



**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**

**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID**

**ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES**

**Grado en Ingeniería en electrónica industrial y automática**

**Título del TFG**

**Control de una planta piloto de  
intercambio de calor**

**Autor:**

**Gordo Martín, Juan Manuel**

**Tutor:**

**De Prada Moraga, Cesar  
Ingeniería de sistemas y  
automática**

**Valladolid, julio de 2016.**



## Resumen

Se pretende simular el comportamiento de una planta piloto en fase de construcción en el laboratorio de automática antes de su puesta en marcha, para así poder observar el funcionamiento previo que nos puede ofrecer la planta y observar los resultados obtenidos, comprobando el dimensionamiento de la planta y su comportamiento dinámico como un paso previo a su construcción. De esta forma, si los resultados no son los esperados se puede modificar los componentes y así conseguir los resultados que esperamos.

Para comprobar el dimensionamiento y las características dinámicas un buen método es la simulación de la planta, ya que nos permite realizar pruebas, aunque la planta no esté construida y ensayar de forma rápida una amplia variedad de ensayos.

Además, se realizarán diferentes estrategias de control para probar su comportamiento dinámico y controlabilidad, realizándose la sintonía y la simulación de los correspondientes controladores.

La simulación previa a la construcción de la planta, es algo fundamental pero previamente a la simulación hay que modelar el sistema.

Para la simulación y modelado se utilizan un software moderno, EcosimPro basado en programación orientada a objetos.

## Palabras claves

- Simular.
- Modelar.
- EcosimPro.
- Estrategias de control.
- Reactores químicos.



## Índice

1. Introducción.....	7
1.1. Tipos de reactores químicos .....	7
1.2. Descripción de la planta piloto .....	10
2. Objetivos.....	13
3. Modelado del reactor .....	15
3.1. Planteamiento de las ecuaciones: .....	15
3.2. Introducción a EcosimPro .....	19
3.3. Simulación del modelo obtenido y resultados .....	20
4. Estrategias de control .....	27
4.1. Control de temperatura.....	27
4.2. Control de caudal.....	27
4.3. Control de temperatura en la camisa .....	28
4.4. Control en cascada para la temperatura del reactor.....	29
4.4.1. Control en cascada tipo 1.....	34
4.4.2. Control en cascada tipo 2.....	36
4.4.3. Control en cascada tipo 3.....	39
4.5. Control Feedforward.....	40
4.6. Control de concentración .....	44
4.7. Control por desacoplo.....	45
5. Sintonía de controladores PID .....	49
5.1. Introducción a los controladores PID.....	49
5.2. Métodos de sintonía .....	52
5.3. Conclusiones .....	54
6. Simulaciones .....	55
6.1. Simulación de control de temperatura en el reactor .....	55
6.2. Simulación de control de caudal.....	56
6.3. Simulación de control de temperatura en la camisa .....	58

6.4.	Simulación de control en cascada para la temperatura del reactor .....	60
6.4.1.	Control en cascada tipo 1.....	60
6.4.2.	Control en cascada tipo 2.....	63
6.4.3.	Control en cascada tipo 3.....	64
6.5.	Simulación de control Feedforward.....	66
6.6.	Simulación de control de concentración.....	68
7.	Conclusiones.....	71
	Bibliografía .....	73
	Anexo 1: Código del modelado del reactor.....	75
	Anexo 2: Código del control de temperatura .....	79
	Anexo 3: Código del control de temperatura en la camisa.....	83
	Anexo 4: Código del control de caudal .....	87
	Anexo 5: Código del control en cascada tipo 1 .....	91
	Anexo 6: Código del control en cascada tipo 2 .....	97
	Anexo 7: Código del control en cascada tipo 3 .....	101
	Anexo 8: Código del control Feedforward .....	105
	Anexo 9: Código del control de concentración .....	109

# 1. Introducción

En este trabajo se pretende simular el comportamiento una futura planta piloto para el departamento de ingeniería de sistemas y automática, esta futura planta se usará para impartir clases como por ejemplo control de procesos y realizar investigación en control y supervisión de procesos. Cuenta con instrumentación, como son sensores de temperatura y caudal, y en ella se puede explicar estrategias de control para plantas industriales y así el alumno puede practicar y diseñar estas estrategias en esta planta, con este trabajo se pretende modelar y simular esta planta para observar su funcionamiento y posibles mejoras para hacer a la planta antes de construirla para así poder cambiar lo que haga falta antes de construirla. Esta planta es un reactor químico. A continuación, se explica en que consiste un reactor químico, los tipos que hay, y la instalación particular de la planta piloto.

Los reactores químicos son recipientes generalmente cilíndricos, como es nuestro caso, en los que se pueden realizar operaciones continuas o discontinuas, en el interior se produce la reacción y dependiendo si es exotérmica o endotérmica, genera calor o necesita calor para llevar a cabo la reacción, en nuestro caso estamos simulando una reacción exotérmica es decir desprende calor y por tanto se necesita introducir un refrigerante para mantener su temperatura.

