

# PID INSTRUMENTED CONTROL ELEMENTS ESTIMATION BASED ON PROBABILISTIC METHODS

Castro Manzano, Andrés Felipe (1) Pérez Careta, Eduardo (2)

<sup>1</sup> [Ingeniería Mecatrónica, Universidad Autónoma de Bucaramanga] | Dirección de correo electrónico:  
[acaastro633unab.edu.co]

<sup>2</sup> [Campus Irapuato – Salamanca, División de Ingenierías, Departamento de Ingeniería Mecánica]

## Resumen

Este proyecto de investigación se centra en la aplicación de métodos predictivos para el diseño de un control PID en un lazo cerrado donde se aplica hidrógenos a la gasolina agria (alta en azufre) para su respectiva hidro-desulfuración (HDS) y sacar el producto final (Gasolina) al mercado. Por medio de la herramienta matemática MATLAB® (MathWorks®) las librerías de MPC (Model Predictive Control Toolbox) mediante una base de datos del comportamiento del sistema.

## Abstract

This research project focuses on the application of predictive methods for the design of a PID control in a closed loop where hydrogen is applied to the sour gasoline (high in sulfur) for its respective hydrodesulphurisation (HDS) and to remove the final product (Gasoline ) to the market. Through the mathematical tool MATLAB® (MathWorks®) the libraries of MPC (Predictive Control Toolbox Model) through a database of system behavior.

## Palabras Clave

MPC, PID, hidrodesulfuración, diseño, gasolina

## INTRODUCCIÓN

### DESTILACIÓN

#### *Formación de mezclas.*

Existen mezclas naturales que se han formado a lo largo del tiempo como es el caso del petróleo y otras que se forman artificialmente por el uso y desecho de sustancias en la industria, como los componentes de las mezclas no están químicamente unidos es posible separarlos, ya que una mezcla es considerada como "la unión física de dos o más sustancias."

Unir físicamente dos o más sustancias, es posible en determinadas circunstancias, podemos mezclar los gases, los líquidos y los sólidos. Resultaría muy difícil, pero no imposible, mezclar completamente un gas con un líquido, esta mezcla está limitada a la solubilidad del gas en el líquido, al igual que la mezcla de un sólido en un líquido que depende de la solubilidad del sólido en el líquido. En el caso de las mezclas de gases y sólidos, esta se lleva a cabo gracias a la porosidad del sólido y la adsorptividad del gas (capacidad del gas para adherirse o pegarse a la superficie del sólido). Para entender mejor el proceso de mezclado es necesario que entendamos la diferencia que hay entre un fenómeno físico y uno químico.

#### *Métodos de separación de mezclas.*

Todos los tipos de mezclas que hay en la naturaleza es posible separarlas para esto se han desarrollado diferentes métodos de separación que dependen del tipo de mezcla y condiciones óptimas para efectuar la operación de tal manera que se obtengan los componentes de la mezcla en forma individual con la mayor pureza posible.

Los métodos de separación de mezclas, llevados a cabo entre las fases líquido-vapor, son los siguientes;

**Destilación:** es el método de separación de mezclas líquidas con componentes de diferentes puntos de ebullición o presiones de vapor, evaporando parcialmente la misma y recuperando la porción evaporada (destilado) por medio de condensación; en este proceso, la fase vapor generada por una fuente de calor se pone en contacto con una fase líquida para efectuar la transferencia de masa del líquido al vapor y del vapor al líquido, es decir, los componentes ligeros (de menor punto de ebullición) se transfieren al vapor y los pesados (de mayor punto de ebullición) al líquido, existiendo los mismos componentes en ambas fases pero con diferentes concentraciones, el vapor más concentrado en ligero y el líquido en pesado.

