

MODELADO DE PLANTA DE HIDROGENACIÓN DE ACEITE DE PIROLISIS

Parte de la Información contenida en este documento fue extraída de la investigación desarrollada por los ingenieros:

Ing. Del Frari, Fabrizio German

Ing. Carrazana Gimenez, Rodrigo Federico

(Publicación realizada con la autorización de los autores)

INTRODUCCIÓN

Dada la crisis energética que existe en la actualidad, es común ver como el uso de las energías renovables o “energías verdes”, van tomando de a poco la importancia que se merecen. Es por esto que existen instituciones que utilizan sus recursos en investigar y mejorar este tipo de energías.

Como por ejemplo el IKFT (Institut für Katalyseforschung und –technologie), perteneciente al Intitut für Technologie der Karlsruher en la ciudad de Karlsruhe, Alemania, en el cual se llevan a cabo investigaciones científicas sobre la hidrogenación de los aceites de pirolisis, parte fundamental en el estudio de biocombustibles. Para este proceso se utiliza una planta piloto que trabaja con hidrogeno y aceite de pirolisis (preveniente de biomasa) en diferentes catalizadores con amplio rango de temperatura y presión (150 a 400 °C 200 a 450 bares) así como en diferentes relaciones gas/liquido (100 a 400 Nml de hidrogeno por 1 ml de aceite de pirolisis).

El proyecto tiene como objetivo mejorar un sistema de control preexistente mediante la simulación de un modelo matemático de la planta, teniendo como finalidad lograr una estabilidad en los valores de presión y caudal del reactor, obteniendo estabilidad en los valores de presión y temperatura. Con esto tendremos un mejor rendimiento en la reacción química, y una mayor seguridad en general.

RESUMEN

En este proyecto se desarrolla un modelo matemático de un sistema de válvulas de 2 etapas ya existente en una planta piloto de Hidrogenación de aceite de pirolisis. El sistema de válvulas es el que permite la salida del fluido de la planta.



SISTEMAS DE CONTROL

INGENIERO VAZQUEZ (TEORÍA) / INGENIERO LAUXMANN (PRÁCTICA)

<http://frt.cvg.utn.edu.ar> -> Ingeniería Electrónica -> 5to. Nivel -> Sistemas de Control

A través de la modelización de la planta se obtiene un sistema de control, que manipula el ciclo de trabajo de dichas válvulas con el objetivo de controlar el flujo de salida. Así también con el modelo se puede visualizar las velocidades máximas del flujo (golpe de ariete), responsable de la inestabilidad en presión y temperatura.

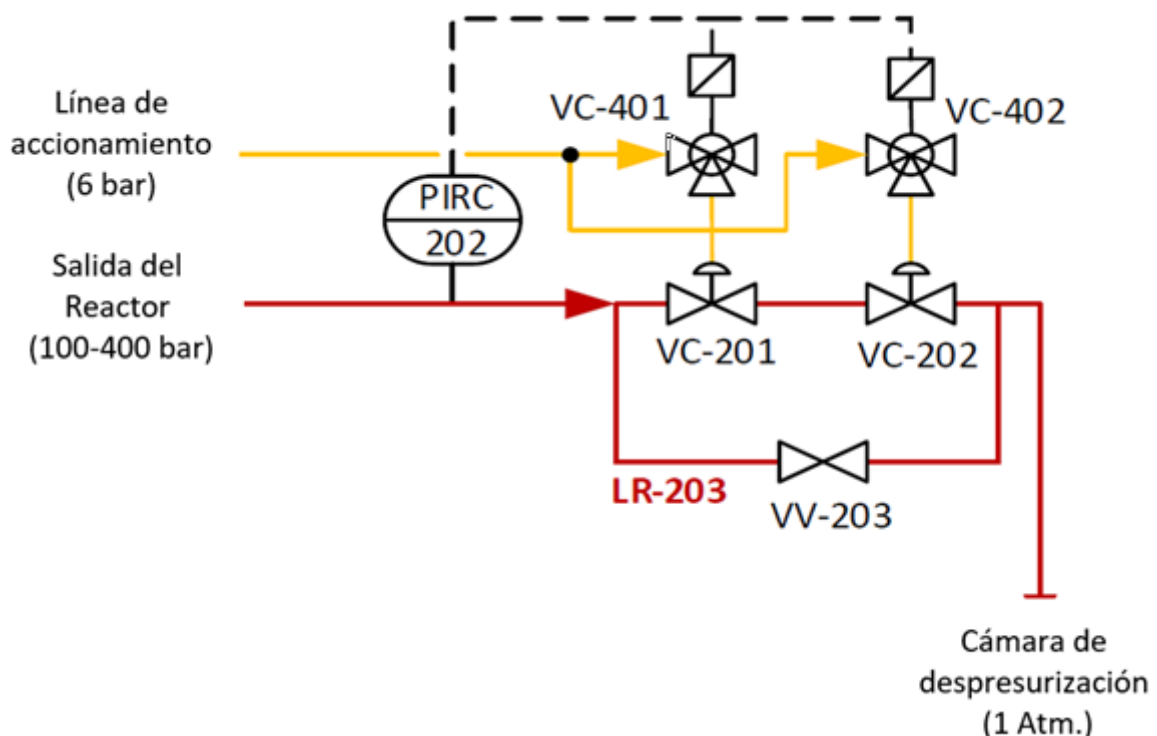
El modelo matemático es una simplificación de la planta que describe el flujo másico en las válvulas que interconectan dos tanques. Siendo uno la representación de la planta y el otro la etapa intermedia del sistema de dos etapas. Debido a la complejidad de las conexiones y forma de la planta, sumado a que la misma trabaja con un flujo bifásico, el mismo tiene variables que no se puede calcular de forma exacta. Por esta razón se realiza una aproximación al comportamiento real mediante comparaciones entre experimentos reales y simulaciones del modelo matemático. Obteniendo así de forma empírica dichas variables para lograr una respuesta que se asemeje más a la realidad de la planta.

