

UN ALGORITMO GENÉTICO PARA SINTONIZACIÓN DE UNA ESTRUCTURA DE CONTROL MPC (DMC) APLICADO A UNA PLANTA DE PRESIÓN

Jhon Alexander Ramírez Urrego¹

¹Ingeniero en Instrumentación y Control. Profesional del área de Ambiente Físico y Medio Ambiente del E.S.E. Hospital Manuel Uribe Ángel, Diagonal 31 36ª sur 80, Envigado-Colombia.
Correo electrónico: abc195@hotmail.com.

RESUMEN

Se presenta en este artículo el desarrollo de un algoritmo genético AG para la sintonización de una estrategia de control predictiva conocida como control matricial dinámico (DMC) aplicado a un prototipo de planta de presión, el algoritmo genético permitirá encontrar los mejores parámetros de acuerdo a la minimización de índices de desempeño. Se muestra además la superioridad del DMC frente a técnicas convencionales como el control PI por modelo interno (IMC), las ventajas son determinadas a partir de índices de desempeño obtenidos con la implementación de ambos controladores sobre el sistema, se exponen las ventajas de trabajar con las técnicas evolutivas y entre estas los AG para la sintonización de sistemas de control que carecen de un estudio profundo de la influencia de los parámetros de sintonización sobre sus respuestas.

Palabras clave: Algoritmo Genético, Control Matricial Dinámico, Individuo, Población, Sintonización.

Recibido: 14 de mayo de 2015.
Received: May 14th, 2015.

Aceptado: 23 de junio de 2015.
Accepted: June 23rd, 2015.

GENETIC ALGORITHM FOR A TUNING CONTROL STRUCTURE MPC (DMC) APPLIED TO A PRESSURE PLAN

ABSTRACT

The development of genetic algorithm AG for tuning predictive control strategy known as Dynamic Matrix Control (DMC) to a prototype pressure plant is presented, the genetic algorithm to find the best parameters according to the minimizing performance indices. The superiority of DMC compared with conventional techniques such as PI internal model control (IMC) is also shown, the benefits are determined from performance indexes obtained with the implementation of both controllers in the system. The benefits of working with the evolutionary techniques and between the AG for tuning control systems that lack a thorough study of the influence of the tuning parameters on their responses are discussed.

Keywords: Genetic Algorithm, Dynamic Matrix Control, Individual, Population, Tuning.

1. INTRODUCCIÓN

El control predictivo basado en modelos MPC gana en la actualidad gran importancia en la industria a nivel de los procesos y poco a poco reemplaza las clásicas estrategias de tipo PID. La predicción en los sistemas permite determinar una acción que logra anticipar el comportamiento deseado de la salida en busca de optimizarla a partir de un modelo que describe la dinámica del sistema. Las estructuras del MPC como el DMC, IDCOM (*identification Command*, por sus siglas en inglés) y GPC (control predictivo generalizado) son las más populares y usadas en la industria, sin embargo su sintonía requiere de varios parámetros que carecen de un estudio profundo para calcularlos y al final, se usan métodos heurísticos o algunas ecuaciones que no siempre generan los parámetros para obtener el comportamiento deseado.

En el artículo, se desarrolla un algoritmo genético que permitirá obtener los parámetros de sintonía de un control DMC. El artículo, se compone de las siguientes etapas: se describe la planta de prueba y su modelo matemático, se diseña un controlador DMC para la planta a partir de sintonización experimental y variando los parámetros de sintonía para observar diferentes respuestas en la salida del controlador, en la tercera se establecen las bases teóricas de los algoritmos genéticos y su uso en la ingeniería de control con el fin de aplicar este tipo de algoritmo en la sintonización del DMC, el artículo finaliza con la implementación del controlador DMC sintonizado con algoritmos genéticos y un controlador PI convencional del tipo IMC sobre la planta de presión, se comparan sus desempeños mediante métricas como el trabajo de variable manipulada y criterios de error.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para implementar los controladores diseñados se utilizó una planta de presión, a continuación se presenta su descripción y el modelo matemático obtenido a partir de la identificación del sistema.

2.1 Prototipo planta de presión.

El sistema usado cuenta con mini dispositivos que permiten medir la presión en un tanque de almacenamiento, la presión final depende de la velocidad del motor que contiene la bomba neumática, para esto, el prototipo cuenta con la electrónica e instrumentación para su regulación,

indicación, adquisición de datos, acondicionamiento, control y supervisión del proceso. El prototipo, se dividió en sistemas para su descripción, a continuación se exponen cada uno de ellos:

Sistema electrónicos y de adquisición de datos: el prototipo cuenta con un sistema de adquisición de datos de bajo costo, comercial y de características industriales como lo es la conocida plataforma Arduino y en ella la tarjeta Arduino Uno. Esta tarjeta es de fácil manejo, fuente abierta y drivers con descarga libre para ser usados en LabView®.