- **Absorción:** separación de mezclas de gases por medio de un líquido que disuelve y condensa uno de los componentes de la mezcla, es el caso de la separación de la mezcla de amoníaco aire con agua, en donde el amoníaco es disuelto por el agua sin disolver el aire, o la absorción de  $H_2S$  con una solución de di etanolamina (dea), para el endulzamiento del gas ácido.
- **Desorción:** operación inversa a la absorción, esto es, la separación de un gas disuelto en un líquido, del cual se separa, para mezclarse con otro gas; si a la solución de amoníaco con agua la ponemos en contacto con una corriente de aire, parte de éste abandona el agua para mezclarse con el aire.

Los métodos de separación más comunes, llevados a cabo en las fases gas-sólido son:

- **Adsorción:** separación de un componente de una mezcla gaseosa mediante un sólido poroso, el gas separado se condensa y adhiere o pega a las paredes de los poros del sólido; por ejemplo, si una mezcla de aire y vapor de agua (humedad) se ponen en contacto con sílica gel o alúmina activada, el vapor de agua es retenido por el sólido y por lo tanto el aire se seca.
- **Secado o desorción de sólidos:** separación de un líquido de la superficie de un sólido por medio de una corriente de gas, en donde un sólido humedecido con un líquido volátil se expone a una corriente de gas seco que desprende al líquido de las paredes del sólido; dos ejemplos muy comunes son la

regeneración de la alúmina activada, que se utiliza para eliminar la humedad del aire de instrumentos, a la cual se le hace pasar una corriente de aire seco que arrastra la humedad del sólido, dejándolo listo para absorber más humedad; y el secado de la ropa cuando se expone a las corrientes de aire de la atmósfera. La desorción de líquidos es un método similar aplicado a la separación de un gas disuelto en un líquido, por ejemplo, la separación del oxígeno del agua en los deaeradores.

Existen otros métodos de separación menos comunes que los anteriores, pero que en algunos casos son requeridos, entre estos tenemos las operaciones de:

- *Extracción líquida:* separación que se llevan a cabo entre dos fases líquidas insolubles, en este método de separación, la mezcla se pone en contacto con un líquido que disuelve solo a uno de los componentes, pero no a los demás componentes de la mezcla.
- *Cristalización:* separación de mezcla de componentes en fase líquida por medio de la solidificación en forma de cristal de uno de los componentes, debido a sus diferentes puntos de solidificación. La fase líquida restante es obligada a abandonar el sólido (cristal), como es el caso de la cristalización del azúcar.
- *lixiviación:* separación de mezclas de sólidos por medio de un líquido que disuelve uno de los componentes de la mezcla, es el caso de la separación del oro con una solución de cianuro.
- *Extracción por disolvente:* separación de una sustancia líquida en un sólido, en donde un líquido extrae al líquido contenido en una mezcla, como ejemplo tenemos la extracción del aceite de las semillas por medio del hexano.

Además de los métodos de separación descritos en los párrafos anteriores, también existen otros que utilizan una membrana que retiene al componente a separar, como la difusión gaseosa, permeación, diálisis, electro diálisis, osmosis y osmosis inversa. En los procesos de contacto directo de fases miscibles se cuenta con la difusión térmica, difusión de barrido y centrifugación. Como podemos darnos cuenta, existe prácticamente un método de separación por cada tipo de mezcla, el método utilizado en cada proceso, depende de la mezcla a separar, la pureza que se requiera después de la separación y del factor económico.

#### *Fundamentos de destilación.*

En la práctica de los procesos industriales, la destilación es una de las operaciones unitarias más utilizadas, gracias a su efectividad para la separación de las mezclas líquidas ya que después de efectuarse la operación se obtienen productos con purzas cercanas al 100%, además de que el control de la operación resulta relativamente más sencillo con respecto a otros procesos con los que no se puede alcanzar altas purzas.

#### *Principios de destilación.*

Como se mencionó anteriormente, la destilación es el método de separación de mezclas líquidas con componentes de diferentes puntos de ebullición o presiones de vapor, evaporando parcialmente la misma, recuperando la porción evaporada (destilado) por medio de condensación.

En la fig. 2 se ilustra el principio de operación del proceso de destilación tomando como ejemplo una mezcla de pentano y hexano en porciones iguales del 50 % cada una. El punto de ebullición del pentano es de 36.07 °c y el del hexano de 68.74 °c.