Mediante las simulaciones del modelo, se consigue la configuración óptima del sistema de 2 etapas y la respuesta del flujo másico según los ciclos de trabajo del sistema de válvulas.

ESTADO Y FUNCIONAMIENTO ORIGINAL DEL SISTEMA

La planta actualmente trabaja con un sistema de control de presión de dos etapas.

La primera es donde está la presión a controlar (lado de alta presión), la segunda es la etapa intermedia que está conectado a la cámara de alta presión por la válvula neumática VC-201. A su vez, esta está conectada a la última cámara que es la de despresurización (lado de presión atmosférica) a través de la válvula neumática VC-202. La válvula progresiva VV-203 es un Bypass del sistema.



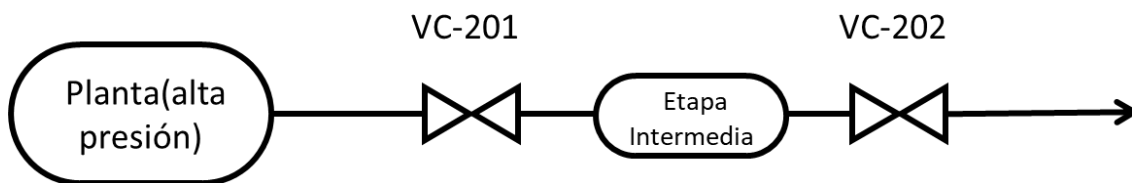
Las válvulas VC-201 y VC-202 son controladas de manera electrónica por las válvulas electro neumáticas Festo VC-401 y VC402 .
respectivamente y accionadas por un sistema neumático de 6 bar de presión.

SISTEMAS DE CONTROL

INGENIERO VAZQUEZ (TEORÍA) / INGENIERO LAUXMANN (PRÁCTICA)

<http://frc.cvg.utn.edu.ar> -> Ingeniería Electrónica -> 5to. Nivel -> Sistemas de Control

Con el fin de simplificar la explicación del funcionamiento original de la planta vamos a tomar a la misma como un tanque de un volumen X y a la cámara intermedia como un pequeño tanque de volumen X/10.



Consta de un ciclo de trabajo de carga y descarga de la etapa intermedia.

La variable de control de este sistema es únicamente la presión. Cuando los sensores de presión sobrepasan los valores permitidos, VC-201 se abre logrando así que ambas cámaras se conecten y generando un movimiento de masa equivalente al volumen de cada una.

En este ejemplo aproximadamente una décima parte de la masa de mueve a la etapa intermedia hasta que las presiones se igualan, produciendo es este caso ideal, la baja de aproximada del 10% de la presión en la cámara de alta presión, el ciclo de carga termina con el cierre de VC-201.

El ciclo de descarga comienza con la apertura de VC-202, donde la etapa intermedia se conecta con la etapa de despresurización. De esta manera se amortigua la descarga del fluido y la etapa intermedia queda liberada para el próximo ciclo de carga. Este ciclo quede terminado con el cierre de VC-202.

PROBLEMAS A RESOLVER EN EL SISTEMA ORIGINAL

El sistema original de 2 etapas normalmente se usa para situaciones donde las presiones no sean mayores a los 100 bar y las diferencias de presión sean menores a 0.02, de acuerdo a lo sugerido en los documentos sobre el tema *Modelling of a two-stage high-pressure gas reduction station* [1].

$$\frac{P1 - P2}{P1} < 0,02$$

El problema con la planta actual es que teniendo en cuenta lo sugerido, nos encontramos trabajando con presiones en el rango de los 150 a 400 bar, por lo tanto, superamos el rango máximo permitido para el sistema de 2 etapas.

$$\frac{P1 - P2}{P1} = \frac{150.400 \text{ bar} - 1}{150.400 \text{ bar}} \cong 1$$

Esta condición está relacionada con el flujo critico que se forma debido a la aceleración del flujo por la diferencia de presión entre cámaras. En el sistema real esto se traduce como grandes fluctuaciones en la presión de la planta que conllevan a una inestabilidad térmica de la misma.