La tarjeta de adquisición en el prototipo, es la encargada de recibir la señal del sensor de presión en un rango de (0V - 5V) y enviar las señales a los circuitos de potencia para el control del compresor por modulación de ancho de pulso y de dos electroválvulas de estados lógicos. En este sistema, también se encuentra la electrónica encargada del suministro de corriente DC por medio de una fuente de voltaje, igualmente, se dispone de dos tarjetas con el driver de corriente L298N para el control del compresor y de las válvulas solenoides; su señal de activación es recibida desde las salidas PWM y digitales de la tarjeta de adquisición de datos, finalmente el sistema cuenta con una unidad de visualización donde se muestra la presión medida en el tanque de almacenamiento.

Sistema de Medición e Instrumentación: la medición de la presión en el tanque final de almacenamiento, se realiza por medio de un sensor fabricado por *Freescale* el cual entrega una salida que es proporcional al cambio de la presión ejercida, su señal es enviada a la tarjeta de adquisición de datos para lectura y acondicionamiento para ser traducida en LabView® a un lenguaje entendible por el usuario, en este caso en porcentaje. Un compresor de corriente directa es el encargado de suministrar aire al tanque principal y de almacenamiento, las salidas presurizadas contienen filtros de humedad para eliminar posibles condensados; además se cuenta con válvulas antirretorno para direccionar el fluido.

Las perturbaciones son eventos que afectan negativamente los procesos, su posible modelado permite en algunas estrategias de control su tratamiento para ser compensadas y medir la robustez del controlador. El sistema cuenta con una perturbación diseñada a partir de una válvula

solenoides usada para activar una salida constante acompañada por una obstrucción que simula una posible pérdida de presión en el sistema.

El almacenamiento está compuesto por un tanque final donde se mide y se controla la presión del fluido comprimido, el aire de entrada a este tanque, es el de salida del sistema de distribución que contiene obstrucciones y filtros para provocar retardos de transporte. La figura 1 muestra el prototipo de presión con los nombres de cada dispositivo, el sistema se caracteriza por ser compacto y con estructura sólida que facilita su movilidad, en la actualidad es usado para implementación y exploración de técnicas avanzadas y estrategias combinadas en el diseño de estructuras de control e identificación [1].

2.2 Modelación del prototipo de planta de presión. La obtención de un modelo representativo, a partir de la identificación de sistemas, permite adquirir una función que adicional al modelo, facilita el análisis de estabilidad, digitalización, diseño de compensadores y ajuste de controladores. Un modelo que se utiliza comúnmente en el control de sistemas, está representado finalmente como una función de transferencia simple que describe la dinámica de procesos industriales.

Uno de los modelos obtenidos a partir de la identificación, y como función de transferencia, está definido como una aproximación a un sistema de Primer Orden más Retardo (POR) caracterizado por tres parámetros: ganancia, constante de tiempo y tiempo de retardo [2], [3].

Para llevar a cabo la identificación de la planta de presión, se utilizó la curva de reacción, método no paramétrico que aplica el análisis transitorio y utiliza como modelo el correspondiente a la respuesta del sistema ante una entrada escalón [4].

Identificación del punto de operación: se eligió el punto de operación (20%-30%) de la señal escalón, el controlador fue llevado a modo manual y luego de estar en régimen estable para una entrada del 20% se aplicó un incremento del 10% almacenando la respuesta de salida, el procedimiento anterior se realizó hasta obtener tres bases de datos las cuales fueron llevadas a Matlab® para ser identificadas mediante la *toolbox IDENT*, los modelos obtenidos para cada base de datos y como una aproximación POR fueron promediados obteniendo un modelo equivalente como se muestra en la tabla 1. La validación del modelo promedio y la respuesta real para el punto de operación se muestran en la Fig.2.

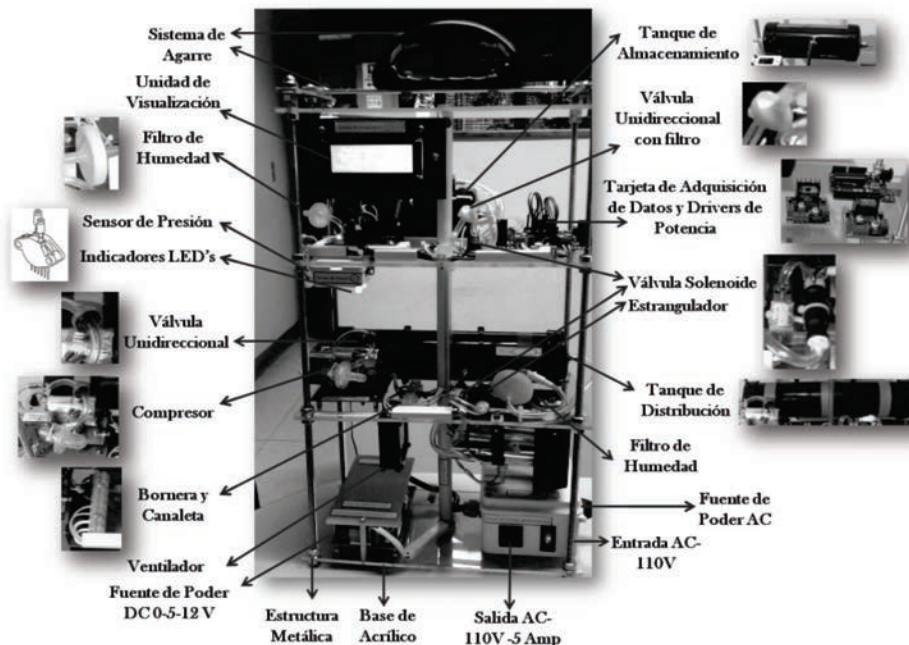


Figura 1 Prototipo planta de presión.

