

IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE TUNEL DE CALENTAMIENTO PARA ANALIZAR EL COMPORTAMIENTO DEL CONTROL PREDICTIVO BASADO EN MODELO (MBPC) VS CONTROL PROPORCIONAL INTEGRAL DERIVATIVO (PID) UTILIZANDO SOFTWARE LABVIEW

Holger Cevallos U.

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación (FIEC)
Escuela Superior Politécnica del Litoral
Campus “Gustavo Galindo V.”, Km.30.5 Vía Perimetral, Apartado 09-01-5863 Guayaquil, Ecuador
hcevallos@espol.edu.ec

Resumen: *En muchos procesos industriales, la calidad de la acción de control no es un tema muy crucial y un control que elimina el error de estado estable y acompaña un aceptable comportamiento en lazo cerrado es suficiente. El controlador regulatorio basado en PID es suficiente para mantener la variable del proceso próxima al valor del punto de ajuste dado. Sin embargo, razones económicas y restricciones operacionales hacen necesario optimizar la operación de la planta para lograr tanto como sea posible una buena eficiencia operacional, lo cual representa significantes retos en el control de procesos industriales y las compañías que proveen y desarrollan sistemas de control tienen el reto de cara a la competencia global, nuevas regulaciones, altos estándares de calidad y una participación ecológica responsable. En este trabajo se hará un análisis del comportamiento del controlador predictivo basado en modelo MPC versus el controlador tradicional PID, usando “toolboxes” desarrollados por la compañía National Instruments con su software de programación gráfica LabVIEW. La Planta a controlar es un prototipo de túnel de calentamiento construido para el efecto. Para controlar la planta se implementará un controlador predictivo y un controlador PID usando los toolkits de LabVIEW identificación, diseño de control, optimización y simulación y adquisiciones de datos DAQ para el diseño, verificación y desarrollo, con el propósito de realizar un estudio comparativo con respecto al comportamiento de los mismos. La comparación del controlador predictivo con el popular ajuste PID demuestra la superior performance del control predictivo. La solución de control puede ser fácilmente importada a una plataforma en tiempo real para la aplicación industrial.*

Palabras claves: *control predictivo, pid, control supervisorio.*

Abstract: *In many industrial processes, the quality control action is not a very crucial subject and a control that eliminates the error of stable state and accompanies an acceptable behavior in loopback is sufficient. The regulatory level based on PID controller is able to maintain the process variables next to the given set point values. However, economic reasons and operational constraints make it necessary to optimize plant operations to achieve as much operational efficiency as possible, which represents significant challenges in the control of the industrial processes and the companies that provide and develop control systems have the challenge to face the global competition, new regulations, higher qualities' standards and an ecological participation responsibility. In this work an analysis will be done of the behavior of model based predictive controller MPC versus the traditional controller PID, using “toolboxes” developed by the company National Instruments with their graphical programming software LabVIEW. The Plant to control is a prototype of tunnel heating constructed for the effect. In order to control the plant will implement a controller MPC and a controller PID using identification, control design, optimization, simulation and data acquisition DAQ LabVIEW toolkits for design, verification and deployment, with the purpose of makes a comparative study with respect to the behavior of them. The comparison with popular PID tuning methods demonstrates the superior performances of predictive control. The control solutions can be easily imported to a real time platform for industrial applications.*

Keywords: *predictive control, pid, supervisory control.*

1. Introducción

El MPC -control predictivo basado en modelo- es un tipo de control de naturaleza abierta dentro del cual se han desarrollado muchas aplicaciones, encontrando gran aceptación tanto en la industria como en el ámbito académico. En la actualidad existen numerosas aplicaciones de controladores predictivos funcionando con éxito, en la industria de procesos y en el control de motores y la robótica.

En muchos sistemas de control la calidad de la acción de control no es un tema muy crucial y un control que elimina el error de estado estable y acompaña un aceptable comportamiento en lazo cerrado es suficiente.

En este trabajo se hará un análisis del comportamiento del controlador MPC versus el controlador tradicional PID, usando los "toolbox" desarrollados por la compañía National Instruments en su software de programación gráfica LabView. La Planta a controlar es un prototipo de túnel de calentamiento construido para el efecto; para controlar la planta se implementará un controlador MPC y un controlador PID con el fin de establecer las características de operación relevantes del MPC y sus configuraciones y realizar un estudio comparativo con respecto del comportamiento del controlador PID. El controlador MPC a desarrollar incorpora, además de la construcción física de la planta, el sistema de identificación, diseño del control, simulación, y un sistema de adquisición de datos DAQ.