La planta posee un reactor de *cama goteante*, en el cual la velocidad del flujo es un tema central, ya que en ellos se necesita un régimen del flujo que es determinado por la velocidad de los fluidos para

así obtener una mejor reacción.

Este régimen se conoce como “Régimen burbujeante “. Si tomamos un flujo y comenzamos a aumentar su velocidad, comenzara como flujo laminar, si este se sigue aumentando hasta sobrepasar el número de Reynolds comenzara el flujo turbulento. Este régimen burbujeante se encuentra al entre comienzo del flujo turbulento y el fin del flujo laminar. [2] *Flow regime transition and liquid distribution in a 3D cocurrentdownflow three-phase moving bed.*

FLUJO BIFÁSICO:

Los flujos que se manejan en esta planta son de 3 tipos.

El flujo gaseoso que proviene de un compresor Maximator con presión regulable (H2).

El flujo líquido que proviene de una bomba de alta presión Sitec de caudal regulable. Estos se juntan en un punto previo al reactor donde se forma un flujo bifásico (mezcla de gas y liquido).

En la salida del reactor y entrada del sistema de 2 etapas en ocasiones se puede tener un flujo trifásico por la pequeña desintegración del catalizador (gas, líquido y solido). Este flujo tiene la particularidad de ser heterogéneo, con variaciones internas de las propiedades intensivas a lo largo de planta. De esta forma se convierte en un flujo impredecible de forma matemática e inestable en el control mecánico fino, por ejemplo, las válvulas progresivas tienen un comportamiento errático inversamente proporcional a el área de paso de las mismas.

Este problema impide usar pasos calibrados para la limitación del flujo en el sistema de control de presión de forma efectiva y en ocasiones el bloqueo de las mismas. Esto ocurre debido a que la densidad de un líquido y un gas es muy diferente. Teniendo en cuenta estas condiciones, si aplicamos a la ecuación para obtener el caudal de la válvula que nos da el fabricante *Dimensionierung von Hochdruckventilen mit dem Durchflusskoeffizient [3] (Kv)* obtendremos:

$$Q = Kv * \left(\frac{(\Delta P)}{\delta} \right)^2$$

Donde:

Q = Flujo volumetrico

Kv = Coeficiente de Flujo de valvula

ΔP = Diferencia de presión en la valvula

δ = Densidad

Si hacemos el análisis para el caudal sobre una misma válvula en la cual primero solo atraviesa un gas de hidrogeno, cuya densidad es 0,089 Kg/m³ y comparamos ese resultado con el caudal sobre la válvula, pero con glicerina, cuya densidad es 1260 Kg/m³, obtendremos que:

$$\frac{Q_{hidrogeno}}{Q_{glicerina}} = 14157$$

Descripción del proyecto

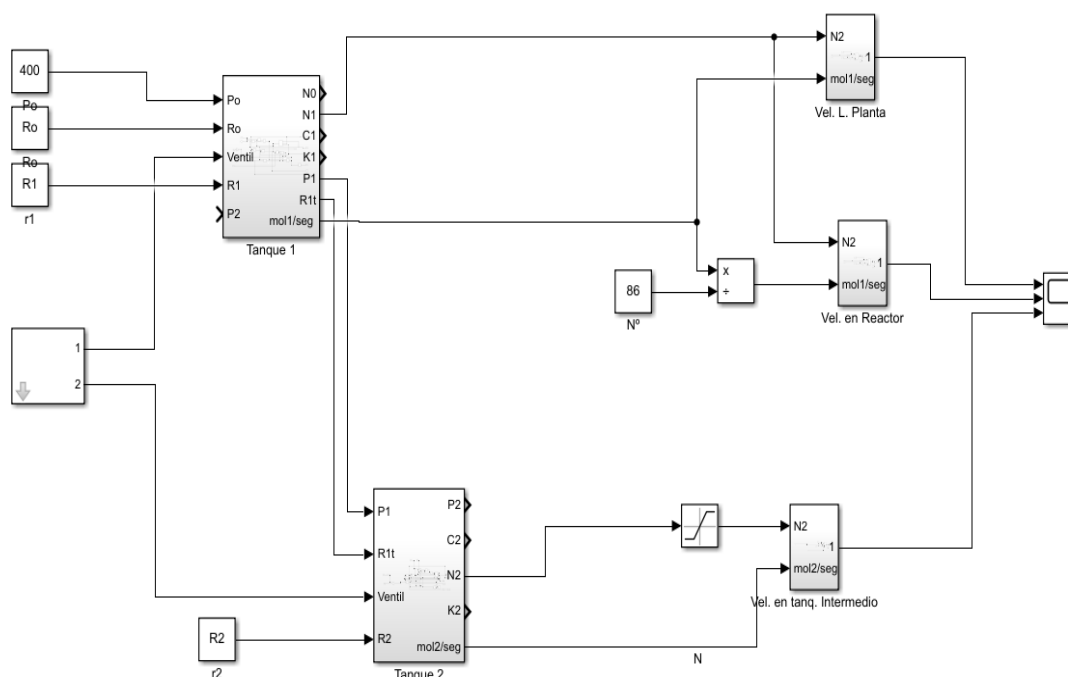
El proyecto se basa en la creación de un modelo matemático que represente nuestra planta de estudio, con la finalidad de obtener mediante la simulación del mismo los parámetros en los cuales realizar las modificaciones en la planta real. Logrando así una mejora de los problemas del sistema original.

