

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN ALGORITMO DE CONTROL AVANZADO APLICADO A UN PROCESO DE PRESIÓN, UTILIZANDO UN CONTROLADOR DE AUTOMATIZACIÓN PROGRAMABLE PARA EL LABORATORIO DE REDES INDUSTRIALES Y CONTROL DE PROCESOS DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE EXTENSIÓN LATACUNGA.

Vaca, Andrea E. Curay, Segundo D.

Departamento de Eléctrica y Electrónica de la Universidad de Las Fuerzas Armadas ESPE Extensión Latacunga, Ecuador.

vacaandreae@gmail.com

curay.fd@gmail.com

***Abstract**— En este proyecto se indica el diseño e implementación de un algoritmo de control avanzado para un proceso de presión, optando por realizar un controlador MPC (Control Predictivo Basado en Modelo) el cual es parte de las metodologías de control avanzado. El MPC como su nombre lo indica necesita de un modelo matemático experimental del proceso ya sea continuo o discreto para realizar el control, por esta razón es necesario obtener el modelo dinámico del proceso de presión, para ello se utiliza la herramienta de “Identificación de sistemas” que posee el software Matlab. Finalmente se realizará el estudio comparativo de la respuesta transitoria del control MPC con respecto a un control tradicional PID, se incluye una interfaz gráfica para la visualización y monitoreo de cada controlador implementado a dicho sistema.*

Palabras claves— Proceso de presión, Control Avanzado, MPC, Identificación de sistemas, PAC.

I. INTRODUCCIÓN

La necesidad de controlar procesos en puntos de operación límites con el objetivo de

optimizar los recursos buscando reducir gastos que hoy en día la industria exige llevó a la aparición de controladores avanzados, debido a que estos tipos de controladores ya no buscan solamente minimizar el error en estado estable hasta cero, sino que también busca la manera de maximizar la producción consiguiendo con esto un comportamiento óptimo de los sistemas. Por ello este proyecto permitirá dar soluciones reales a nivel industrial, con equipos adaptables a los requerimientos industriales.

II. MARCO TEÓRICO

A. Control avanzado.

El control avanzado describe el diseño de una infraestructura de un sistema de ingeniería que reúne elementos de diferentes disciplinas, desde ingeniería de control, procesamiento de señales, estadística, teorías de decisión, ingeniería de software, hasta técnicas de

inteligencia artificial [1]. Son utilizados en procesos que por su grado de complejidad no pueden ser operados usando técnicas de control convencional de forma eficiente, y requieren aplicar técnicas de control avanzado para alcanzar las prestaciones deseadas. [1]

Tipos de controladores.

Existen diversas estrategias de control que responden a esta clasificación, sin embargo, la dificultad para poder ser operadas por personal con escaso nivel de formación profesional así como para generalizarlas a sistemas de diferente naturaleza, ha provocado que pocas sean las que han trascendido del ámbito académico al industrial [2]. En la Fig. 1, se hace referencia a los controles más importantes en cuanto a la utilización y aplicación industrial:

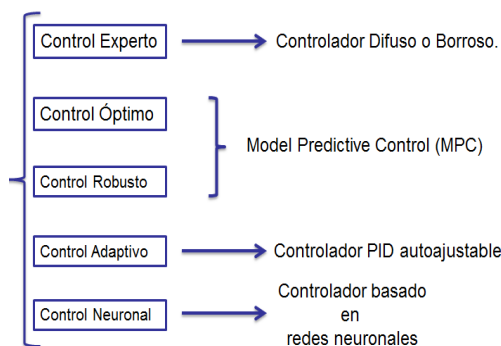


Fig. 1. Tipos de controladores avanzados.

