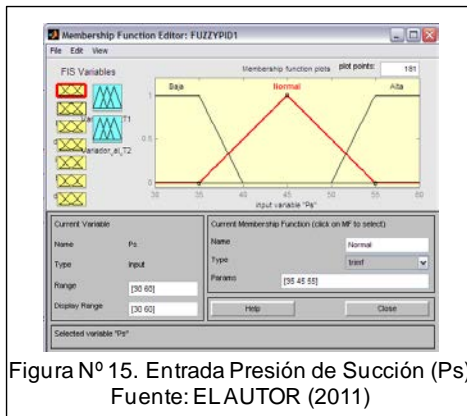


Figura N° 15. Entrada Presión de Succión (Ps)
Fuente: ELAUTOR (2011)

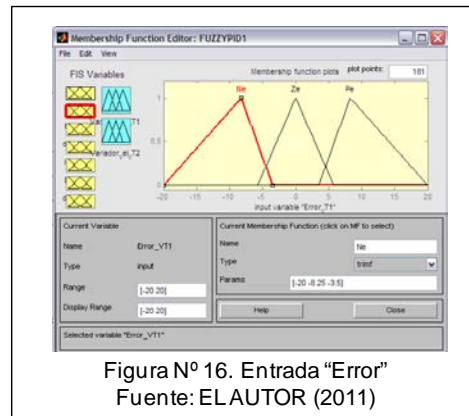


Figura N° 16. Entrada "Error"
Fuente: ELAUTOR (2011)

Funciones de membresía variación del error VT1 y VT2: partiendo de los datos obtenidos en la tabla: medición del error de VT1 y VT2 se construye la tabla de variación del error.

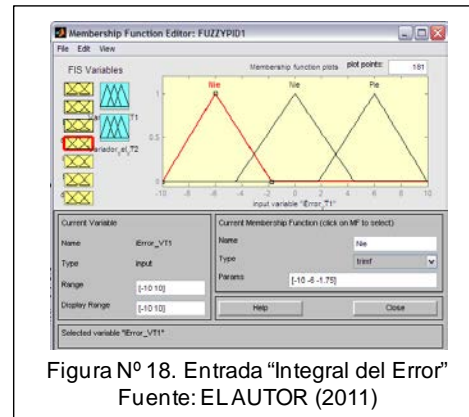
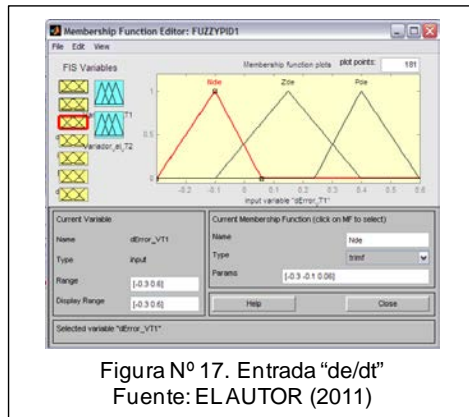
$$\Delta_E = |E_{ACT} - E_{ANT}| \quad \Delta_E = \text{Variación del error en \%}$$

$$E_{ACT} = \text{Error actual en \%} \quad E_{ANT} = \text{Error actual en \%}$$

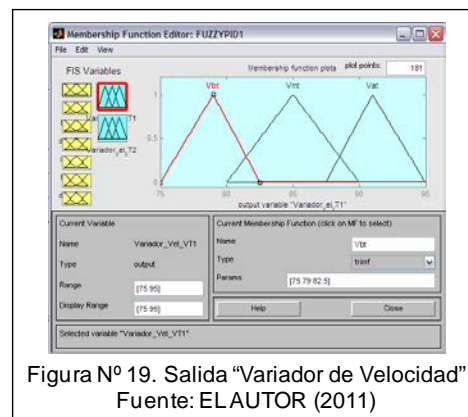
De esta manera se obtiene una variación del error en el rango desde -0.3 % hasta 0.6 % para ambas unidades turbocompresoras. La desviación del error de VT1 y VT2 quedó descrito por 3 funciones de pertenencia: Rate Negativo (Nde), Rate cero (Zde) y Rate positivo (Pde) (figura 17).