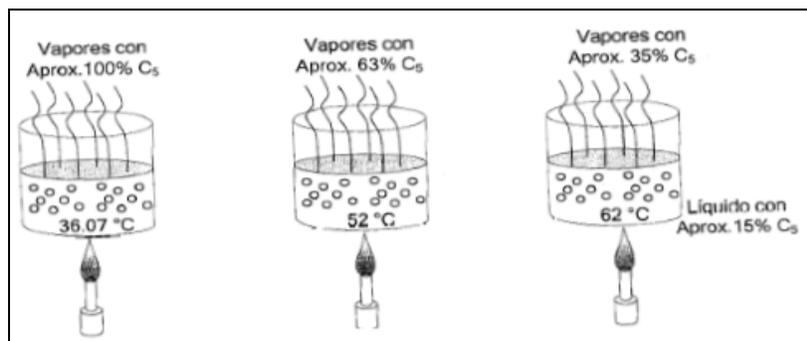


FIGURA 1: Evaporación de una mezcla de pentano hexano.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### ‘MPC (MODEL PREDICTIVE CONTROL)

El Control Predictivo por Modelo (CPM, más conocido como MPC por sus siglas en inglés) es un método avanzado de control de procesos que ha sido utilizado por la industria de procesos en plantas químicas y refinerías de petróleo desde la década de 1980. En años recientes también ha sido utilizado en modelos de estabilidad para sistemas de potencia. Es un conjunto de métodos de control que usan un modelo dinámico de una planta para predecir las futuras acciones de las variables manipuladas sobre las salidas, las que son determinadas para cada instante de muestreo mediante la minimización de una función objeto del error predecido en lazo abierto, en donde solo la primera acción de la secuencia de control óptimo es usada.

- Historia

Hacia la mitad de las décadas de los setentas y ochentas, el MPC se originó en la industria. La primera aparición de una descripción MPC fue realizada por J. Richalet, el “Model Predictive Heuristic Control (MPHC)” se aplicó primeramente en un proceso de destilación de petróleo crudo (IDCOM HIECON software) y su homólogo “Model Algorithmic Control (MAC)”. La corporación Shell Oil Co. (Houston, Texas), Dado por Cuttler y Ramaker presentaron detalles de un algoritmo de control multivariable sin restricciones, que denominaron “Dynamic Matriz Control (DMC)”, la estrategia se popularizó en la industria petroquímica. Se reformulo el DMC por Garcia y Morshedi (1986) se añadió restricciones rígidas en las entradas y salidas, simplificando y reduciendo el esfuerzo computacional “Quadratic Dynamic Matriz Control (QDMC)”.

La segunda fase de desarrollo, en este periodo aparecieron muchas variantes del MPC, en primera instancia para sistemas de una entrada y una salida (SISO), corresponden el “Predictor Based Self Moviment Control” (Peterka, 1984), el “Extended Horizont Adaptive Control (EHAC)”, (Ydstie, 1984); y el “Extended Prediction Self Adaptive Control (EPSAC)”, (Keyse y Van Cuanenbergue 1985). En estos intentos incursionar el Controlador Predictivo Generalizado (GPC), desarrollado por Clarke (1987) Pero por cuestiones de estabilidad y robustez no cumple los requisitos.

La tercera fase la de la década de los 90 denominados SIORC (1990), así como también la CRHPC (Clarke y Scattolini, 1991).

Existen también otras formulaciones de controladores predictivos basados en ideas comunes, por ejemplo, el “Multistep Multivariable Adaptive Control (MUSMAR)”, (Greco et al., 1984); el “Multipredictor Receding Horizon

Adaptive Control (MURHAC)", (Lemos et al., 1985); el "Predictive Functional Control (PFC)", (Richalet et al., 1987); o el "Unified Predictive Control (UPC)", (Soeterboek, 1992).