En la Fig. 2 se indica las expectativas y posibilidades técnicas de los controladores avanzados dando como resultado que en estado actual y futuras tendencias en el campo del control de procesos industriales el Control Predictivo Basado en Modelo (MPC) se puede considerar una tecnología suficientemente introducida en la industria y que además sigue despertando muchas expectativas. Estos hechos, unidos a la existencia de campos

abiertos tanto en investigación como en temas relacionados con la implementación justifican un estudio más detallado de esta tecnología.[2]

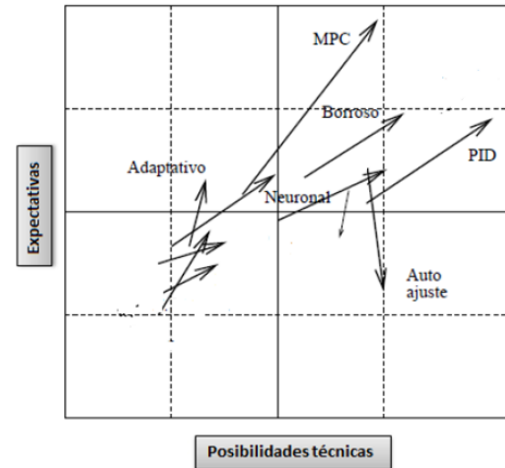


Fig. 2. Expectativas y posibilidades de las técnicas de control.

B. Model Predictive Control (MPC).

El control predictivo basado en modelo (MPC), es un método para resolver problemas en el dominio del tiempo, donde el controlador cumple o emplea:

- Un modelo del sistema que relaciona las variables manipuladas y controladas para predecir las salidas futuras del proceso.
- Un cálculo de una secuencia de control, de manera que se minimice una función objetivo.
- Una ley de control que permite obtener únicamente el valor óptimo de la señal de control basándose en un optimizador que se encargará de realizar los cálculos respectivos.

En la Fig. 3 se puede observar la estructura general de los controladores predictivos.

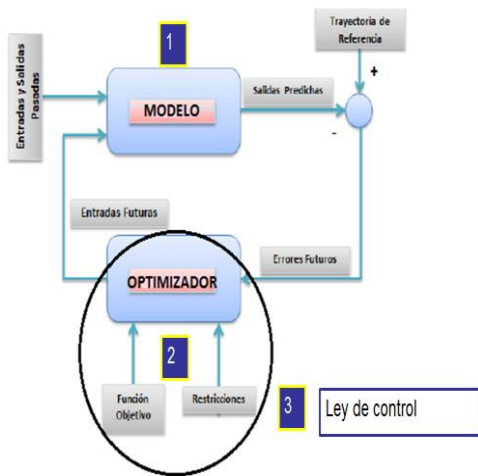


Fig. 3. Estructura general de los controladores MPC.

III. MODELAMIENTO DE LA PLANTA DE PRESIÓN.

Para la modelación del proceso de presión se utiliza el software MATLAB debido a que la modelación que se va a realizar conlleva un cálculo matemático elevado y MATLAB es utilizado para este tipo de problemas.

A. Identificación de sistemas.

La identificación de procesos consiste en determinar u obtener de forma experimental el modelo de un sistema dinámico que reproduzca con suficiente exactitud las características dinámicas del proceso a partir de las mediciones o datos de entrada y salida correspondiente de dicho sistema. Para obtener el modelamiento del sistema de presión, el proceso de identificación comprende los siguientes pasos:

- Obtención de datos.
- Tratamiento previo de los datos.
- Elección de la estructura del modelo.
- Validación del modelo.

B. Obtención de los datos.

El primer paso dentro del proceso de identificación, es realizar algún tipo de experimento sobre el sistema bajo estudio, para conocer las señales a medir, el periodo de muestreo a utilizar, el tipo de entrada más adecuada que permitirá excitar el sistema y el número de datos a almacenar.

Señales a medir.

Son las señales que afectan al sistema, en este punto se determina cual es la entrada y salida del proceso de presión, tomando en cuenta que estas variables deben ser medibles y cuantificables debido a que existen señales que afectan directamente a la salida pero no se pueden actuar sobre ellas, si estas señales se pueden medir se deben considerar como entradas caso contrario se las deben tomar como perturbaciones. En la Fig. 4 se puede observar la identificación de la entrada y salida del sistema de presión así como los rangos de trabajo y unidades de las variables utilizados por los elementos respectivos.

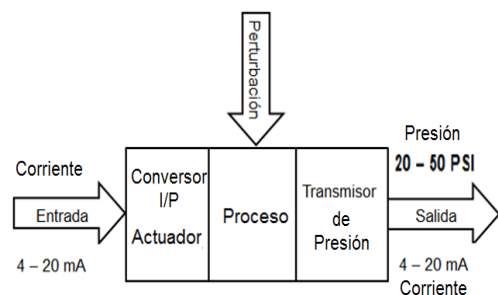


Fig. 4. Señales a medir del proceso de presión.