Tabla 1. Modelos obtenidos para cada base de datos y modelo promedio.

Punto de Operación-Escalón del (20%-30%)	
Base de Datos	Modelos POR
1	$G(s) = \frac{1.1619e^{-2.0495s}}{20.885s + 1}$
2	$G(s) = \frac{1.1184e^{-2.2317s}}{19.1058s + 1}$
3	$G(s) = \frac{1.1215e^{-2.0834s}}{21.2918s + 1}$
Modelo Promedio	$G(s) = \frac{1.1339e^{-2.1215s}}{20.4275s + 1}$

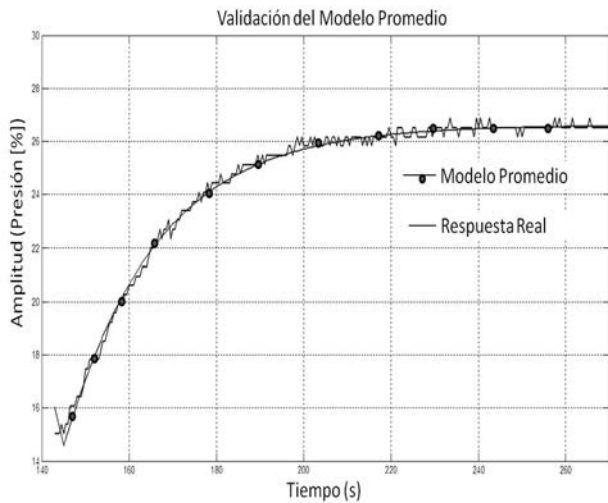


Figura 2. Validación del modelo promedio.

2.3 Diseño de un controlador dmc para la planta de presión usando sintonización experimental.

Entre las estrategias del control MPC se encuentra el control DMC, estructura conocida por hacer uso de la superposición y de la respuesta al escalón para modelar el sistema y pronosticar el comportamiento futuro de las variables controladas del proceso. La diferencia entre las demás estrategias predictivas, es que el DMC almacena en un arreglo denominado matriz dinámica la respuesta del sistema ante el estímulo escalón. La matriz dinámica es usada para efectuar la predicción, sus dimensiones dependen de la cantidad de movimientos requeridos para llevar a

cabo la acción de control y del tamaño de la muestras usadas en el diseño, el número de muestras dependerá del periodo usado para la captura de datos sobre la respuesta ante la señal escalón [5] [6].

En general el DMC usa un modelo de respuesta al escalón y una ley de control con una función objetivo que busca minimizar el error cuadrático y el cuadrado del cambio en la acción de control tratando de llevar lo más cerca posible el proceso a la trayectoria deseada. La expresión general para esta ley de control es:

$$\frac{\partial J}{\partial \Delta U} = 2G^T \alpha (G \Delta U - D) + 2\lambda \Delta U = 0 \tag{1}$$

$$\Delta U = (G^T \alpha G + \lambda)^{-1} G^T \alpha D \tag{2}$$

$$\Delta U = M * D \tag{3}$$

$$M = (G^T \alpha G + \lambda)^{-1} G^T \alpha \tag{4}$$

Donde:

J: Función de Coste.

G: Matriz Dinámica.

D: Diferencia entre la referencia y la predicción.

α : Factor móvil del DMC, (factor de supresión).

λ : Factor móvil del DMC, (factor de ponderación).

ΔU : Vector de acciones de control.

M: Matriz auxiliar usada para calcular la acción de control.

La ley de control calculada corresponde a un arreglo matricial, donde en realidad su última posición es la que se aplica al proceso en el instante de muestreo presente, para una próxima ejecución la ley se actualiza a un nuevo valor debido a los posibles cambios en la trayectoria de referencia o a los errores en la predicción. La sintonización de un control DMC implica la selección de parámetros como el número de muestras, factor de supresión, factor de ponderación, horizonte de control, horizonte de predicción y tiempo de muestreo. En la actualidad existen ecuaciones matemáticas para obtener algunos de estos parámetros, sin embargo el estudio sobre su influencia en el proceso carece de profundidad, es por esto que el DMC ha sido denominado como una estrategia abierta y heurística, la elección de los parámetros para su sintonía encierra una amplia diversidad de respuestas y posibilidades que desencadenarían respuestas eficientes, deseadas o inestables. [7] [8] [9].

El modelo de la planta de presión obtenido es usado para construir la matriz dinámica, se definen parámetros de sintonización iniciales (periodo de muestreo; $T = 4 s$), (factor de supresión; $\alpha = 1$), (factor de ponderación; $\lambda = 1$), (horizonte de control; $HC = 7$), y (numero de muestras; $\#M = 25$), usando Matlab® se diseña el algoritmo variando los parámetros de sintonización de forma experimental con el fin de obtener un conocimiento previo de dicha la estrategia de control, de sus respuestas y de su comportamiento al modificar sus parámetros.