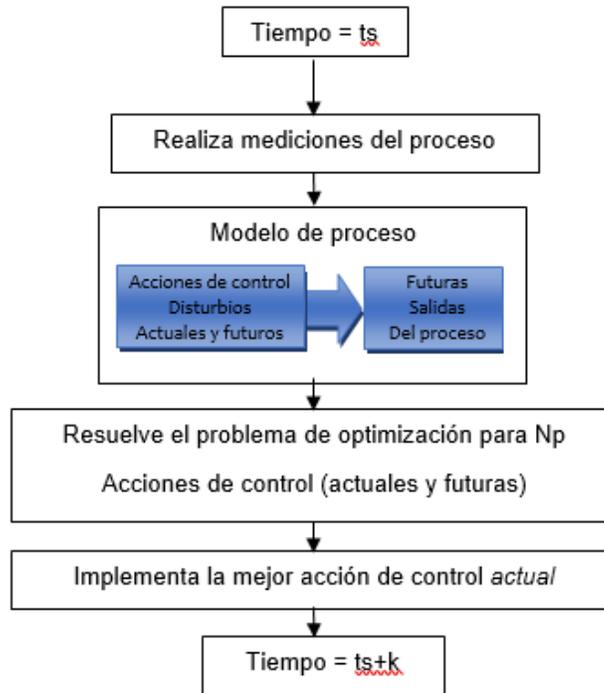


FIGURA 2: Esquema básico de un MPC.

La metodología pasada es la usada para los controladores de la familia MPC.

El modelo que se usara para predecir debe reglejar el comportamiento de la planta con sus respectivas restricciones y perturbaciones. Hay muchos modelos usados para la formulación del MPC: Modelo de respuesta al impulso, respuesta al escalón, espacio de estados, basados en función de transferencia, en región lineal o seudolineal. Etc.

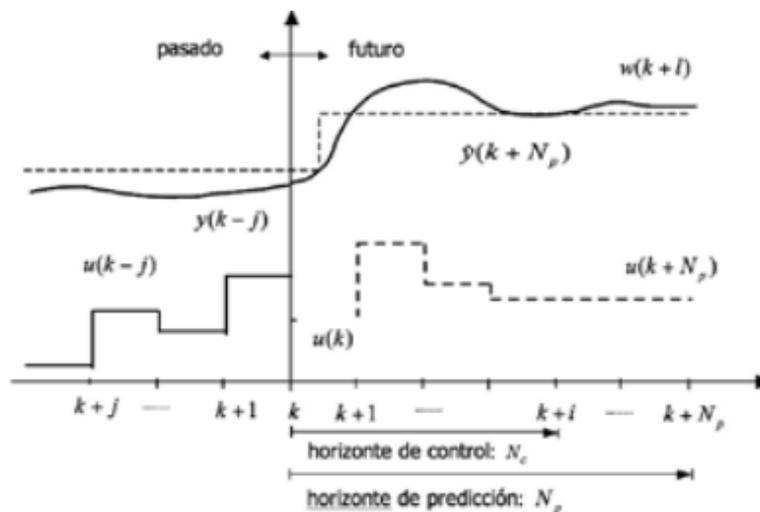


FIGURA 3: Evaluación temporal de una variable de control predictivo.

## Formula general

Según la ley de control predictivo (Camacho y Bardons, 1995)

- A. Datos de entrada y salida del proceso en estado actual y pasado  $u(k), u(k-1), \dots, u(k-n)$  y  $y(k), y(k-1), \dots, y(k-n)$  donde se representan los instantes según el tiempo de muestreo
- B. Determinar la trayectoria generada por el "Set-Point"  $w(k+l)$
- C. Predicción de la salida del proceso en base al modelo, sobre el horizonte  $N_p$ , en ausencia de futuras acciones de control. Estas se obtienen por los instantes  $k+l$  dados por el tiempo de muestreo, donde  $k$  es el origen de predicción y la ecuación sería  $y(k+l/k)$ , para  $l = 1, \dots, N_p$ .
- D. Actualización del error de predicción, usando las salidas medidas, en donde  $y_m(k)$  es comparado con la salida predicha:  $e(k) = y_m(k) - y(k/k)$
- E. Cómputo de una secuencia de control que utilice el modelo del proceso para satisfacer alguna función objetivo que considere:
  - La minimización del desvío de la salida predicha del proceso con relación a la trayectoria de referencia a lo largo del horizonte de predicción.
  - La minimización del esfuerzo de control para que la salida predicha del proceso se aproxime a la referencia.