Periodo de muestreo.

La elección del periodo de muestreo es un punto muy importante debido a que este tiene una influencia decisiva en el experimento de

identificación. Si consideramos un periodo de muestreo pequeño puede llevar a la obtención de datos redundantes, en cambio un periodo de muestreo grande puede ocasionar pérdidas de datos que al final no aportarían información y dificultaría identificar con éxito la dinámica del proceso. Además el periodo de muestreo sería utilizado para realizar filtros que ayudarían eliminar ruidos que podrían incorporarse en la señal.

Para obtener el periodo de muestreo se analiza la dinámica (Fig. 5(a)) y el tiempo muerto del sistema (Fig. 5(b)).

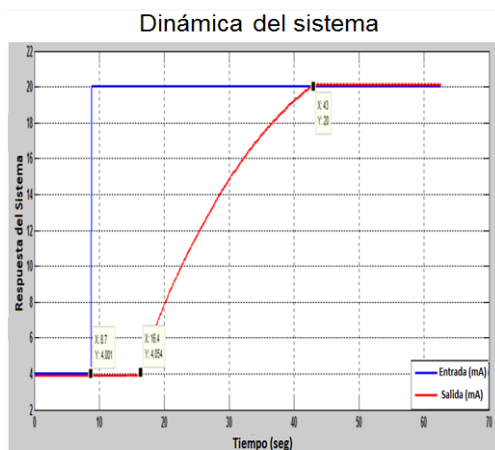


Fig. 5(a). Dinámica del sistema.

Tiempo muerto del sistema

Valor inicial (mA)	Valor final (mA)	Tiempo muerto (s)
4	20	0.5
20	4	0.5
4	12	0.2
12	20	0.1
20	12	0.2
12	4	0.1
Máximo		0.5

Fig. 5(b). Tiempo muerto del sistema.

La dinámica del sistema es normal en el tiempo y no se tiene variaciones o introducción de señales que represente ruido y puedan perjudicar la identificación del modelo, es por ello que no es necesario utilizar un filtro. En el tiempo muerto del sistema se obtuvo un valor de 0.5 seg cuando se aplicó un cambio en la entrada de valores límite, cuando se aplicó cambios en la entrada dentro de los rangos límite se obtuvo un tiempo muerto mínimo de 0.1 seg.

Se procedió a realizar el experimento de la toma de datos con estos diferentes tiempos dando como resultado que un tiempo de muestreo de 0.1 seg de obtiene datos redundantes y aun tiempo de muestreo de 0.5seg se perdía datos que eran relevantes para el modelamiento, entonces se procedió por trabajar con un tiempo de muestreo de 0.1seg realizando un promedio de 5 muestras a mi salida adquirida del proceso consiguiendo con esto minimizar la toma de datos redundantes y obtener los datos adecuados para el modelamiento.

Tipo de entrada.

El tipo de entrada utilizada para la identificación de sistemas lineales y no lineales son las escalonadas. Por ello se utilizó dos tipos de entrada escalonada, una tipo binaria que solo tomara los valores límites del rango de trabajo en este caso de 4 a 20mA, la otra es un tipo multinivel que tomara distintitos valores dentro del rango de trabajo de 4 a 20 mA incluido estos valores (Ver Fig. 6).

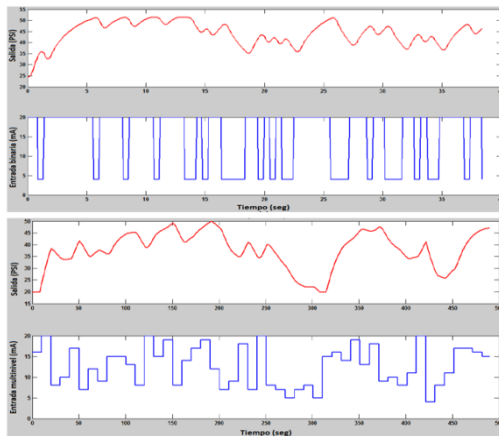


Fig. 6. Respuesta del sistema excitada con diferentes entradas

Como se puede observar en la Fig. 6, al excitar al sistema con una entrada escalón binario (línea azul) la respuesta del sistema solo se mantiene entre los rangos de 35 a 50 Psi por lo que no cubre todo el rango establecido en la salida (línea roja) que es de 20 a 50 PSI. En cambio al excitar al sistema con una entrada escalón multinivel (línea azul) la respuesta del sistema cubre todo el rango establecido 20 a 50 PSI (línea roja), por lo que se eligió trabajar con una entrada escalón multinivel.