2. Control Predictivo Basado en Modelo – MBPC

El control predictivo basado en modelos (MPC) se puede interpretar como una estrategia de control que utiliza de forma explícita un modelo matemático interno del proceso a controlar (modelo de predicción).

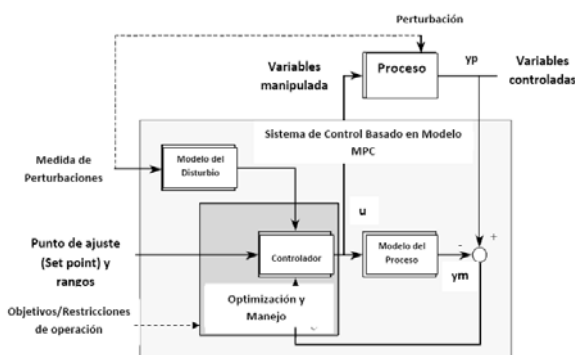


Fig. 1: Diagrama de bloques general para la implementación del MPC

Este modelo se utiliza para predecir la evolución de las variables a controlar a lo largo de un horizonte

temporal de predicción; de este modo se pueden calcular las variables manipuladas futuras para lograr que en el horizonte de predicción, las variables controladas converjan a los valores de referencia.

Las ideas que aparecen en mayor o menor medida en toda la familia de controladores predictivos son básicamente:

- Uso explícito de un modelo para predecir la salida del proceso en futuros instantes de tiempo (horizonte).
- Cálculo de las señales de control minimizando una cierta función objetivo.
- Estrategia deslizante, de forma que en cada instante el horizonte se va desplazando hacia el futuro, lo que implica aplicar la primera señal de control en cada instante y desechar el resto, repitiendo el cálculo en cada instante de muestreo.

El MPC presenta una serie de ventajas sobre otros métodos, entre las que destacan:

- Resulta particularmente atractivo para personal sin un conocimiento profundo de control, puesto que los conceptos resultan muy intuitivos, a la vez que la sintonización es relativamente fácil.
- Puede ser usado para controlar una gran variedad de procesos, desde aquellos con dinámica relativamente simple hasta otros más complejos incluyendo sistemas con grandes retardos, de fase no mínima o inestable.
- Permite tratar con facilidad el caso multivariable.
- Posee intrínsecamente compensación del retardo.
- Resulta conceptualmente simple la extensión al tratamiento de restricciones, que pueden ser incluidas de forma sistemática durante el proceso de diseño.
- Es muy útil cuando se conocen las futuras referencias (robótica o procesos en batch).
- Es una metodología completamente abierta basada en algunos principios básicos que permite futuras extensiones.

Pero, lógicamente, también presenta inconvenientes. Uno de ellos es la carga de cálculo necesaria para la resolución de algunos algoritmos. Pero quizás el mayor inconveniente venga marcado por la necesidad de disponer de un modelo apropiado del proceso. El algoritmo de diseño está basado en el conocimiento previo del modelo y es independiente de éste, pero resulta evidente que las prestaciones obtenidas dependerán de las discrepancias existentes entre el proceso real y el modelo usado.

2.1. Estrategia de control MPC

La metodología de todos los controladores pertenecientes a la familia del MPC se caracteriza por la estrategia siguiente, representada en la figura 2:

1. En cada instante t y haciendo uso del modelo del proceso se predicen las futuras salidas para un determinado horizonte, llamado horizonte de predicción. Estas salidas predichas, $\hat{y}(t+k|t)$ -la notación indica el valor de la variable en el instante $t+k$ calculado en el instante t - para $k=1,2,\dots,N$ dependen de los valores conocidos hasta el instante t (entradas y salidas pasadas) y de las señales de control futuras $u(t+k|t)$, para $k=0,1,2,\dots,N-1$ que se pretenden mandar al sistema y que son las que se quieren calcular.

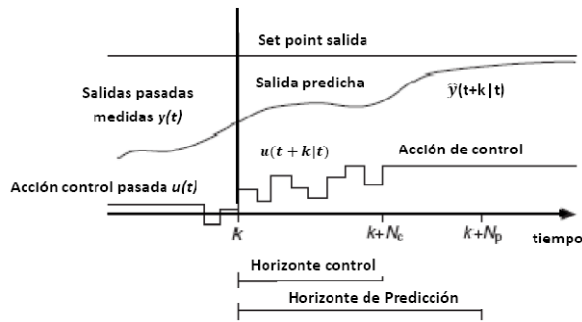


Fig. 2: Estrategia del Control Predictivo

El conjunto de señales de control futuras se calcula optimizando un determinado criterio en el que se pretende mantener el proceso lo más próximo posible a la trayectoria de referencia $w(t+k)$ (que puede ser directamente el setpoint o una suave aproximación a éste). Este criterio suele tomar la forma de una función cuadrática de los errores entre la salida predicha y la trayectoria de referencia también predicha, incluyendo en muchos casos el esfuerzo de control. Si el criterio es cuadrático, el modelo lineal y no existen restricciones se puede obtener una solución explícita, en otro caso se debe usar un método iterativo de optimización.