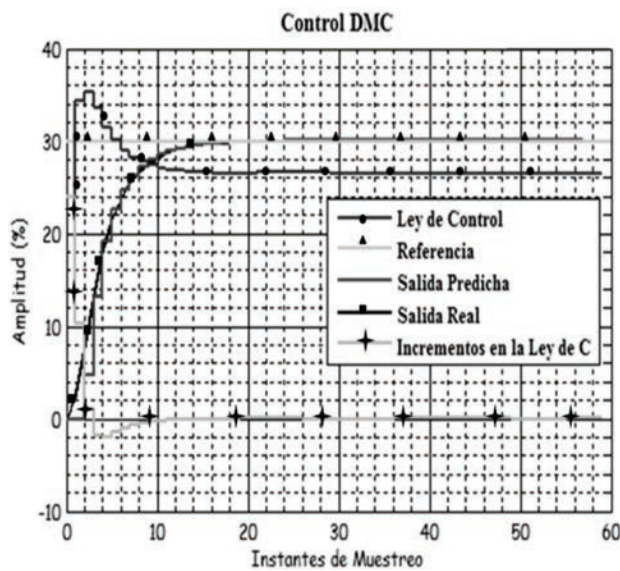


Figura 3 DMC, caso estable

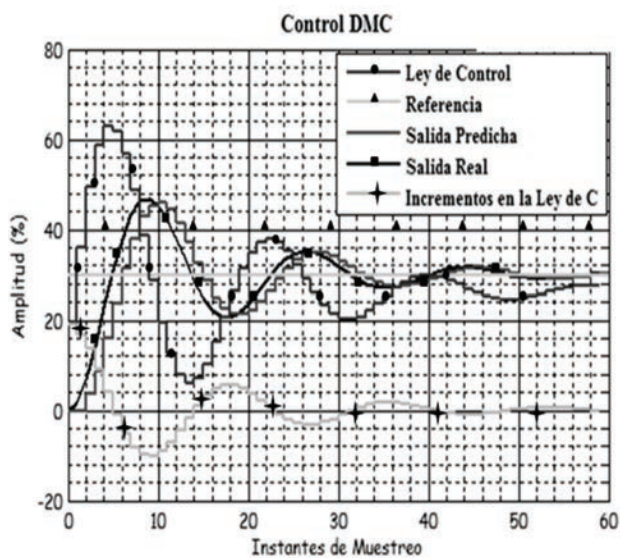


Figura 4 DMC, caso estable con oscilación

En las figuras 3 y 4 respectivamente se muestran dos de los controladores diseñados. En la figura 3 se muestra el DMC con los parámetros de sintonización iniciales, las respuestas obtenidas para esta sintonización indican un sistema estable, salida sin sobreimpulso y una señal de control que no supera el 50%, esto podría indicar eficiencia energética del controlador asociado al trabajo de la variable manipulada en el proceso.

En la figura 4 el controlador se sintonizó con $T = 4 s, \alpha = 1, \lambda = 1, HC = 4, \#M = 2$ se observa el ejemplo oscilatorio no sostenido, el controlador logra estabilizar el sistema y llevarlo a la trayectoria deseada. Las pocas muestras usadas para el diseño no fueron las suficientes como para contener la dinámica del proceso, la ley de control presenta cambios bruscos en las acciones para cada instante de ejecución.

El procedimiento anterior se realizó con el fin de demostrar la capacidad que tiene la estrategia DMC para generar controladores eficientes, respuestas con características de estabilidad, inestabilidad u oscilación, o controladores personalizados para cualquier sistema, sin embargo si no se dispone de alguna alternativa para la sintonización se entraría en una infinidad de posibles soluciones, es probable que el mejor diseño se encuentre inmerso en los pequeños o grandes cambios de algunos de los parámetros, de todos, de uno o de algoritmos en línea que permitan su adaptabilidad para cada instante. La simulación es una buena opción pero de igual manera necesitara de la inserción (n) veces por parte del usuario de los valores y su validación para obtener el comportamiento deseado, es por esto que se proponen técnicas alternativas como la computación evolutiva para la sintonización de un DMC [10].

2.4 Fundamentos de los algoritmos genéticos.

Los Algoritmos Genéticos son una de las técnicas pertenecientes a la computación evolutiva usada como estrategia de búsqueda iterativa basada en la selección natural, aplicando la estructura general de un algoritmo evolutivo en el que la población es su eje fundamental, la cual contiene directa o indirectamente los individuos que convergerán la búsqueda de acuerdo a la mejor adaptación en el proceso de evaluación de aptitud o desempeño. Los Algoritmos Genéticos facilitan la optimización, presentando una solución más flexible en

comparación a la propuesta matemática que traería consigo la búsqueda de máximos o mínimos globales o soluciones únicas en funciones multivariantes o de superficies complejas, por donde se deslizarían los valores a encontrar para satisfacer el problema. Los algoritmos genéticos no buscan modelar la evolución biológica sino derivar estrategias de optimización [11] [12].