Numero de datos.

Se puede decir que mientras más información se tenga sobre el sistema, más exacto será el proceso de identificación. Pero se debe tomar en consideración la capacidad de memoria por ello es adecuado calcular el número de muestras necesarias que permitirán obtener un modelo optimo sin necesidad de sobrepasar el límite del dispositivo. Aplicando la siguiente formula (ecuación 1) se obtiene el número adecuado de muestras:

$$\#muestras = t_{cmin} * 100 + \frac{1}{T_s} \quad (1)$$

C. Tratamiento previo de los datos.

El tratamiento de datos consiste en eliminar datos erróneos que por hardware y software pudieron almacenarse, estos datos erróneos si no se los elimina pueden afectar críticamente el proceso de modelamiento de nuestro sistema.

D. Estructura del modelo.

Una vez obtenido los datos idóneos almacenados se procede a utilizar la herramienta de MATLAB llamada ident que permite obtener el modelo del proceso. La herramienta ident permite cargar los datos almacenados, escoger la estructura del modelo, y posteriormente realizar la respectiva validación del modelo obtenido.

En la estructura del modelo la herramienta ident permite elegir diferentes formas de representación matemática. Por lo cual se elige trabajar con la representación de ecuación de espacio de estados ya que para implementar el controlador predictivo en labview necesita este tipo de representación.

E. Validación del modelo.

La validación consiste en ver el porcentaje de aproximación entre el comportamiento real del sistema y el comportamiento obtenido por el modelo de MATLAB (Ver Fig. 7). En el experimento se obtuvo 6 diferentes modelos de diferentes muestras y a todos ellos se los valido con 8 set de muestras previamente almacenadas como se puede observar en la Fig. 8.

Ecuación de Espacio de Estados

$$x(k+1) = \begin{bmatrix} 0,997 & -0,00192 & 0,001094 & -0,0006972 & 0,0006194 \\ 0,0128 & 0,9767 & 0,1694 & -0,03913 & 0,1486 \\ -0,00171 & -0,001156 & 0,8249 & 0,828 & 0,07047 \\ -0,00196 & -0,008509 & -0,2021 & 0,4866 & 0,8741 \\ 0,0002688 & -0,08174 & 0,08783 & -0,2249 & -0,08174 \end{bmatrix} x(k) + \begin{bmatrix} 6,53E-7 \\ -0,0003218 \\ -0,001092 \\ 0,0006197 \\ 0,0006769 \end{bmatrix} u(k)$$

$$y(k) = \begin{bmatrix} 1216 & -0,4435 & -0,6928 & 0,7518 & -0,7255 \end{bmatrix} x(k) + \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix} u(k)$$

Fig. 7. Estructura del modelo de presión en ecuación de espacio de estados.

Datos	Modelo Matemático	Porcentaje de ajuste (%)
Muestra 1	Modelo 1	66.76
	Modelo 2	66.51
	Modelo 3	37.29
	Modelo 4	73.80
	Modelo 5	74.02
	Modelo 6	74.5
Muestra 2	Modelo 1	72.50
	Modelo 2	72.00
	Modelo 3	73.50
	Modelo 4	73.53
	Modelo 5	73.67
	Modelo 6	73.89
Muestra 3	Modelo 1	33.09
	Modelo 2	51.34
	Modelo 3	36.37
	Modelo 4	51.48
	Modelo 5	51.58
	Modelo 6	74.19
Muestra 4	Modelo 1	69.61
	Modelo 2	33.29
	Modelo 3	70.00
	Modelo 4	74.62
	Modelo 5	79.19
	Modelo 6	77.80
Muestra 5	Modelo 1	52.55
	Modelo 2	75.51
	Modelo 3	79.00
	Modelo 4	78.06
	Modelo 5	75.82
	Modelo 6	83.54
Muestra 6	Modelo 1	31.99
	Modelo 2	41.17
	Modelo 3	51.60
	Modelo 4	55.03
	Modelo 5	55.25
	Modelo 6	71.43
Muestra 7	Modelo 1	43.27
	Modelo 2	59.84
	Modelo 3	43.02
	Modelo 4	73.76
	Modelo 5	42.47
	Modelo 6	50.11
Muestra 8	Modelo 1	57.43
	Modelo 2	56.07
	Modelo 3	71.43
	Modelo 4	66.58
	Modelo 5	64.57
	Modelo 6	67.31

Fig. 8. Comparación de los modelos obtenidos.