Adicionalmente se hace alguna suposición sobre la estructura de la ley de control futura, como por ejemplo que va a ser constante a partir de cierto instante.

3. La señal de control $u(t|t)$ es enviada al proceso mientras que las siguientes señales de control calculadas son desechadas, puesto que en el siguiente instante de muestreo ya se conoce $y(t+1)$ y se repite el paso 1 con este nuevo valor y todas las secuencias son actualizadas. Se calcula por tanto $u(t+1|t+1)$ (que en principio será diferente al $u(t+1|t)$ al disponer de nueva información), haciendo uso del concepto de horizonte deslizante. Figura 3

Para llevar a cabo esta estrategia, se usa una estructura como la mostrada en la figura 4. Se hace uso de un modelo para predecir las salidas futuras del proceso, basándose en las futuras señales de control propuestas. Estas señales son calculadas por el optimizador teniendo en cuenta la función de coste (donde aparece el futuro error de seguimiento) así como las restricciones.

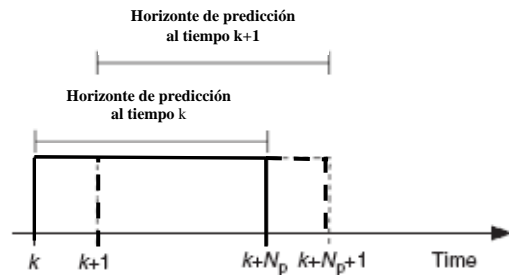


Fig. 3: Concepto de Horizonte Deslizante

Por tanto el modelo juega un papel decisivo en el controlador. El modelo elegido debe ser capaz de capturar la dinámica del proceso para poder predecir las salidas futuras al mismo tiempo que debe ser sencillo de usar y de comprender.

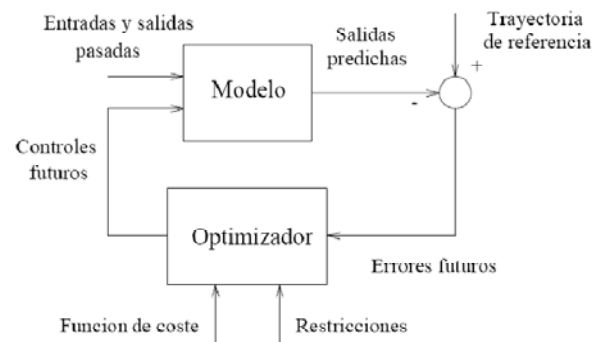


Fig. 4: Estructura básica del MPC

Todos los controladores predictivos poseen elementos comunes y para cada uno de estos elementos se pueden elegir diversas opciones, dando lugar a distintos algoritmos. Estos elementos son:

- a. Modelo de predicción
- b. Función objetivo
- c. Obtención de la ley de control

3. Construcción del prototipo de Túnel de Calentamiento

El prototipo de túnel de calentamiento construido con la finalidad de realizar un estudio comparativo del comportamiento del controlador MPC y el control PID, es de gran utilización en los procesos productivos en los que se requiere por ejemplo del secado y la extracción de humedad de manera controlada del producto durante el proceso, constituyéndose este control en la parte medular, ya que de ello depende la calidad final del producto y el ahorro de energía evitando el reprocesado y el desperdicio.

El túnel de calentamiento o la planta, figuras 5, 6 y 7 consta de: un ventilador de corriente directa a 12 volts, el elemento calefactor o resistencia, una RTD Pt-100, el túnel propiamente dicho construido de hierro negro y revestido de un material aislante térmico, la parte

electrónica de control y fuerza alojado en una caja plástica con tapa transparente, la computadora - laptop o pc de escritorio - y el software LabView de la National Instruments.