Definiciones básicas. A continuación se presentan las definiciones básicas de los algoritmos genéticos:

- **Población:** conjunto de individuos donde cada uno de ellos representan una posible solución para el problema planteado.
- **Cromosoma o Individuo:** cada uno de los especímenes o elementos que forman la población.
- **Generación:** indica las etapas o fases de una técnica de evolución, donde cada una va mejorando con respecto a las anteriores. En general la generación indica el número de iteraciones que realiza el AG.
- **Función de aptitud:** es un tipo especial de función que cuantifica la optimalidad de una solución, representando las características del problema y midiendo el nivel de adaptación del individuo para su solución. Se traduce en un cromosoma o individuo óptimo para que sus bases sean combinadas con cualquier otra técnica para la producción de una nueva generación que sea mejor a las anteriores, de manera que se produzca una evolución en busca de la optimización [8].
- **Reproducción:** copiar un individuo de una población a otra.
- **Operadores genéticos:** conjunto de operaciones implementadas sobre los individuos usados para garantizar la evolución del AG y garantizar su convergencia en nuevos espacios de búsqueda.
- **Método de Selección:** conjunto de algoritmos dedicados a la selección individual para la reproducción acorde con la función de aptitud (valor de la función objetivo). Los algoritmos de selección serán los encargados de escoger qué individuos van a disponer de oportunidades de reproducirse y cuáles no [9].

La figura 5 corresponde a la configuración del AG, en ella se muestra su estructura general para ser desarrollado.

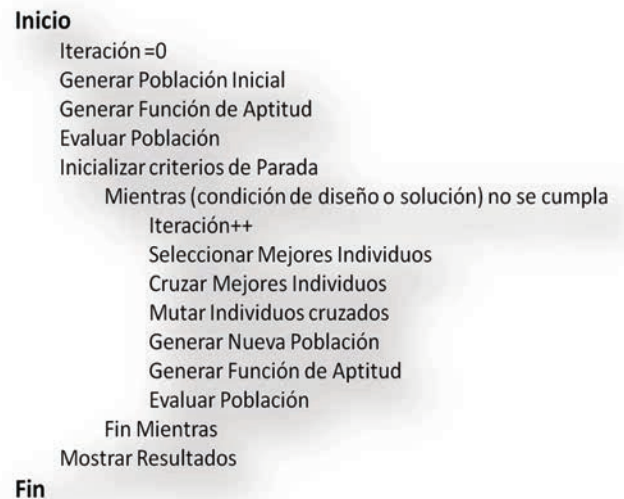


Figura 5 Esquema general de un AG

3. RESULTADOS

El DMC requiere de varios parámetros para su sintonización, entre ellos se encuentran el factor de supresión y el factor de ponderación que actúan directamente sobre la ley de control y sus incrementos, la variación de estos parámetros puede ocasionar controladores rápidos, lentos, oscilantes e inestables con acciones sobre el elemento final de control que involucran en algunos casos alto consumo energético, saturación y efecto timbre. Una de las falencias del DMC es la ausencia de un estudio profundo de la influencia de los parámetros de sintonía con el controlador en sí, para solucionar este problema se desarrolló un algoritmo genético simple en Matlab® para encontrar los valores de los parámetros de sintonización de acuerdo a condiciones deseadas en la salida como error en estado estable nulo, minimización del sobreimpulso y de los índices de desempeño relacionados con el trabajo de la variable manipulada TVM y la integral de error al cuadrado ICE, características que en conjunto fueron utilizadas para diseñar la función de aptitud, construir la función de diseño y evaluar cada individuo de acuerdo a la minimización de los índices mencionados.

El AG simple se desarrolló usando programación mediante funciones y bajo una interfaz grafica de usuario para visualizar su ejecución; entre las funciones se encuentra la estructura general de un

AG combinada con el diseño del DMC para cada individuo.

Inicialmente se programaron las etapas de ejecución única como la respuesta del sistema al escalón, almacenada en un vector de muestras, los objetos gráficos y la inicialización de los demás parámetros de sintonización como el periodo de muestreo, número de muestras y la trayectoria de referencia deseada (escalón del 20%-30%). La población inicial generada de forma aleatoria se evaluó obteniendo la función de aptitud para esta primera etapa, luego se aplicó selección por ruleta, cruce y mutación con su respectiva función de aptitud, la comparación entre la función de aptitud inicial, final, y de cada operador genético fue factor de decisión para aplicar el reemplazo de la población, el AG se programó para finalizar por número de iteraciones entregando los parámetros de sintonización finales y el vector de funciones de diseño para comprobar su evolución.

La función de aptitud se definió a partir de la función de diseño formada por los índices de desempeño a minimizar, la estructura matemática usada se presenta a continuación:

$$F_{dis(i)} = [\text{Error Ymax ICE TVM}] \quad (5)$$

Los índices de desempeño usados en la función de diseño están representados en las siguientes ecuaciones:

$$\text{Error} = R - \text{Presión} \quad (5.1)$$

$$Y_{\max} = \max(\text{Presión}) \quad (5.2)$$

$$\text{ICE} = \sum_{i=0}^k (R - \text{Presión})^2 \quad (5.3)$$

$$\text{TVM} = \sum_{i=0}^k \text{AC} \quad (5.4)$$

Donde:

R: Referencia o Set Point.

Presión: Presión medida.

AC: Acción de control para cada instante de ejecución.

k= Instante hasta donde se calcularon los índices, para ambos controladores DMC y PI IMC.

$$F_{apt(i)} = \sum \text{Elementos}(F_{dis(i)}) \quad (6)$$

$$\text{Mejor}_{indi} = \min(F_{apt}) \quad (7)$$

Donde:

F_{dis(i)}: Función de diseño en forma matricial.