## Controlador DMC (Dynamic Matrix Control)

Con la respuesta escalón al sistema se obtendría un modelo lineal, obteniéndolo de los primeros  $N_p$  términos, asumiendo que es estable sin integrador. Se utiliza un horizonte de control menor al de predicción. Para sistemas SISO sería una salida:

$$y(t) = y_0 + \sum_{i=1}^{\infty} h_i \cdot u(t-i)$$

Donde  $h_i$  es la respuesta al escalón unitario.

Se generaliza hasta donde es el horizonte de predicción:

$$y(t) = \sum_{i=1}^{N_p} h_i \cdot u(t-i)$$

Y la salida anterior:

$$y(t-1) = \sum_{i=1}^{N_p} h_i \cdot u(t-1-i)$$

Si las restamos

$$y(t) = y(t-1) + \sum_{i=1}^{N_p} h_i \cdot \Delta u(t-i)$$

La salida predicha para los instantes futuros  $t = k+l$  ( $l=1, \dots, N_p$ ) se calcula en el instante actual  $k$ :

$$\hat{y}(k+l/k) = \hat{y}(k+l-1/k) + \sum_{i=1}^{N_p} h_i \cdot \Delta u(k+l-i/k)$$

Hay una corrección constante dada por la predicción en todos los instantes k del horizonte.

$$y^c(k+l/k) = \hat{y}(k+l/k) + \hat{e}(k)$$

$$\hat{e}(k) = y_m(k) - \hat{y}(k/k)$$

En donde:

$y^c(k+l/k)$ : predicción corregida,

$y_m(k)$ : medida actual de la salida de planta,

$\hat{y}(k/k)$ : valor predicho por el modelo

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con la toma de datos obtenida del sistema Delta-V instalado en los bunkers se logró generar una función de transferencia que emula el sistema en caja negra, como objeto esencial del MPC ya que necesita un modelo del comportamiento se obtuvieron:

Quemador 440PIC42

$$Gz = \frac{1.829e-10 z^2 + 1.829e-10 z + 1.754e-18}{z^3 - 2 z^2 + z + 2.549e-24}$$