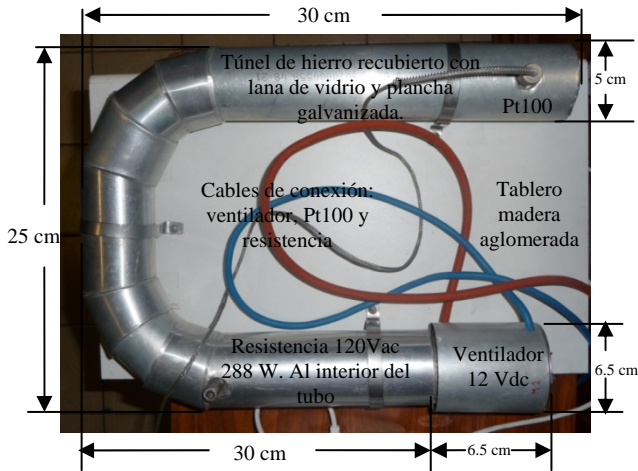


Fig. 5: Túnel de calentamiento



Fig. 6: Caja de sistema electrónico de control y fuerza

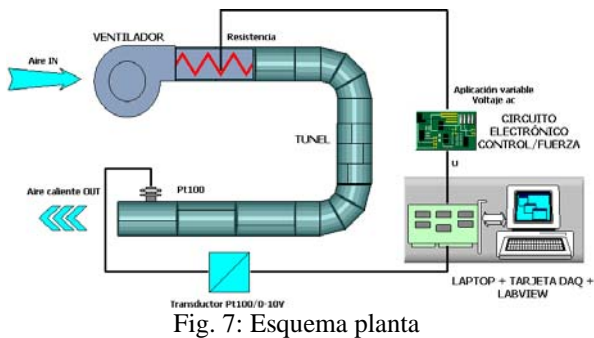


Fig. 7: Esquema planta

Partes constitutivas:

1. Túnel metálico recubierto con lana de vidrio y "encamisado" con plancha galvanizada.
2. Ventilador 12Vdc.
3. Resistencia de calentamiento 120Vac – 288W.
4. RTD – Pt100
5. DAQ National Instruments USB-6012.
6. Transformador de control 110/12 Vac – 1500mA
7. Transductor Pt100 – volts
8. Ventilador 12Vdc enfriamiento de la caja.

9. Placa electrónica: fuente dc, circuito de control y fuerza.
10. Conectores de salida en el perímetro de la caja para conectar la resistencia, ventilador - motor dc, Pt100.
11. Cable USB a conectarse a Laptop o PC con LabView.

3.1. Variables a controlar y manipular

El túnel de calentamiento en adelante llamado "la planta" tiene básicamente las siguientes variables:

1. El caudal de aire que entrega al interior del túnel, el mismo que es función de la velocidad del ventilador, que se mantendrá constante durante la operación de la planta.
2. La temperatura de la planta o variable de salida de la planta. Ajustada por medio del set point de acuerdo a las necesidades del proceso. Es la variable controlada (CV) del proceso.

La planta desarrollada a controlar será una planta SISO, de acuerdo a las iniciales en inglés (single input single output) es decir "una entrada una salida". En el caso particular de la planta en consideración, a fin de analizar el comportamiento de los controladores, se excitaría la planta introduciendo una variación en el set point (single input). El controlador debe actuar de tal forma que la temperatura (single output) siga al punto de ajuste (set point).

3.2. Estrategias de control a utilizar

Un diagrama de bloques del sistema dinámico, como el considerado en el presente estudio, se muestra en la figura 8, refiere la combinación del sistema de control y la planta.

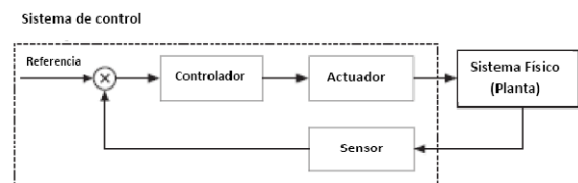


Fig. 8: Diagrama de bloques planta

En el presente trabajo se utilizarán para controlar la planta básicamente dos estrategias o sistemas de control, utilizando el software LabView y sus correspondientes "Tools Kit", en particular el Módulo de Diseño de Control y Simulación (Control Design and Simulation Module), afín de proceder a realizar un análisis comparativo de la performance de los mismos, estos son:

- Control PID

El controlador PID compara el set point (SP) con la variable del proceso (PV) para obtener el error.

Algoritmo PID

$$e = SP - PV$$

Entonces, el controlador calcula la acción de control, $u(t)$, donde K_c es la ganancia del controlador.

$$u(t) = K_c \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right]$$

Si el error y la salida del controlador tienen el mismo rango, -100% a 100%, la ganancia del controlador es la recíproca de la banda proporcional. T_i es el tiempo integral en minutos, también llamado el tiempo de reset, y T_d es el tiempo derivativo en minutos. La siguiente expresión representa la acción proporcional.

$$u_p(t) = K_c e(t)$$

La siguiente fórmula representa la acción integral.

$$u_i(t) = \frac{K_c}{T_i} \int_0^t e(t) dt$$

La siguiente fórmula representa la acción derivativa.

$$u_d(t) = K_c T_d \frac{de(t)}{dt}$$

- **Control Predictivo Basado en Modelo (MPC)**

El controlador predictivo MPC es una técnica que puede ajustar la acción de control antes que el cambio en la salida ocurra.