F_{apt}: Función de aptitud de la fila en la posición (i) de la matriz de diseño.

Mejor_{indi}: Mejor individuo correspondiente a la mínima función de aptitud.

La función de aptitud inicial se almacenó en memoria para ser comparada con la función de aptitud (i + 1), esto con el propósito de supervisar y asegurar la evolución del algoritmo.

Para determinar la capacidad que tiene un individuo de reproducirse se aplicó la fórmula:

$$\text{Rul}(i) = \frac{F_{apt(i)}}{\sum F_{apt}} \quad (8)$$

Donde:

Rul(i): Capacidad de reproducción que tiene un individuo por el método de la ruleta.

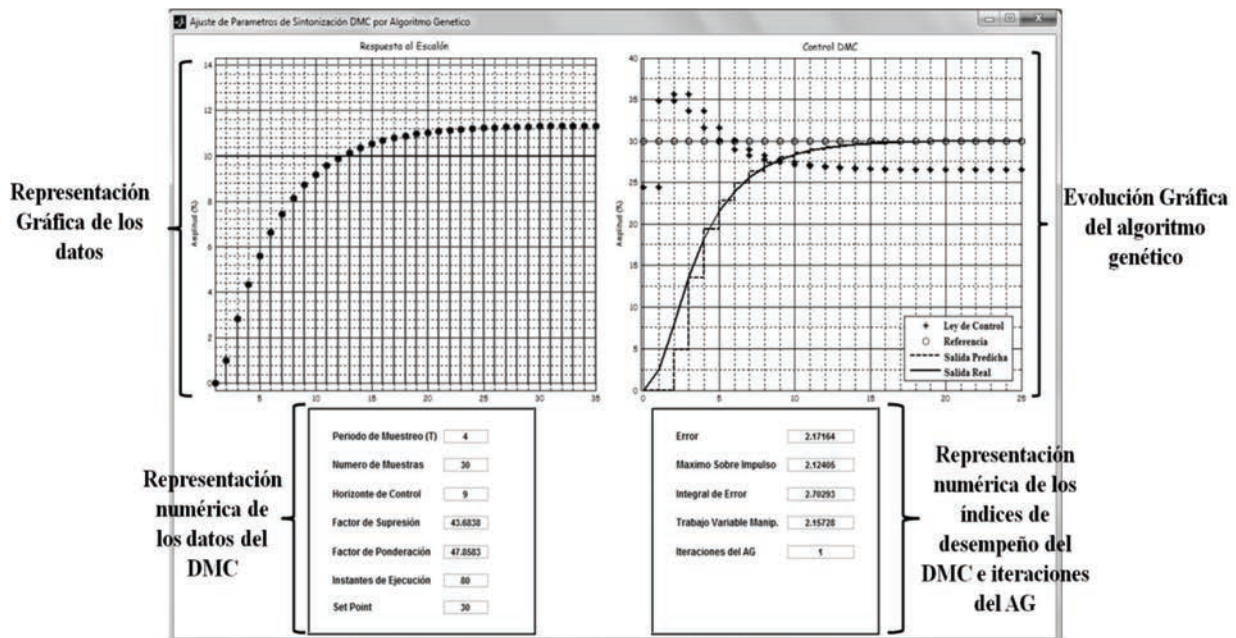


Figura 6 Interfaz gráfica del AG

En la función programada para el cruce se utilizó la media aritmética entre las filas y un último individuo ajustado a partir de los extremos de la población ruleta, como se muestra a continuación:

$$Indi(i) = \frac{f(i) + f(i + 1)}{2} \quad (9)$$

$$Indi(end) = \frac{f(1) + f(end)}{2} \quad (10)$$

Donde:

Indi(i): Individuo en la posición (i) para la nueva población.

f(i): Fila evaluada de la población ruleta.

f(end): Ultimo individuo de la población ruleta.

Indi(end): Ultimo individuo de la población cruzada

Para efectuar la mutación se aplicó aleatoriedad en la población cruzada adicionando propiedades a los individuos a partir de un delta sobre sus columnas, esto permitió la evolución del algoritmo hacia nuevos espacios de búsqueda:

$$\partial = \text{Valores Aleatorios entre 0 y 0.05} \quad (11)$$

$$\partial M = (\partial) * Pc(C(i)) \quad (12)$$

$$PM(C(i)) = Pc(C(i)) + \partial M \quad (13)$$

Donde:

∂ : Delta inicial generado de forma aleatoria entre 0 y 0.05.

∂M : Delta de mutación aplicado a toda la columna elegida de la población cruzada.

PC(C(i)): Columna (i) de la población cruzada.

PM(C(i)): Columna mutada con un ∂M .

La figura 6 corresponde a la interfaz grafica diseñada en Matlab® la cual permite observar la evolución de la búsqueda iterativa con la posibilidad de presentar las graficas del controlador y las variaciones de los parámetros de sintonización con los índices de desempeño calculados para cada iteración.

4. ANÁLISIS

Implementación y comparación de los sistemas de control DMC sintonizado con algoritmos genéticos y controlador pi convencional IMC en la planta real.