Se puede observar el modelo 6 que presenta mejor porcentaje de exactitud al comportamiento real del sistema entonces se trabaja con este modelo.

IV. IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROLADOR MPC.

La implementación del controlador MPC consta de dos partes, donde el primer paso es el hardware, el cual es descrito por el diagrama de bloques (Ver Fig. 9).



Fig. 9. Hardware del controlador MPC.

Consta de un computador utilizado para el monitoreo mediante un HMI, seguido el dispositivo myRIO en el cual se implementara el controlador MPC, como el proceso industrial de presión trabaja con corriente es necesario utilizar un convertor de V/I, debido a que el dispositivo myRIO únicamente tiene entradas y salidas de voltaje por ello se utiliza el convertor OMEGA. La señal generada del convertor Omega es enviada al actuador el cual limita la presión suministrada al Proceso, seguido de esto el transmisor genera la corriente respectiva de acuerdo a la presión medida por este elemento, por ello es necesario utilizar la resistencia de precisión para la conversión de C/V el cual es entregado nuevamente al dispositivo myRIO que lo utilizara para realizar el control respectivo.

Segundo paso es trabajar en el software donde utilizamos labview debido a que el dispositivo myRIO trabaja con esta plataforma de programación. Antes de empezar a trabajar

con el dispositivo se debe ver que tenga las herramientas necesarias para realizar el controlador MPC en este caso debemos asegurarnos que tenga las herramientas Control Design and Simulation y el toolkit PID. La estructura del proyecto para la implementación del controlador consta de las siguientes partes:

- Labview FPGA.
- Labview RT.
- Labview PC.

A. Labview FPGA.

En el Vi de la FPGA se debe indicar la entrada y salida con la que se va a trabajar en este caso son analógicas, además se debe tener en cuenta el tipo de dato que maneja, el dispositivo myRIO trabaja con datos en entero de bits es decir no adquiere directamente voltaje y lo único que se debe realizar es una conversión de entero de bits a voltaje y viceversa.

B. Labview RT.

En el vi RT se implementara el programa del controlador MPC, donde se utiliza los siguientes subVI's que contiene el módulo Predictive (Fig. 10) de la herramienta Control Design and Simulation, los cuales son utilizados para la implementación del controlador MPC en simulación y en tiempo real.

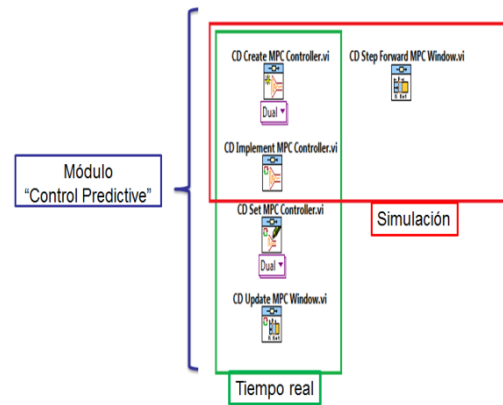


Fig. 10. SubVI's del módulo Predictivo.

Create MPC: Se encarga de crear el perfil del MPC con todas las características necesarias, al subVI se debe ingresar la siguiente información: Horizonte de predicción (H_p), Horizonte de control (H_c), las restricciones, los pesos de costo donde el output error es la matriz Q , el control action change es la matriz R , y el control action error es la matriz N y por ultimo tenemos que ingresar el modelo matemático de nuestra planta.

Implement MPC: Permite implementar el controlador una vez que ya se ha creado el MPC, es decir aquí es donde ingresa todas las características que anteriormente se detalló para realizar todos los cálculos, los elementos que necesita son una ventana de referencia el cual van hacer los setpoint futuros, la señal de salida (realimentación del proceso) y como resultado genera una acción de control adecuada.