Se usa el CD Create MPC Controller VI para crear el controlador MPC. Este VI se basa en el modelo de la planta en su forma de Espacios de Estados que se le provee. Se debe proveer la información del horizonte de predicción y horizonte de control.

Horizonte de predicción (Np). El número de muestras en el futuro durante el cual el controlador MPC predice la salida de la planta. Este horizonte es fijado para la duración de la ejecución del controlador.

Horizonte de control (Nc). El número de muestras dentro del horizonte de predicción durante el cual el controlador MPC puede afectar la acción de control.

El valor que se especifica para el horizonte de control debe ser menor que el valor que se especifica para el horizonte de predicción.

Se provee la información usando el MPC Controller Parameter del CD Create MPC Controller VI.

Especificación de la Función de Costo.

El controlador MPC calcula una secuencia de acción de control futura en base a una función de costo minimizada. Se debe especificar matrices de peso en esta función de costo. Estas matrices de peso ajustan las prioridades de la acción de control, la rapidez de cambio de la acción de control y la salida de la planta. Para un horizonte de control y predicción especificado N_c y N_p , el controlador MPC de LabView minimiza la siguiente función de costo $J(k)$.

$$J(k) = \sum_{i=N_w}^{N_p} [\hat{y}(k+i|k) - r(k+i|k)]^T \cdot Q \cdot \hat{y}(k+i|k) - r(k+i|k) + \sum_{i=0}^{N_c-1} [\Delta u^T(k+i|k) \cdot R \cdot \Delta u(k+i|k)] + \sum_{i=N_w}^{N_p} [u(k+i|k) - s(k+i|k)]^T \cdot N \cdot [u(k+i|k) - s(k+i|k)]$$

Donde

k es el tiempo discreto.

i es el índice a lo largo del horizonte de predicción.

N_p es el número de muestras en el horizonte de predicción.

N_w es el inicio del horizonte de predicción.

N_c es el horizonte de control.

Q es la matriz de peso del error de salida.

R es la velocidad de cambio en la acción de control.

N es la matriz de peso del error de la acción de control.

$\hat{y}(k+i|k)$ es la salida predicha de la planta en $t=k+i$, dadas todas las medidas inclusive para $t=k$.

$r(k+i|k)$ es el perfil del set point de salida en $t=k+i$, dadas todas las medidas inclusive para $t=k$.

$\Delta u(k+i|k)$ es la velocidad de cambio predicha de la acción de control en $t=k+i$, dadas todas las medidas inclusive para $t=k$.

$u(k+i|k)$ es la predicha acción de control óptima, dadas todas las medidas inclusive para $t=k$.

$s(k+i|k)$ es el perfil del set point de entrada $t=k+i$, dadas todas las medidas inclusive para $t=k$.

Las matrices Q , R y N se especifican usando el MPC Cost Weights parámetros del CD Create MPC Controller VI.

Especificación de Restricciones

En adición a las matrices de peso en la función de costo, se puede especificar restricciones a los parámetros de un controlador MPC. Recordando que las matrices de peso ajustan las prioridades de la acción de control, tasa de cambio en la acción de control, y salida de la planta. Las Restricciones son límites impuestos a los valores de estos parámetros.

Se usa el CD Create MPC Controller VI para especificar las restricciones.

4. Diseño del Proceso de Control del Túnel de Calentamiento

El diseño del proceso de control de la planta en estudio se lo ha desarrollado siguiendo el orden mostrado en la figura 9.