Dada la imposibilidad de realizar mediciones directas dentro del reactor por el flujo Bifásico y la complejidad de las interconexiones en el mismo, se optó por realizar un modelo matemático de la planta simplificado que trabaje solo con gas y luego realizar una aproximación empírica al comportamiento con flujo bifásico. Esto se decidió porque el gas como fluido es más complejo en cuanto a sus cálculos por la variación de densidad según la presión. Si bien la complejidad del modelo gaseoso es superior a la de un modelo líquido, el comportamiento del flujo gaseoso en el sistema es más cercano al real. Por lo tanto, realizar la aproximación del modelo gaseoso al bifásico, sería agregar la variable líquida en el mismo circuito de gas. Teniendo en cuenta que el caudal del flujo líquido es impuesto por la bomba Sitec de alta precisión y que el fluido líquido (aceite de pirolisis, glicerina, glicol, etc.) se puede considerar incompresible. Sería una cuestión de ajustar volúmenes, velocidades y resistencia en las fórmulas ya utilizadas.

Modelado en Simulink

Se seleccionaron sólo algunos modelos y gráficas del documento original.

Este modelo puede realizar las simulaciones modificando las presiones, resistencias de válvulas, ciclos de cierre de válvulas, volúmenes, temperatura, etc. y poder ver la respuesta en la velocidad en el fluido de la planta. De esta forma hallar las modificaciones necesarias para lograr un buen control del flujo y regulación de presión.



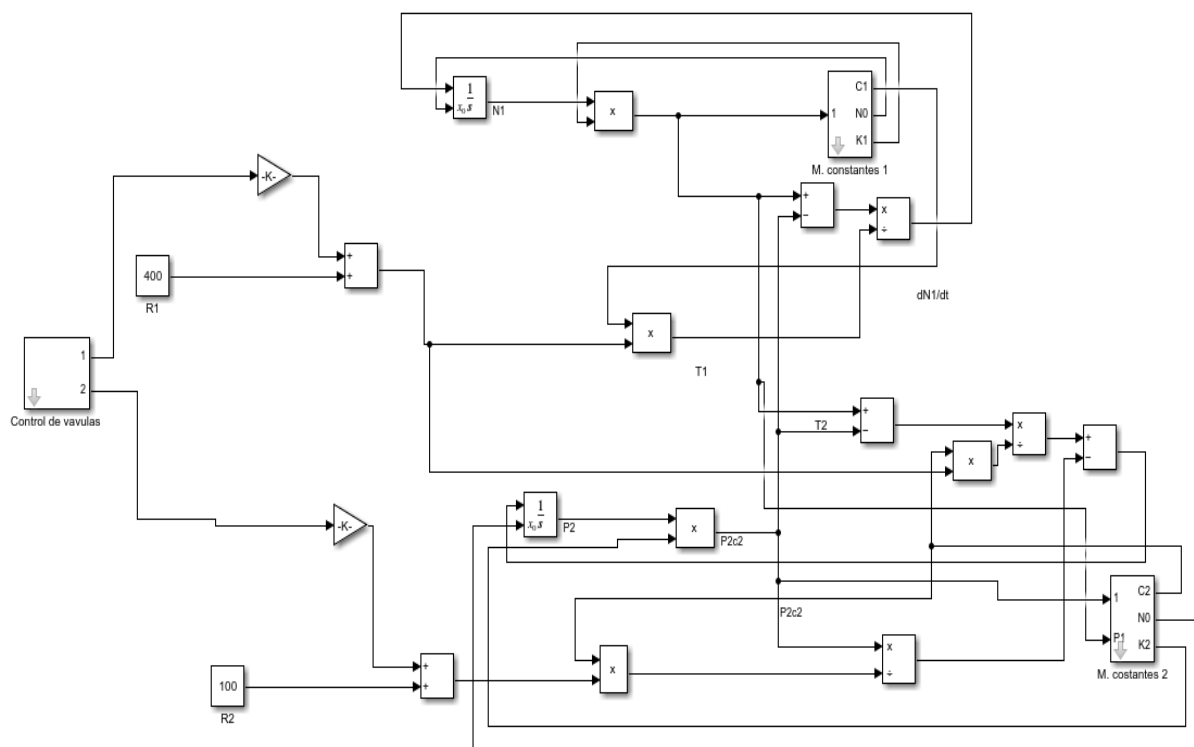
Modelo Final realizado en Simulink.