Update y Step MPC: Se utiliza para proporcionar la ventana de setpoint adecuada para todo el rango de predicción.

Set MPC: Permite actualizar todos los parámetros del controlador MPC y crear un

nuevo perfil, utilizado para la sintonización del controlador en tiempo real.

Función Objetivo: Labview utiliza la siguiente función objetivo (ecuación 2) la cual va hacer minimizada, y como se puede visualizar está en función de los parámetros antes descritos y utilizada para todo los cálculos necesarios para obtener un valor único y optimo de acción de control para el proceso.

$$\begin{aligned}
 J(k) &= \sum_{i=N_w}^{N_p} [\bar{y}(k+i|k) - r(k+i|k)]^T \cdot \mathbf{Q} \cdot [\bar{y}(k+i|k) \\
 &\quad - r(k+i|k)] + \sum_{i=0}^{N_c-1} [\Delta u^T(k+i|k) \cdot \mathbf{R} \cdot \Delta u(k+i|k)] \\
 &\quad + \sum_{i=N_w}^{N_p} [u(k+i|k) - s(k+i|k)]^T \cdot \mathbf{N} \cdot [u(k+i|k) - s(k \\
 &\quad + i|k)]
 \end{aligned} \tag{2}$$

Finalmente la función objetivo está sujeta a las restricciones reales del proceso (ver Fig. 11).

$$u_{min} \leq u(t) \leq u_{max}$$

$$\Delta u_{min} \leq \Delta u \leq \Delta u_{max}$$

$$y_{min} \leq y \leq y_{max}$$

Fig. 11. Restricciones del proceso.

C. Labview PC.

El vi creado en la PC es utilizado para el monitoreo en tiempo real de las variables del proceso las cuales son: PV, CV, SP.

En la Fig. 12 se puede apreciar el controlador implementado en el proceso de presión.

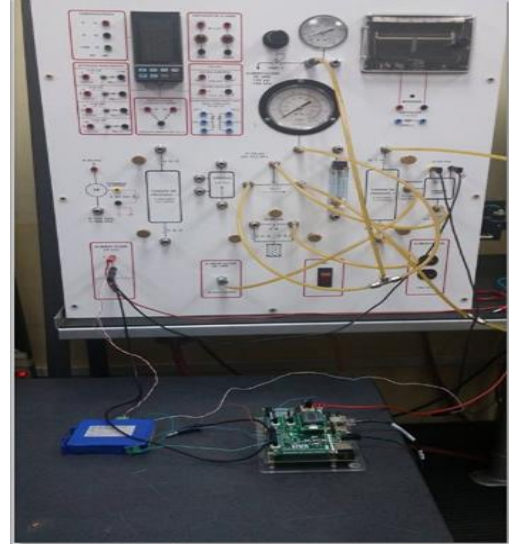


Fig. 12. Implementación del controlador MPC en tiempo real.

V. RESULTADOS OBTENIDOS DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROLADOR MPC.

Se realizó la comparación respectiva de los controladores MPC vs. PID en simulación e implementado en tiempo real, el comportamiento transitorio de ambos controladores tanto en Sobreimpulso y tiempo de estabilización fueron observados a diferentes setpoint.

A. Comparación de los controladores MPC vs PID en simulación.

En la Fig. 13 se puede constatar que el controlador MPC es superior al controlador PID en los parámetros de respuesta transitoria, en cuanto al uso de la acción de control proporcionada para cumplir el objetivo de llevar la variable del proceso al punto de

referencia designado el MPC solo tiene que realizar la mitad de trabajo con respecto al controlador PID (ver Fig. 14).

Referencia "SP" (PSI)	MPC		PID	
	Sobreimpulso (%)	Tiempo de establecimiento(seg)	Sobreimpulso (%)	Tiempo de establecimiento (seg)
20-30	0	42	0	46
30-40	0	35	0	36
40-50	0	40	0	41
20-50	0	40	0	44
50-35	0	35	0	42
35-20	0	35	0	40
Promedio	0	37.8	0	41.5

Fig. 13. Comparación del controlador MPC vs. PID en simulación.

Referencia "SP" (PSI)	MPC	PID
	Acción de control (CV) %	Acción de control (CV) %
20-30	55.7	87.5
30-40	76.9	82.6
40-50	92	92.3
20-50	92	92.3
50-35	65.3	76.9
35-20	63.4	63.4
Promedio	58	82.5

Fig. 14. Comparación del CV del controlador MPC vs. PID en simulación.