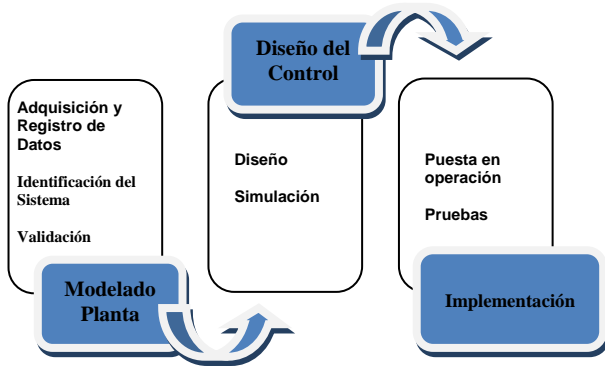


Fig. 9: Secuencia de desarrollo del diseño de control planta

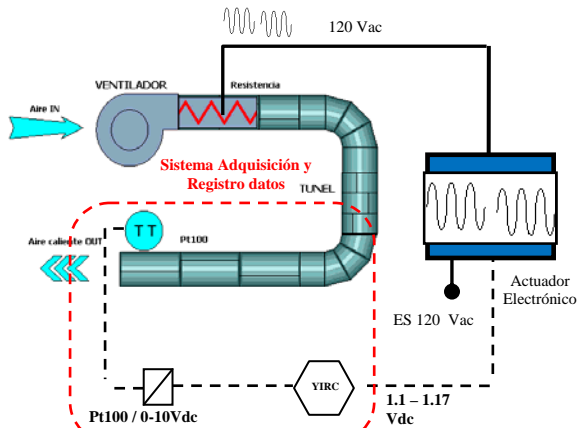


Fig. 10: Diagrama de Instrumentación. P&ID de la planta

La obtención del modelo de la planta en estudio se ha basado en la identificación del sistema basado en un enfoque experimental.



Fig. 11: Modelo de Caja Negra

Una vez que los datos han sido recolectados en el proceso físico por medio del VI RegistroDatos.vi puede que estos no estén en condiciones de ser empleados por algoritmos de identificación. Es por esto que deben ser acondicionados, deben ser chequeados, si los datos obtenidos están de acuerdo al comportamiento de la planta y no existen datos claramente erróneos y procesados a fin de eliminar tendencias y variaciones de baja frecuencia.

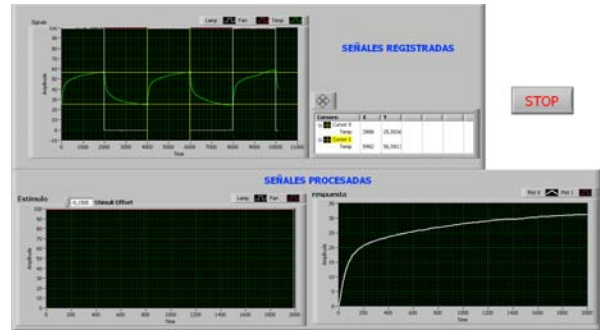
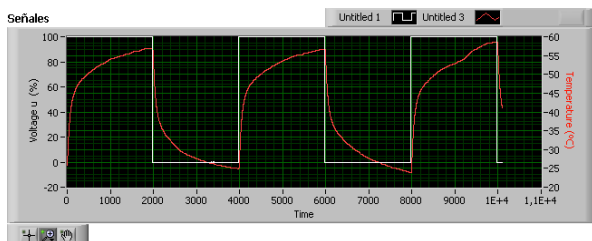


Fig 12: Chequear y procesar datos

Se procede luego a realizar la identificación de la planta.



Fig. 13: Identificación de la planta

El modelo discreto en el espacio de estados o modelo discreto de estado para la planta es:

MODELO MATEMÁTICO PLANTA - SS

$$x(k+1) = \begin{bmatrix} 0,993766 & -9,94755E-18 \\ 2,11504E-18 & 0,529461 \end{bmatrix} x(k) + \begin{bmatrix} -0,000498492 \\ 0,000581399 \end{bmatrix} u(k)$$

$$y(k) = [-3,6211 \quad -2,05301] x(k) + [-7,34096E-5] u(k)$$

De manera general la expresión anterior se puede expresar como:

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k)$$

$$y(k) = Cx(k) + Du(k)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0,993766 & -9,94755E-18 \\ 2,11504E-18 & 0,529461 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} -0,000498492 \\ 0,000581399 \end{bmatrix}$$

$$C = [-3,6211 \quad -2,05301]$$

$$D = [-7,34096E-5]$$

4.1. Es el modelo exacto? Comparación del proceso: simulación y medidas

El problema que encierra la validación es saber si el modelo hallado es lo suficientemente bueno para nuestros propósitos.

Una de las vías que tenemos para validar el modelo es la simulación del mismo. Tomamos la salida real y la comparamos con la salida del modelo para la misma entrada. En el instrumento virtual IDSistemaID SISO.vi se procede a realizar la simulación con el modelo hallado y la respuesta que se obtienen está prácticamente superpuesta.

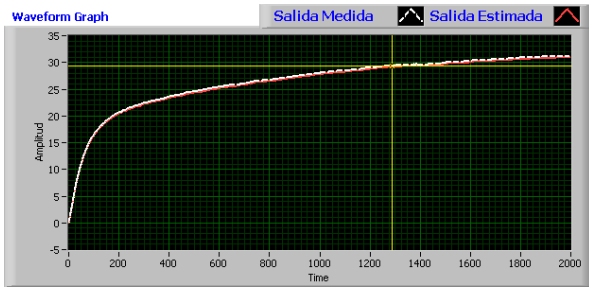


Fig. 14: Validación modelo –salida medida vs salida estimada-

A continuación se presentará los paneles frontales desarrollados para simular e implementar el controlador predictivo de la planta.