SISTEMAS DE CONTROL

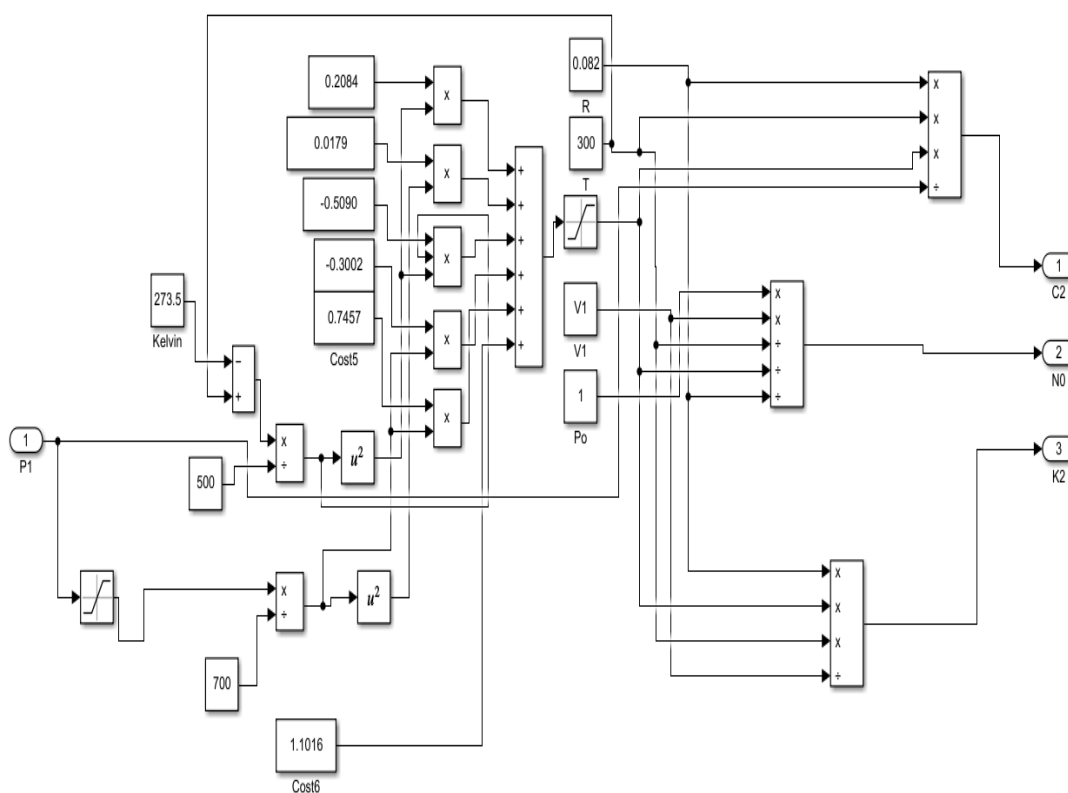
INGENIERO VAZQUEZ (TEORÍA) / INGENIERO LAUXMANN (PRÁCTICA)

<http://frc.vcg.utn.edu.ar> -> Ingeniería Electrónica -> 5to. Nivel -> Sistemas de Control

MODELADO DE PLANTA DE HIDROGENACIÓN DE ACEITE DE PIROLISIS IDENTIFICACIÓN DE FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DESCONOCIDA



Segundo modelo realizado en simulink para la carga y descarga de 2 tanques.