Funciones de membresía acumulación del error VT1 y VT2: elimina el error de estado estacionario; fue denominada "acumulación". Su universo está entre -10 y 10, de acuerdo con el comportamiento de la planta. Las funciones de membresía asociadas son:

acumulación negativa (Nie), acumulación cero (Zie) y acumulación positiva (Pie), figura 18.



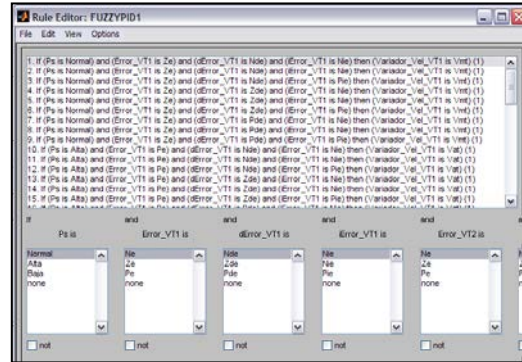
Funciones de Membresía Variador de Velocidad VT1 y VT2: el rango establecido para definir estos parámetros, se tomó en función a los límites de operación de los variadores de velocidad, es decir 0 a 100%. Se diseñaron 3 funciones de membresía asociadas a estos parámetros: Aumenta Velocidad de Turbina (Vat), Velocidad Media de la Turbina (Vmt), Baja Rápido Velocidad de la turbina (Vbt) (figura 19).



c. Reglas de implicación difusa.

Se generan las reglas de transiciones del Autómata Híbrido que se muestran en la figura 14, las cuales describen el comportamiento que debe tomar el sistema de supervisión difuso ante las diferentes situaciones que se puedan presentar. Por consiguiente se procede a asociar los valores de entrada con la salida, donde se plantean las reglas difusas If-Then (Ver figura 20).

Figura 20. Reglas del Control Difuso



Fuente: elaboración propia.

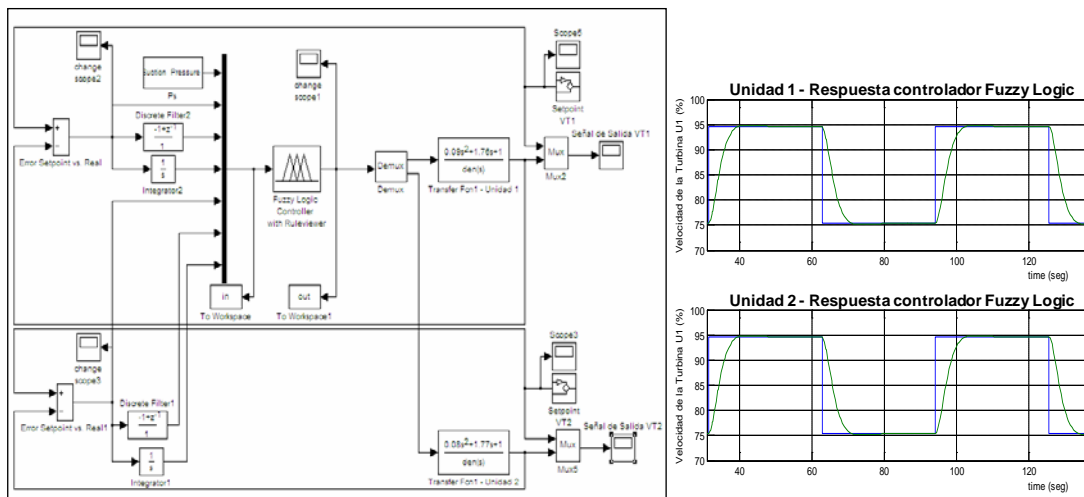
d. Método de defusificación.

Se utilizó la estructura de Mamdani y Assilian (1975), donde la condición resulta cierta si el antecedente es cierto y el consecuente también; obteniendo la salida mediante el método del centroide.

e. Diagrama de bloques del proceso

Una vez diseñado el esquema de control inteligente, se introduce este en el diagrama de bloques de la Figura 21.

Figura 21. Diagrama de bloques control inteligente Fuzzy Logic



Fuente: elaboración propia.