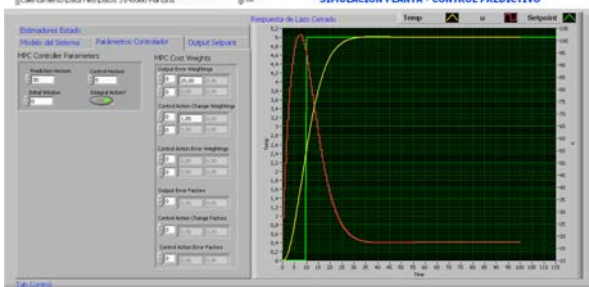


Fig. 15: Simulación parámetros de control óptimos: horizonte de predicción=30, horizonte de control 5, peso error de salida=20 y peso cambios acción de control=1

El panel frontal desarrollado para el controlador MPC y PID son los siguientes.

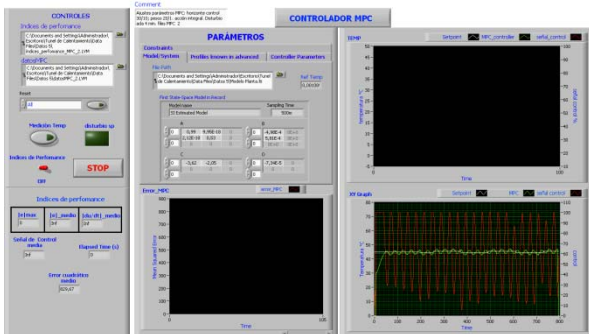


Fig. 16: Diagrama Panel frontal Controlador MPC – MPC_control.vi

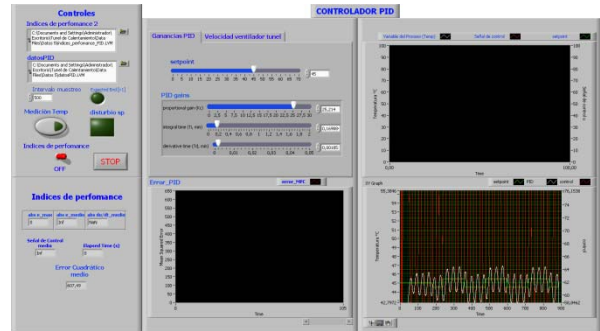


Fig. 17: Panel frontal PID_control.vi

5. Resultados Obtenidos

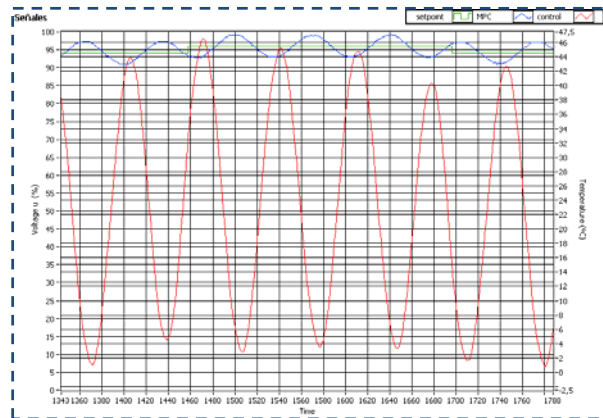


Fig. 18: Respuesta predictiva del controlador MPC

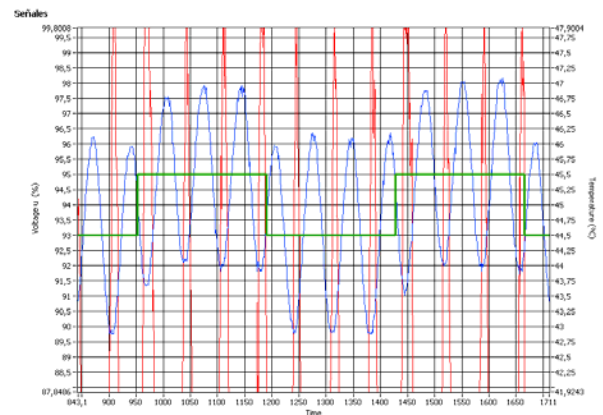


Fig. 19: Respuesta del controlador PID

En la siguiente tabla se resumen los índices de performance de los controladores implementados.