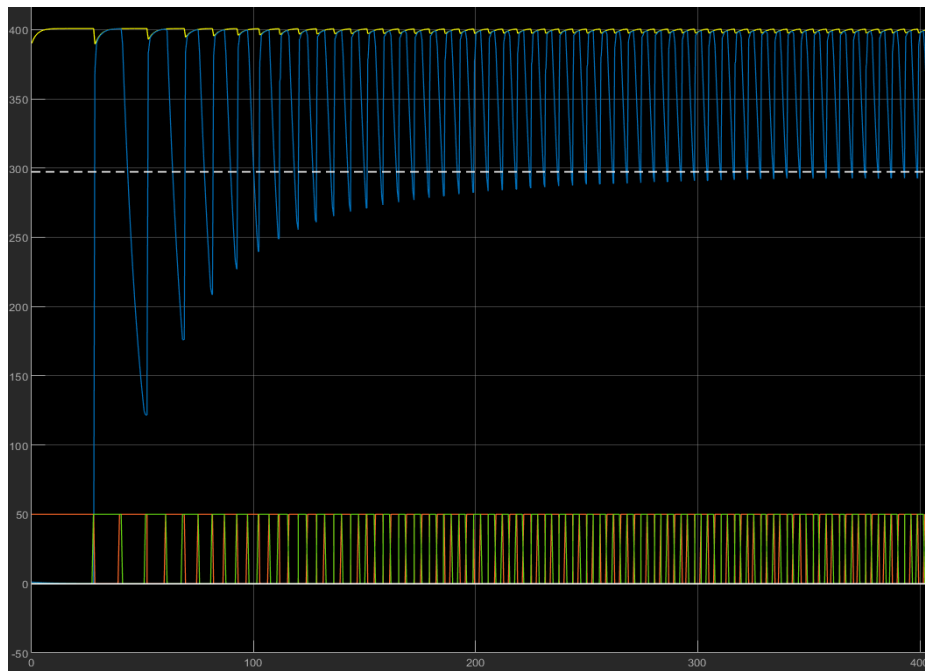


Módulo de constantes generado en simulink.

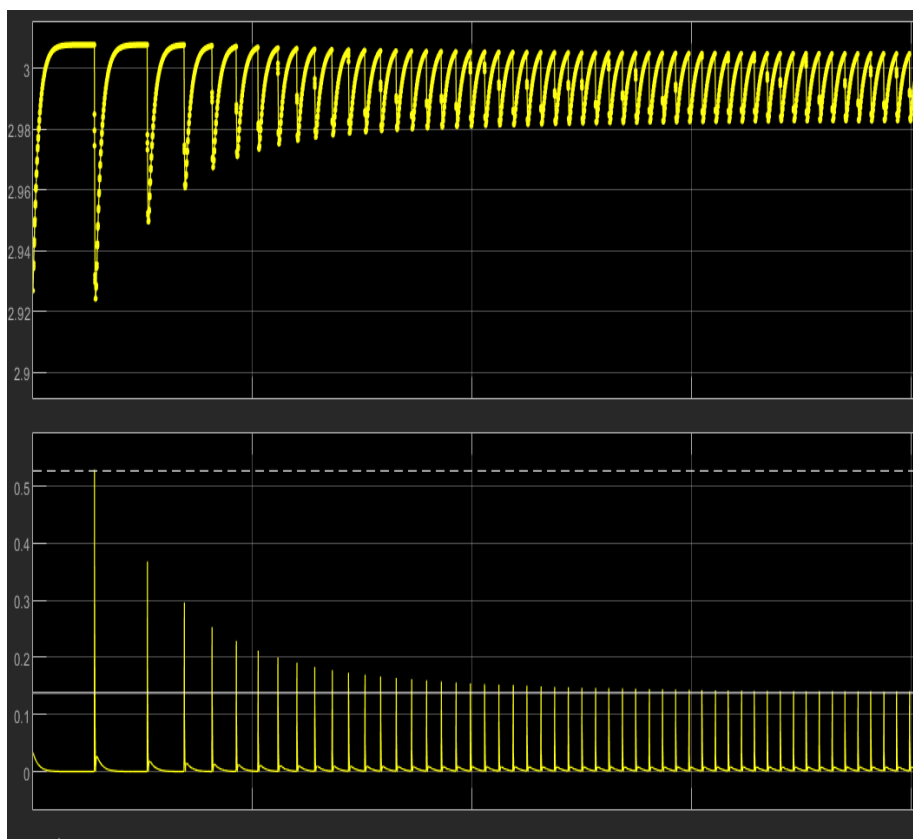
SISTEMAS DE CONTROL

INGENIERO VAZQUEZ (TEORÍA) / INGENIERO LAUXMANN (PRÁCTICA)

<http://frt.cvg.utn.edu.ar> -> Ingeniería Electrónica -> 5to. Nivel -> Sistemas de Control



Variación de presión en los tanques (arriba) en función de la variación de los ciclos de válvulas (abajo))



Grafica Velocidad del flujo en las valvulas de salida

Se puede observar que los golpes se redujeron a un cuarto del valor, de 0,527 mol/seg. a 0,138 mol/seg. Por lo tanto, una posible solución al problema.

Análisis de los resultados individuales y general según la integración de partes y funcionamiento integral.

Los resultados de los experimentos que se realizaron fueron ricos en información. La planta actualmente tiene un sensor de temperatura y presión colocados antes de sistema de 2 etapas y un medidor de flujo a la salida de la etapa de despresurización. Por lo tanto, solo se puede sensar la variación de presión y temperatura antes de las 2 etapas con un muestreo de 1 seg aproximadamente. En cuanto al flujo de salida, este tiene un retraso y limitación mayor, porque la etapa de despresurización amortigua la señal y el sensor satura hasta los 1300 Lts/h. Debido a la gran velocidad y el corto tiempo de los golpes, es muy difícil y costoso medir directamente estas variables.