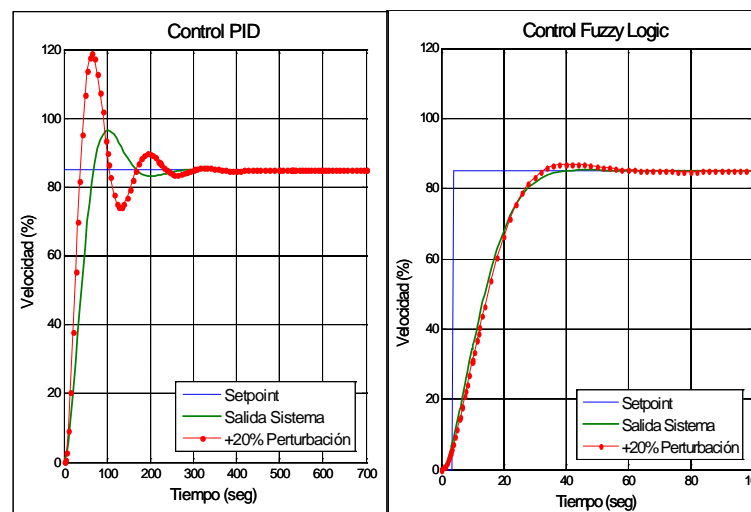
f. Comportamiento del sistema de control propuesto.

El controlador de Lógica Difusa, además de controlar modela la acción del experto a través de las reglas que controlan el proceso, la representación para este caso se observa mediante el comando Surfview, el cual representa las salidas del controlador difuso con respecto a las entradas. La figura 21 muestra el funcionamiento del controlador.

Fase 5. Desempeño del control lógico difuso con respecto al sistema PID convencional.

Luego de la identificación del sistema, el diseño del diagrama de bloques de los controladores PID determinando los parámetros de entonación y el desarrollo de un sistema de control inteligente basado en el estudio de la dinámica continua y discreta del proceso aplicando lógica difusa; se procedió a analizar el comportamiento de los controladores PID y Fuzzy PID. Se aplicó una entrada escalón y una perturbación de un 20% a la entrada de ambos sistemas.

Figura 22. Respuesta del proceso – Sistemas PID Vs. Fuzzy PID



Fuente: elaboración propia.

Como se puede apreciar en la figura 22, el control PID presenta un sobrepico de un 11,2%, el cual tiende a incrementarse al aplicarle una perturbación en la entrada del sistema, lo que demuestra la sensibilidad del regulador frente a alteraciones o perturbaciones de los parámetros del modelo. Además presenta un tiempo de asentamiento de 245 segundos, mostrando comportamientos bruscos en el proceso de entonación.

El modelo del sistema Fuzzy PID muestra una respuesta satisfactoria ante la perturbación, esta es rápidamente compensada por la acción de las reglas de control difuso establecidas para cada dominio de operación. Otra de las ventajas es el tiempo de estabilización, el cual tiende a ser más corto (38 segundos), con un su posicionamiento suave, rápido y amortiguado. Este desempeño hace posible que la conducta del sistema

tienda hacia un ciclo límite deseado y reduzca la sensibilidad a cambios bruscos del sistema, evitando que la curva de entonación sea pronunciada. Todas estas características hacen que el sistema del control propuesto tenga una funcionalidad operativa elevada.

CONCLUSIONES

Este estudio ha evaluado el comportamiento del sistema de control de capacidad existente en la Estación Reforzadora R1-8. Se identificaron como variables críticas del sistema la Presión de Succión de la Estación, identificada como variable manipulada y la velocidad de la turbinas de las Unidades Compresoras, consideradas como variables controladas.

El método de identificación mediante funciones de Laguerre (1879) resultó bastante conveniente por la capacidad de seguimiento del sistema ante la presencia de diversas dinámicas, lineales y no lineales. A través de este identificador se obtienen las funciones de transferencia de tercer orden, por presentar la mejor identificación de la dinámica del proceso y el menor error de salida. Las pruebas de validación generaron resultados satisfactorios con un registro dentro de los parámetros aceptables.

La determinación y el diseño del sistema de control de capacidad actual se realizó a través de un diagrama de bloques, utilizando la herramienta de Matlab, a través del cual se desarrolló un programa para obtener los parámetros de entonación del PID a lazo abierto, aplicando métodos de sintonización que operan como reguladores. Se seleccionó el método de Kaya por ser el más robusto.