CONTROL ADOR	Indicadores de performance			
	error _max	error _medio	du/dt _medio	u_medio
PID	2,00	1,004	5,822	56,49
MBPC	1,98	0,956	4,68	54,62

Conclusiones

- Una vez realizadas todas las pruebas descritas y observando el comportamiento on-line de los

controladores analizados para esta planta en particular y adquiriendo los datos del comportamiento de la variable controlada, es decir la temperatura del proceso y calculando programáticamente los indicadores de performance o de comportamiento para archivarlos para su posterior análisis off-line, se puede concluir lo siguiente:

2. Se verifica el comportamiento predictivo del controlador MBPC (controlador predictivo basado en modelo). La señal de control toma una acción antes de la variación del setpoint.
3. La señal de la variable controlada presenta un mejor aspecto con respecto a la señal de la del controlador PID.
4. En el controlador PID la acción de control es más fuerte que la acción de control del controlador MPC. La pendiente de aproximación al setpoint de la variable controlada (temperatura en este caso) es mayor para el controlador PID. Esto puede originar alguna pérdida de estabilidad y un mayor sobrepico de la variable controlada, mientras, la aproximación al set point en el caso del controlador MPC es más suave. El tiempo de subida (rise time) es menor para el controlador PID y el tiempo de establecimiento (settling time) es menor para el controlador MPC dando como resultado un mejor seguimiento a la señal de referencia en la cual se está simulando la variación de las condiciones en el proceso. Por lo expuesto se puede indicar que el control PID tendrá un mayor rechazo a los disturbios dada la mayor rapidez con que responde la señal de control.
5. En términos del error el controlador MPC presenta un menor error. El error del controlador PID es aproximadamente 5% superior al error del controlador MPC. Lo cual hace que el controlador MPC sea más preciso en su acción de control.
6. En promedio la señal de control requerida por el controlador MPC es menor a la requerida por el controlador PID. Esto significa un ahorro de energía para nuestro caso de aproximadamente 3,5% que en términos económicos puede ser significativo dependiendo del número de plantas a controlar y del consumo individual de potencia.

Por lo anteriormente expuesto, aunque aproximadamente el 95% de los lazos regulatorios son controlados por controladores clásicos tipo PID (proporcional-integral-derivativo), MPC es la técnica de control avanzado más ampliamente usado en los procesos industriales, con un mercado creciente.

Recomendaciones

Sin embargo, la importancia de los controladores PID no ha disminuido con la amplia adopción de los MPC, dado que estos son comúnmente implementados en el

nivel supervisorio, donde las variables manipuladas de los MPC's son los set-points de los PID's.

Dado que el estudio de los controladores predictivos MPC en nuestro medio es escaso se recomienda se siga impulsando el estudio de este tipo de controladores en los procesos de graduación de la maestría en Automatización y Control Industrial. Por ejemplo implementar un control predictivo para aplicaciones industriales. Lo realizado en este trabajo es meramente académico, en el cual se ha estudiado el comportamiento del controlador MPC en una estructura regulatoria y se ha comparado su comportamiento con un controlador PID. En las aplicaciones industriales los controladores predictivos son normalmente usados en un nivel supervisorio en una estructura de dos capas donde en el nivel regulatorio los típicos controladores continuos son los controladores PID.

Referencias Bibliográficas

MODEL PREDICTIVE CONTROL. Eduardo F. Camacho and Carlos Bordons. (1999). Springer, London.

MODEL PREDICTIVE CONTROL DESIGN FOR INDUSTRIAL APPLICATIONS. Luisella Balbis, Reza Katebi and Andrzej Ordys. University of Strathclyde Graham Hills Building, 50 George Street, Glasgow, UK.

LABVIEW CONTROL DESIGN USER MANUAL. NATIONAL INSTRUMENTS. Junio 2008 – 371057 F – 01.

PID CONTROL TOOLSET USER MANUAL. NATIONAL INSTRUMENTS. November 2001 Edition. Part Number 322192A – 01.

LABVIEW SYSTEM IDENTIFICATION TOOL KIT USER MANUAL. NATIONAL INSTRUMENTS. September 2004 Edition. Part Number 371001b - 01.

A survey of industrial model predictive control technology. S. Joe Qina, Thomas A. Badgwellb, Department of Chemical Engineering, The University of Texas at Austin. 2002.

CONTROL Predictivo: metodología, tecnología y nuevas perspectivas. BORDÓNS ALBA, CARLOS. Aguadulce, Almería: Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática. Universidad de Sevilla, 2000.

System Identification. Söderström, T. & Stoica. Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1989

SISTEMAS DE CONTROL MODERNO: Richard C. Dorf, Robert H. Bishop. Prentice Hall. 2005