B. Comparación de los controladores MPC vs. PID en tiempo real.

De igual manera se realizó una tabla de comparación con diferentes valores setpoint otorgados para los controladores MPC y PID en tiempo real, donde se observa que el controlador MPC es más estable a comparación del PID con un promedio de Sobreimpulso de 0.05% y en el PID de 2%. En

cuanto al tiempo de estabilización el MPC supera al PID pero con un tiempo mínimo aproximado de 6 seg (ver Fig. 15).

Mientras que en la acción de control el MPC es superior debido que utiliza la mitad de porcentaje de la acción de control suministrado por el PID en todos los cambios realizados para llegar al punto de referencia deseado (ver Fig. 16). Consiguiendo con esto minimizar el trabajo que realiza el actuador en este la válvula de control.

Indicadores Referencia "SP"	TIPO DE CONTROL			
	MPC	PID	MPC	PID
	Sobreimpulso (%)		Tiempo de establecimiento (seg)	
20_30	0.33	6.33	20.1	28.6
30-40	0	3	22.3	28.2
40_50	0	1.2	29.6	50.4
20_50	0	1.2	50.4	61.5
50_35	0	0	37.1	28.4
35_20	0	0	29.6	30.8
Promedio	0.055	1.95	31.5	37.9

Fig. 15. Comparación del controlador MPC vs. PID en tiempo real

Referencia "SP" (PSI)	MPC	PID
	Acción de control (CV) %	Acción de control (CV) %
20-30	13	22.5
30-40	20.5	43.2
40-50	35.3	71
20-50	67.3	71
50-35	22.2	40.4
35-20	8.5	18.6
Promedio	27.8	44.45

Fig. 16. Comparación del CV del controlador MPC vs. PID en tiempo real.

VI. CONCLUSIONES.

- El modelo del proceso debe contener la mayor información posible sobre la dinámica del sistema porque de esto depende el desempeño óptimo y precisión del controlador predictivo.
- El método de sintonización utilizado para los dos controladores, fue el método empírico o tanteo ya que este presenta mejores resultados en el control, pero el MPC fue previamente realizado por simulación.
- El MPC implementado permite manejar restricciones reales del sistema los cuales son utilizados para el cálculo de la ley de control y así optimizar sus recursos que no ocurre con otros controladores.
- Se puede apreciar, de acuerdo a los resultados obtenidos, que el control MPC tiene mejor comportamiento dinámico, ya que presenta un tiempo establecimiento y Sobreimpulso menor que el control PID.

VII. REFERENCIAS.

- [1] M. Fernández, “El ABC de la Automatización de Control Avanzado,” [en línea]. Disponible en: http://www.aie.cl/files/file/comites/ca/abc/Control_Avanzado.pdf.
- [2] C. Bordóns Alba, “Control Predictivo: Metodología, Tecnología y nuevas Perspectivas,” Dpto. Sistemas y Automática, Universidad de Sevilla, [en línea], 2000. Disponible en: <http://control-ps2316-sept2009.wikispaces.com/file/view/CONTROL+PREDICTIVO.pdf>

- [3] National Instrument Corporate Headquarters, “LabVIEW™ Control Design User Manual,” [en línea], June 2009. Disponible en: <http://www.ni.com/pdf/manuals/371057g.pdf>.



Vaca Andrea. Nació en Latacunga provincia de Cotopaxi en Ecuador. Es graduada del Colegio Particular “Unidad Educativa FAE N° 5” donde obtuvo el título de Bachiller en Electrónica.

Actualmente se encuentra egresada de la Carrera de Ingeniería en Electrónica e Instrumentación en la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE” en la ciudad de Latacunga Ecuador.

E-mail: vacaandrea@gmail.com



Curay David. Nació en Latacunga provincia de Cotopaxi en Ecuador. Es graduado del Colegio Técnico Industrial “Ramón Barba Naranjo” donde obtuvo el título de Bachiller en Electrónica.

Actualmente se encuentra egresado de la Carrera de Ingeniería en Electrónica e Instrumentación en la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE” en la ciudad de Latacunga Ecuador.

E-mail: curay.fd@gmail.com