El esquema de control Fuzzy PID propuesto, contempla en sus entradas las variables del error, derivada e integral del error condiciones que representan el control PID básico, pero además está basado en un detector de eventos difusos, que incorpora el conocimiento de expertos en el proceso a través de funciones de membresía y reglas difusas que permiten la anticipación de acciones apropiadas de control y establecer límites exactos de operación de las variables involucradas, a fin de mejorar el comportamiento del sistema de control de capacidad y por ende la eficiencia del sistema de control de capacidad.

Finalmente, se aprecia la funcionalidad operativa del sistema propuesto con respecto al sistema actual, se observaron las mejoras al proceso que incorpora el sistema Fuzzy PID. Presentó un tiempo de asentamiento relativamente corto (38 seg), posicionamiento suave, sin sobrepicos y mayor robustez ante la presencia de perturbaciones, condiciones que permiten mejorar las acciones de regulación de velocidad de las turbinas en las unidades turbocompresores de la Estación Reforzadora R1-8.

RECOMENDACIONES

Se sugiere obtener la adquisición de muestras de data de las variables del proceso a través de sistemas de supervisión local. Este monitoreo realizado desde la sala de control

de la planta, permitirá reducir los tiempos de escaneo y obtener datos que ofrezcan mayor información del proceso.

Previo a la implantación de esta alternativa tecnológica, se recomienda sustituir el Equipo Moore M352E, controlador de capacidad instalado actualmente por un PLC (Controlador Lógico Programable) Control Logix. Este hardware cuenta con un módulo difuso, lo que facilitará el proceso de migración del programa existente y la adición de los algoritmos de control que se han desarrollado “basado en el razonamiento difuso”.

Una vez implantado este sistema de control inteligente, se sugiere realizar continuamente una evaluación del desempeño de las variables asociadas al proceso. Estadísticas que servirán para garantizar la funcionalidad operativa del sistema de control inteligente y servirá de antecedente para su implantación en otras instalaciones de PDVSA con características similares.

Dejar la investigación abierta a nuevos estudios, tecnología que mejore el proceso de otros sistemas híbridos complejos, caracterizados por diferentes condiciones de operación y usualmente sujetos a perturbaciones externas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alfaro, V. (2002). Métodos de sintonización de controladores PID que operan como reguladores. *Revista de Ingeniería*, Vol. 12, No 1, Pp. 21-36.
- Astrom, K. (1995). *PID controllers: theory, desing and tuning*. USA. Research Triangle Park.
- Chacón, E.; Szigeti, F. y Camacho, O. (1996). Integral automation of industrial complexes based on hybrid systems. *ISA Transactions*, Vol. 35, Núm. 4, Pp. 305-319.
- Kaya, A. y Sheib, T. (1988). Tuning of PID controllers of different structures. *Control Engineering*, Vol. 7, Pp. 62 – 65.
- Kirk, R. y Donald, G. (1989). Design criteria for improved stability of centrifugal compressors. USA. ASME Publication.
- Laguerre, E. (1879). The Laguerre polynomials. *Bulletin de la Société Mathématique de France*, Vol. 7, Pp. 72-81.
- Ljung, L. (1994). *Modeling of dynamic systems*. USA. Prentice Hall, Inc.
- Mamdani, E. & Assilian, S. (1975). An experiment with in linguistic synthesis with a Fuzzy Logic Controller. *Man-Machine Studies*, Vol. 7, Pp. 1-13.
- Petróleos de Venezuela S.A. (2009). PDVSA E y P Occidente aplica nuevas tecnologías de producción. *Revista Planes Estratégicos PDVSA*, Vol.2; Pp. 4.

- Rosales, R. (1995). Planta compresora de gas BoostGas. Asociación Turbinas/Jansa Boostgas, Vol. 1 y 4.
- Solar Turbines Incorporated (1991). Manual de operaciones. Turbomaquinaria Solar, Vol. 1, Pp. 10-30.
- Sung, S.; Lee, I.; Lee J. and Yi, S. (1996). Automatic tuning of PID controller using Second-Order plus time delay model. Journal of Chemical Engineering of Japan, Vol. 29, No. 6, Pp. 990 – 999.
- Zadeh, L. (1973). Outline of a new approach to the analysis of a complex system and decision processes, IEEE Transactions on Industrial Electronics, SMC, Vol. 3, Pp. 28.
- Ziegler, J. and Nichols, N. (1942). Optimum settings for automatic controls. ASME transactions, Vol. 64, Pp. 759-768.