El Sistema de control de presión de la planta pudo simularse con un error porcentual inferior al 0,01%. Por lo tanto, la lógica del modelo como su aproximación matemática fueron exitoso. Este permite obtener estas variables con el muestreo que ofrece Simulink, de esta manera visualizar los flujos de masa, velocidades en el reactor, presión en el tanque intermedio, etc.

La información que nos aporta la simulación nos ayuda a probar cambios previos a realizarlos en la planta real, con el fin de poder anticiparnos a los resultados para así ahorrar tanto tiempo y dinero si lo deberíamos probar de manera practica en planta.

| | (Tiempo Real) | Presion Real (Pa) | Presion de Simulacion (Pa) | Error Absoluto | Error Porcentual |
|----|---------------|-------------------|----------------------------|----------------|------------------|
| 1 | 13:52:44 | 403,78 | 403,78 | 0,00 | 0,00000 |
| 2 | 13:52:48 | 389,94 | 389,86 | 0,08 | 0,00021 |
| 3 | 13:52:52 | 377,15 | 377,86 | 0,72 | 0,00190 |
| 4 | 13:52:57 | 365,39 | 366,13 | 0,74 | 0,00201 |
| 5 | 13:53:01 | 354,05 | 354,95 | 0,91 | 0,00256 |
| 6 | 13:53:05 | 343,27 | 344,21 | 0,94 | 0,00273 |
| 7 | 13:53:09 | 333,13 | 334,02 | 0,90 | 0,00269 |
| 8 | 13:53:13 | 323,43 | 324,12 | 0,70 | 0,00216 |
| 9 | 13:53:17 | 314,21 | 314,79 | 0,58 | 0,00184 |
| 10 | 13:53:22 | 305,72 | 305,62 | 0,11 | 0,00035 |

Tabla comparativa entre valores de presión Real tomadas en planta mediante sensores y valores arrojados por la simulación.

CONCLUSIONES

Gracias a la simulación de nuestra planta de estudio, se llegó a la conclusión de que la solución para mejorar el problema de la inestabilidad térmica debido a los golpes de ariete, es agregar una 3ª etapa. Esta tendría la función de bajar la presión del taque intermedio hasta 300 bar. De esta manera se demostró la baja de los golpes de ariete en un 83%, siendo esta una mejora notable en la estabilidad del sistema.

Bibliografía:

- [1] *Modelling of a two-stage high-pressure gas reduction station.*
- [2] *Flow regime transition and liquid distribution in a 3D cocurrentdownflow three-phase moving bed.*
- [3] *Dimensionierung von Hochdruckventilen mit dem Durchflusskoeffizient Kv)*

FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DESCONOCIDA

COMANDO IDENT

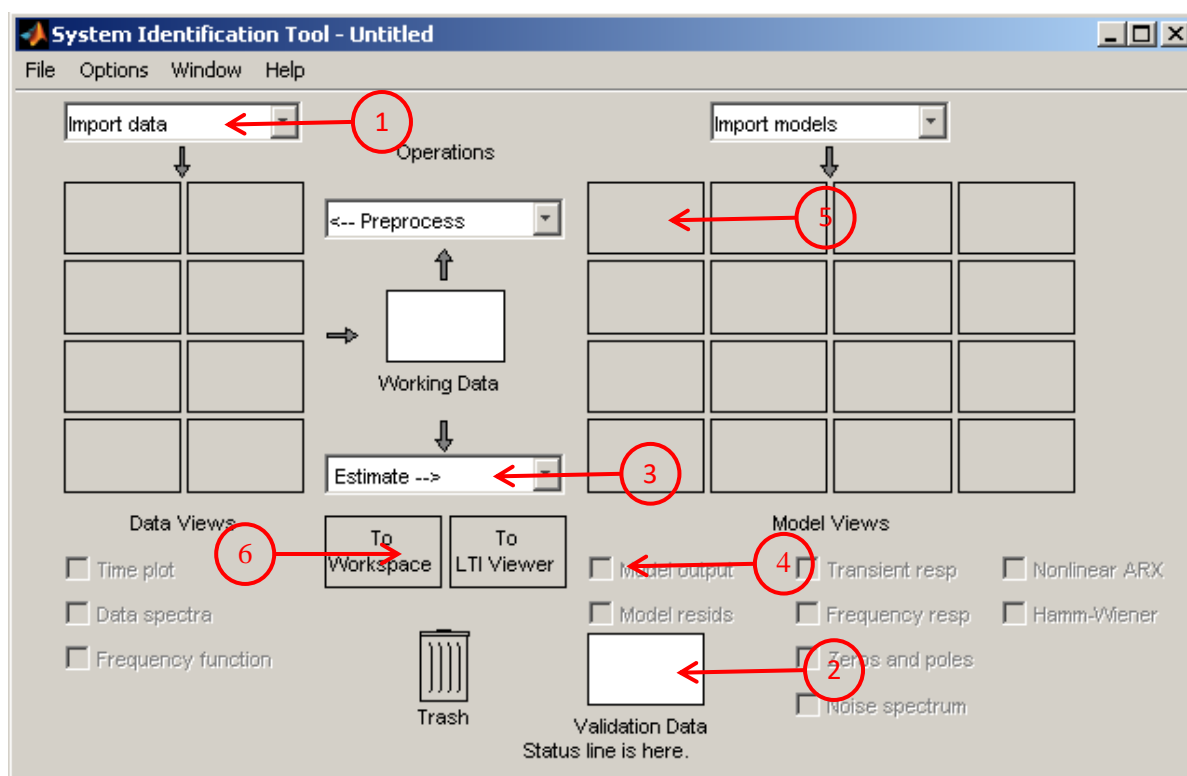
Si no se cuenta con la función de transferencia del sistema, Matlab tiene una herramienta para poder encontrar la función de transferencia a través de datos experimentales.