Los reactores químicos pueden ser con tanque agitado o no, en nuestro caso es de tanque agitado, lo cual nos simplifica los cálculos a la hora de modelar el sistema, porque las propiedades del interior como por ejemplo la temperatura son iguales a las de la salida, puesto que es homogéneo en todo su interior.

Se suele utilizar encamisados para enfriar la reacción, en el encamisado se introduce agua fría, esta agua se calienta por la transferencia de calor que se produce por medio de la camisa.

## 1.1. Tipos de reactores químicos

Hay muchos tipos de reactores químicos los más importantes son los de tanque agitado y los de lecho. Los reactores químicos de tanque agitado pueden ser:

- **Reactor continuo de tanque agitado:**

Sus aplicaciones son para reacciones muy sensibles a la temperatura, para reacciones lentas, para reacciones en fase líquida o con sólidos en suspensión. Las ventajas que ofrece son operación en estado estacionario, elevadas capacidades de tratamiento, si la reacción es

completa no es necesario etapas de separación, en cambio tenemos el inconveniente de que si la velocidad de reacción es baja en el interior se necesita un elevado volumen. En la figura 1.1 podemos observar una fotografía de este tipo de reactor



Figura 1.1: Reactor continuo de tanque agitado.

- **Reactor discontinuo de tanque agitado:**

Su aplicación es para la industria farmacéutica o alimentaria. Las ventajas que tiene este tipo de reactor son la versatilidad es decir que el mismo reactor puede emplearse en la obtención de distintos productos, y que los tiempos de reacción pueden ser tan elevados como se quiera. Los inconvenientes que tiene son elevados volúmenes del reactor y pequeña capacidad de producción. En la figura 1.2 podemos observar la forma que tiene este tipo de reactor



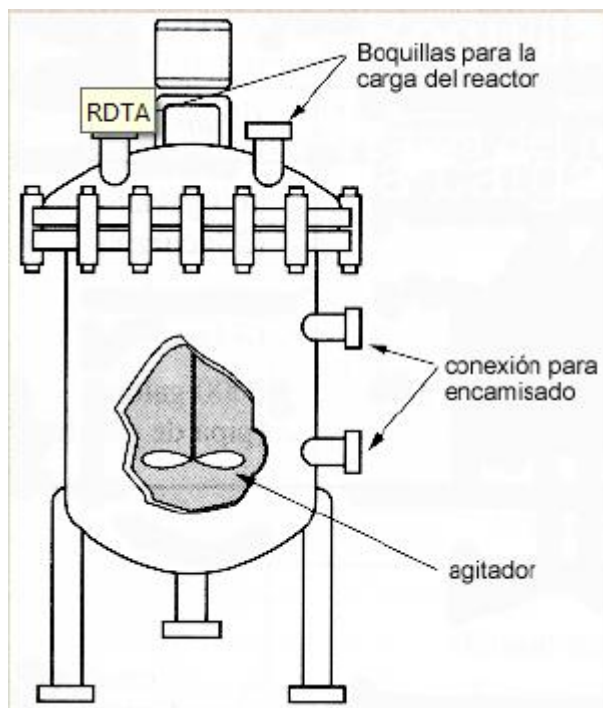


Figura 1.2: Reactor discontinuo de tanque agitado.

A parte de los dos reactores comentados arriba, tenemos otro tipo que son los reactores continuos tubulares, en que la reacción progresa a medida que los productos avanzan a lo largo del reactor. Estos 3 son los reactores más utilizados en la industria. Como nuestro reactor es tanque agitado y no tubular por eso este último caso no entramos en detalle con él.

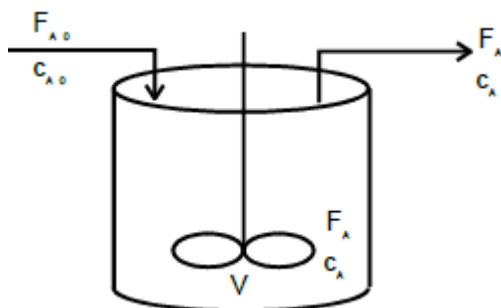


Figura 1.3: Esquema de un reactor químico de tanque agitado.

En la figura 1.3 tenemos un esquema de un reactor químico de tanque agitado, como ya hemos dicho antes en su interior es donde se produce una reacción química, le entran unos productos y sale o salen unos reactivos. Los aspectos a tener en cuenta de los reactores químicos son:

- Reacción química.
- Transferencia de materia.
- Transferencia de calor.

- Transferencia de la cantidad de movimiento.

Estos cuatro aspectos son los que tendremos que tener en cuenta a la hora de modelar el reactor, pero como obtener las ecuaciones serán análisis del punto 3.