Para implementar los controladores se desarrolló una interfaz grafica en el LabView® con dos ventanas disponibles, en una de ellas se implementó el DMC ingresando los parámetros finales de la convergencia del AG, en la segunda ventana se implementó el PI IMC, en ambas se presentaron las respuestas graficas y la representación numérica del error y de la ley de control para cada instante de ejecución.

4.1 Implementación DMC.

Los valores finales obtenidos mediante el AG se observan en la interfaz diseñada para su implementación como se muestra en la figura 7, donde además se exponen las respuestas del controlador implementado como la salida real, la salida predicha y la ley de control. En la grafica de la figura se observa un sistema de control con una ley de control suave, sin saturación, presenta una salida máxima menor al 50% equivalente a un ciclo dureza del mismo valor, lo que indica minimización del trabajo sobre el compresor, luego, el voltaje aplicado cae a un valor promedio constante, sin oscilaciones bruscas ni efecto timbre.

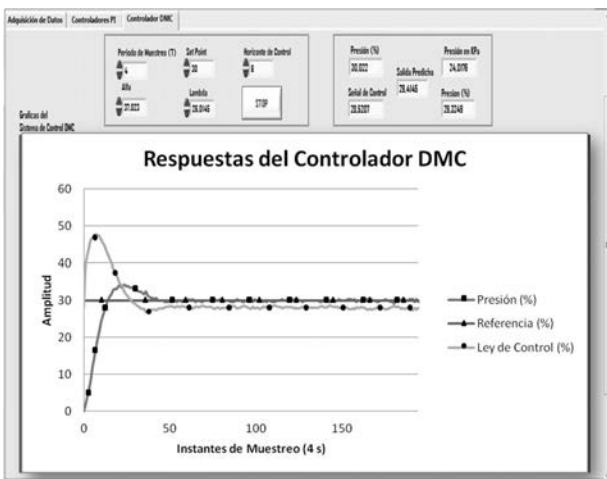


Figura 7 Implementación del DMC sobre el prototipo de planta de presión

4.2 Implementación PI IMC.

La mayoría de estrategias PID hacen uso de un modelo para obtener la ley de control, uno de estos métodos incorporan dentro del controlador un modelo del proceso. Este tipo de control es conocido como control con modelo interno o IMC [4].

Para diseñar el controlador se plantearon los parámetros del IMC de acuerdo a la tabla 2 para un modelo POR como el representado en la siguiente función y obtenido para el prototipo de planta de presión:

$$G(s) = \frac{1.1339e^{-2.1215s}}{20.4275s + 1} = \frac{ke^{-\theta's}}{\tau s + 1} \quad (14)$$

Tabla 2: Parámetros del PI IMC para un modelo POR

Control	K_c	τ_i	τ_d	λ (Recomendado)
PI	$\frac{\tau}{K\lambda}$	τ	—	$\lambda \geq 1.7 \theta'$ $\lambda \geq 0.2\tau$

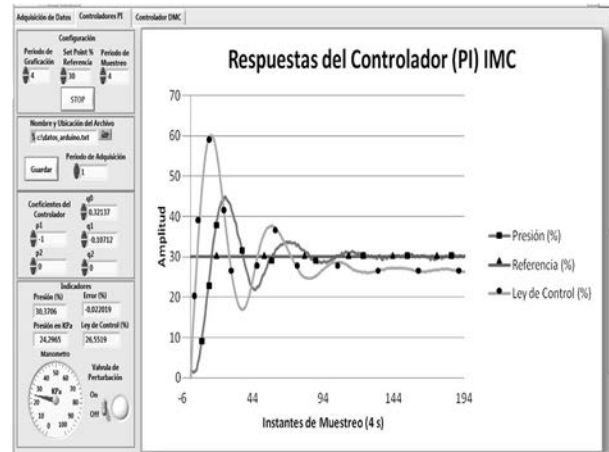


Figura 8 Implementación del PI IMC sobre el prototipo de planta de presión

La figura 8 muestra la interfaz grafica diseñada y las respuestas obtenidas con esta estrategia, en ella se observa una ley de control agresiva la cual superó la del DMC y por lo tanto incrementó a su vez el trabajo sobre el compresor lo que se refleja en más consumo energético del proceso, también se presentan oscilaciones y finalmente el voltaje aplicado cae a un valor promedio constante, la salida presenta un sobreimpulso de mayor magnitud comparado con el DMC lo que desfavorece la técnica PI, se presentan de igual forma oscilaciones hasta alcanzar error en estado estable igual a cero y tiempo de establecimiento más alto en comparación al DMC.

4.3 Comparación del desempeño en el proceso real.

Para comparar el desempeño de los controladores implementados en el prototipo de planta de presión se tuvieron en cuenta criterios de respuesta temporal como el tiempo de establecimiento (t_s), el máximo sobreimpulso (MP) y el error de estado estable (e_{ss}), criterios de la integral del error como IAE e ICE y el trabajo realizado por la variable manipulada TVM . Estos índices se presentan en la tabla 3 [13] [14] [15].