Es necesario aclarar que se deberá contar con dos tablas de datos idénticas en longitud, donde la primera corresponda a los datos ingresados al sistema bajo prueba y la segunda los valores obtenidos a la salida.

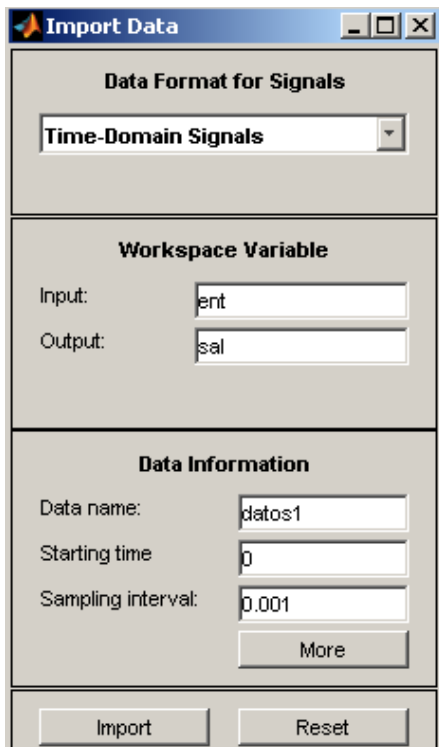
La herramienta a usar es SYSTEM IDENTIFICATION TOOLBOX de Matlab, y para lanzarla se deberá escribir en la línea de comandos:

>>ident

Se abrirá una pantalla como la siguiente



En (1) seleccionar **Time domain data...**



Import Data

Data Format for Signals

Time-Domain Signals

Workspace Variable

Input: ent

Output: sal

Data Information

Data name: datos1

Starting time: 0

Sampling interval: 0.001

More

Import Reset

Ingresar los siguientes valores

Input: ent

Output: sal

Data name: (tabla de datos experimental)

Starting time: 0

Sampling interval: (tiempo en que se tomó cada dato de la tabla)

Luego pulsar en el boton **Import**

En el campo (2) **Validation Data** verificar que figure el nombre que se ha dado a los datos en **Data name**.

Pulsar en (3) y elegir **Transfer Function Models...**

Transfer Functions

Model name: tf1

Number of poles: 3

Number of zeros: 0

☒ Continuous-time ☐ Discrete-time (Ts = 0.001)

► I/O Delay

▼ Estimation Options

| | Minimum | Maximum |
|----------------------|---------|-----------|
| Fit frequency range: | 0 | 3141.5927 |

☒ Display progress

☒ Estimate covariance

Initial condition: zero

Initialization method: n4sid

Estimate Close Help

Completar los siguientes campos:

Number of poles: (número de polos estimados)

Number of zeros: (número de ceros estimados)

Initial condition: zero

Initializarion method: n4sid (este es el más común)

Los números de polos y ceros deberían estimarse en base a lo que se estudió durante el cursado de la materia y los cuales podrían corresponder a un sistema de primer, segundo o tercer orden.

Tildar la opción (4) **Model output** y verificar que la correspondencia entre la señal experimental y la señal creada por la función de trasferencia sea superior al 99%.

Arrastrar y soltar la función **tf1** ubicada en (5) hasta la posición (6) **To Workspace**

tf1 es la FTLC (función de transferencia de lazo cerrado) de nuestro sistema

La función de transferencia de la planta se puede hallar realizando con el siguiente comando:

```
>>G=minreal(tf1/(1-tf1));
```