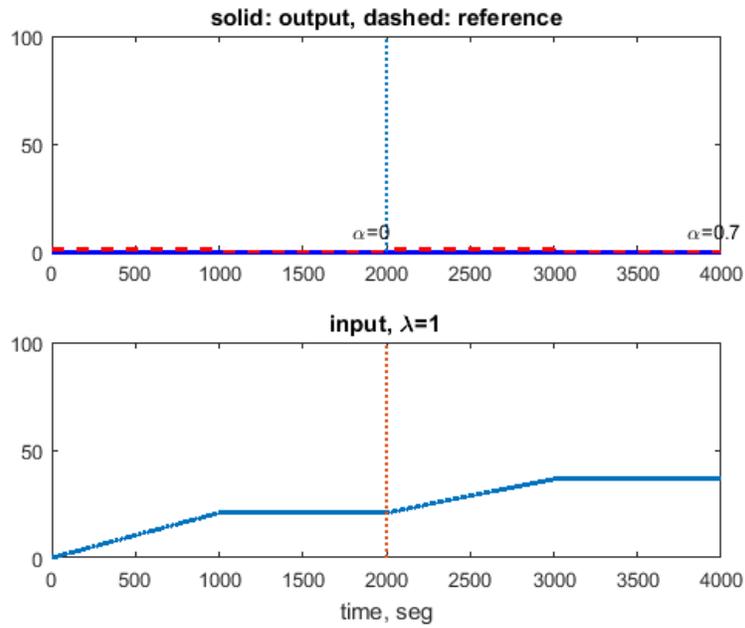
Quemador 440PIC46

$$Gz = \frac{-0.002345 z + 0.002346}{z^2 - z - 1.11e-16}$$

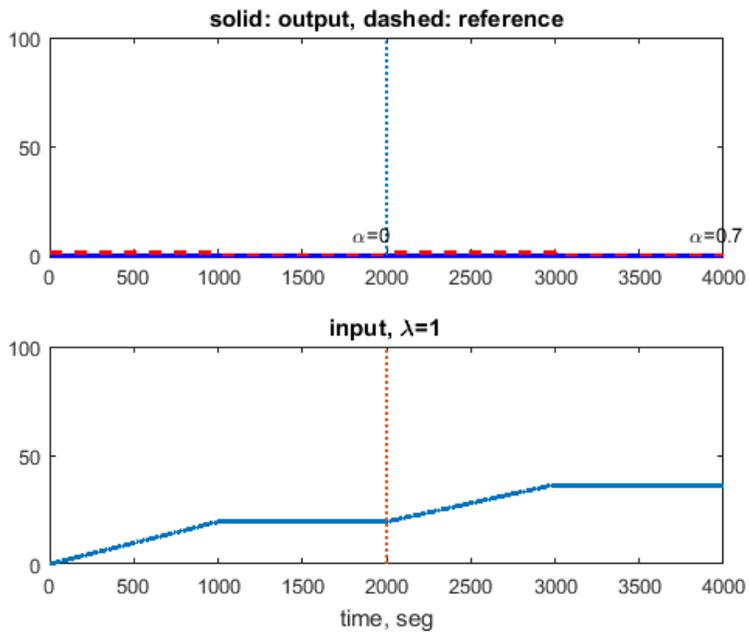
Estas se convierten en ecuación de diferencias para poder relacionar las entradas y salidas del sistema para anexarlo al algoritmo del MPC.

Después de aplicar el MPC seleccionado, o sea se DMC (Dynamic Matrix Control) se logro obtener las siguientes respuestas a la predicción.

Quemador 440PIC42



Quemador 440PIC46



## CONCLUSIONES

- Mediante el modelo DMC se logró generar el control predictivo del setpoint para la planta
- La acción de control se comporta estable a pesar de posibles perturbaciones al sistema y no se satura o inestabiliza.
- El tiempo que demora en ejecutarse depende del horizonte predictivo y de control además del ancho de control, como el proceso es de temperatura no funciona tener estos valores que generen acciones de control rápido por eso las regiones mencionadas son de valores pequeños.
- El modelo predictivo necesita un modelo matemático del sistema, es parte fundamental y es el que deja lograr mostrar si se predice o no el setpoint.

## AGRADECIMIENTOS

Ing. Eduardo Pérez Careta (Docente y acompañante en el procedimiento de elaboración de proyecto además de fondos financieros para el correcto sistema de seguridad para acceder a la Refinería Antonio M. Amor. Y adquisición de datos de la planta. Acceso al bunker norte) Ing. Joaquín Gómez Martínez (Operario de la planta de proceso de destilación atmosférica, apoyo con la información necesario para el entendimiento del proceso a realizar al crudo y como llegar al corte de gasolina agria. Acceso al bunker sur)

## REFERENCIAS

1. Cao, Y. (8 de Abril de 2008). *Mathworks*. Obtenido de Mathworks: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/19479-mpc-tutorial-i-dynamic-matrix-control>
2. Pemex. (2 de Septiembre de 2016). *Pemex*. Obtenido de Pemex: [http://www.pemex.com/saladeprensa/boletines\\_regionales/Paginas/2016-059-salamanca.aspx#.W1glq9JKJIW](http://www.pemex.com/saladeprensa/boletines_regionales/Paginas/2016-059-salamanca.aspx#.W1glq9JKJIW)