Tabla 3: Comparación del desempeño de los controladores implementados

Índice	Controlador	
	DMC	PI IMC
<i>IAE</i>	305,39	716,8004
<i>ICE</i>	4361,2516	10081,614
<i>TVM</i>	5786,6885	6458,423
e_{ss}	0	0
t_s (s)	164	480
<i>Mp</i> (%)	14,016	50,036

Los resultados indican que el mejor controlador en cuanto a los índices presentados es el DMC sintonizado con el AG, todos los índices son menores en comparación al PI IMC, se resalta el buen tiempo de establecimiento que se obtuvo con el DMC y la disminución del trabajo realizado por el compresor. A nivel industrial es importante reducir el consumo energético que se verá finalmente reflejado en mejoras económicas a nivel de los procesos.

5. CONCLUSIONES

El DMC requiere de un modelo del proceso capaz de contener al máximo la dinámica del sistema, para esto se identificó el proceso mediante la curva de reacción para el punto de operación elegido (escalón del 20%-30%), se obtuvieron varios modelos matemáticos de primer orden mas retardo, los modelos fueron promediados para obtener un modelo que lograra contener lo más próximo posible la dinámica real de la planta.

Se demostró con la sintonización experimental del DMC que la técnica puede generar respuestas que llevan a controladores de alta eficiencia, inestables, oscilantes y personalizados para un proceso en particular y que la carencia de un estudio profundo sobre la influencia de los parámetros sobre el proceso hace necesaria la combinación de técnicas para encontrar dichos valores.

En el trabajo se desarrolló un algoritmo genético simple para sintonizar el controlador DMC, el AG se diseñó con una población formada por el factor de supresión, factor de ponderación y horizonte de control con el propósito de minimizar el error en estado estable, la salida máxima, el trabajo asociado a la variable manipulada y la integral del error al cuadrado.

En la implementación de los controladores, el DCM sintonizado vía AG y el PI IMC sobre el prototipo de planta de presión, se observó que ambas estrategias llevaron el sistema a la referencia deseada, sin embargo mediante la comparación realizada con los índices de desempeño se concluyó que el DMC y el AG para su sintonización presenta mejores resultados en todas las métricas y por lo tanto más eficiencia frente al PI IMC, demostrando a su vez que la computación evolutiva es una buena estrategia para diseñar técnicas que carecen de un estudio profundo de sintonización como el control matricial dinámico.

6. AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus agradecimientos al Docente Henry Omar sarmiento (PhD) por él apoyo brindado, al decano de la facultad de ingenierías Rubén Darío Vásquez (MSc) por facilitar la participación en el proyecto, y en general al grupo de investigación ICARO, del Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Ramírez J., Posada N., Construcción de una Planta de Presión Didáctica y Portable para Implementación de Algoritmos de Control", Memorias, VIII Congreso de Ingeniería Mecánica, Cuenca-Ecuador, 1160-1165, 2014.
- [2] Johnson M., A. Moradi, PID Control New Identification and Design Methods. Springer-Verlag London Limited, London, 2005.
- [3] Hägglund, T., Åström, K., Revisiting the Ziegler-Nichols tuning rules for PI control. Asian Journal of Control, 4, 354–380, 2002.
- [4] García L.E., Sistemas de control digital, Teoría y práctica, Politécnico Colombiano JIC, Medellín. Colombia. 2012.
- [5] Posada J., DMC adaptativo para procesos no lineales utilizando inteligencia artificial, [Tesis pregrado], Universidad del Norte, Barranquilla. Colombia. 2006

[6] Iglesias E., Sanjuán M., Smith C., Tuning equation for dynamicmatrix control in siso loops”, Ingeniería y Desarrollo, vol.19, 88-100, 2006

[7] De Almeida G., Felix J., J. Denti, Using genetic algorithm to optimize the tuning parameters of dynamic matrix control, SBAI, Brasil, 2007.

[8] González E.A, Algoritmos de control predictivo multivariable para procesos con dinámica rápida. Aplicación al control de un sistema de motores acoplados [MSc Tesis], Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España, 2011

[9] Argimiro P., Katty M., Cantero V., Ramiro J., Chamorro C., “Control por Matriz Dinámica (DMC): Sistemas de lazo simple y Multivariable”, Revista Prospectiva, vol. 8, 69-75, 2010.

[10] Ramírez J. A., Posada N. L., Aplicación de Diseño y Simulación de DMC para plantas de primer orden con tiempo muerto y dinámica lenta. Revista Educación en Ingeniería, Vol. 9, N°. 18, 35-43, 2014.

[11] Ponce P, “Inteligencia artificial con aplicaciones a la ingeniería”, México. 2010

[12] Tamilarasi A., Anantha T., An enhanced genetic algorithm with simulated annealing for job-shop scheduling, International Journal of Engineering, Science and Technology, Vol. 2, No. 1, 144-151, 2010

[13] Dorf, R. C., Bishop, R. H.,Sistemas de control moderno (10.a ed.). Madrid: Pearson Educación, S.A, 2005.

[14] Smith, C. A. & Corripio, A. B., *Principles and Practice of Automatic Process Control* (2.a ed.). John Wiley & Sons, Inc. 1997.

[15] Ogata, K., *Sistemas de control en tiempo discreto* (4.a ed.). México: Prentice Hall Hispanoamericana, S.A., 2002.