## 1.2. Descripción de la planta piloto

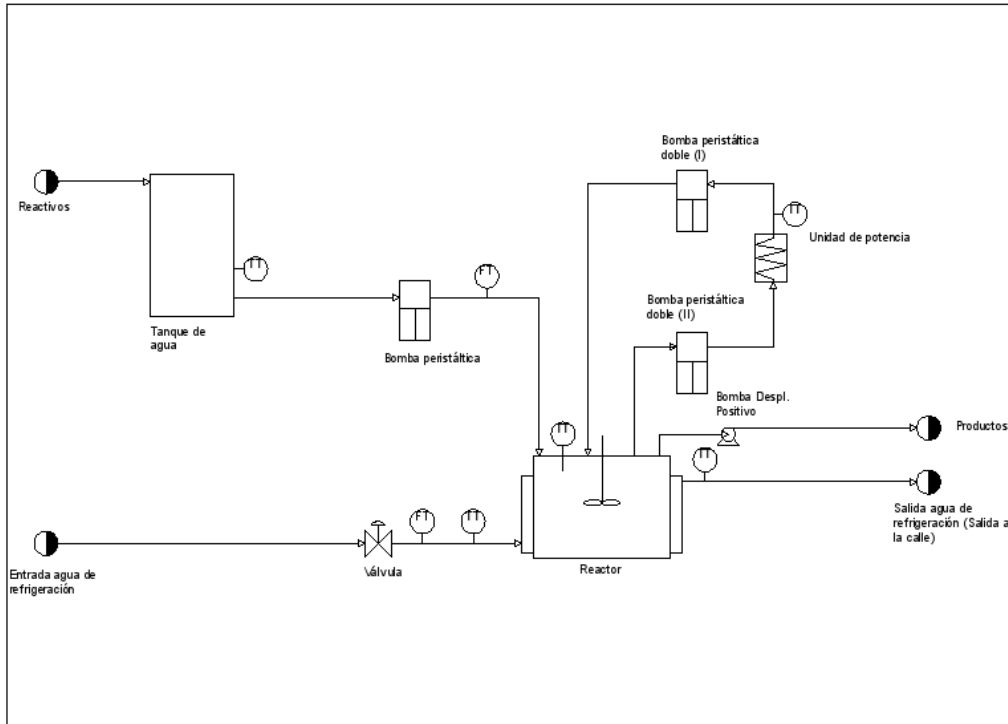


Figura 1.2.1: Diagrama P&ID de la planta.

En la figura 1.2.1 tenemos el diagrama P&ID (Diagrama de proceso e instrumentación) de la planta, tenemos como elemento principal un reactor de tanque agitado. Tiene una camisa de refrigeración por la que circula agua que permite evacuar el calor generado en la reacción química.

Dado que la planta piloto se quiere usar tanto para enseñanza como para investigación, es conveniente que tenga características flexibles de modo que se pueda operar con una amplia variedad de reacciones químicas. Al mismo tiempo al ser una planta que está situada en el laboratorio de ingeniería de sistemas y automática en las instalaciones de Alfonso VIII donde se carece de las condiciones de seguridad requeridas para este tipo de procesos se ha optado por una opción mixta que combina un reactor físico real con la simulación de los efectos de la reacción química en lo que se conoce como plantas piloto de reacción simulada. En estas plantas se utiliza agua como producto sin que tenga lugar una verdadera reacción química pero sus efectos

de desprendimiento de calor tienen lugar realmente utilizando unas resistencias eléctricas que generan el mismo calor que hubiera generado la reacción química de haberse llevado a efecto. De este modo se evita el uso de productos químicos mientras que todo el funcionamiento energético del reactor tiene lugar en condiciones reales.

En el esquema de la figura 1.2.1, aparte del reactor tenemos un tanque donde almacenamos el agua que introducimos al reactor por medio de una bomba peristáltica. Tenemos también una válvula para manipular el caudal que entra en la camisa, este líquido será el encargado de enfriar el líquido del reactor. En la parte superior del diagrama puede verse el sistema utilizado para simular la reacción química que consta de una unidad de potencia, constituida por 3 resistencias, por donde circula el fluido se calienta y entra al reactor, este fluido le manipulamos a través de una bomba peristáltica doble, impulsa el fluido que sale de la camisa pasa por las resistencias y después la bomba peristáltica le impulsa al reactor de nuevo, este circuito es un circuito cerrado coge agua lo calienta y lo vuelve a introducir. Para sacar el líquido del reactor y llevarlo a la calle se utiliza una bomba de desplazamiento positivo.

Para poder realizar estrategias de control tenemos que tener sensores para poder medir las variables que nos interesan y así aplicar el control adecuado para que dicha variable o variables estén en el valor deseado.

Para medir las variables contamos con 7 sensores, 5 de temperatura y 2 de caudal. Los sensores de temperatura están situados, en el reactor, en la entrada y en la salida del flujo de la camisa, en el flujo que entra en la unidad de potencia y por último en el depósito del agua de entrada de la calle. Los sensores de caudal están situados en el flujo que entra al reactor del depósito, y en el flujo que entra a la camisa.

Tenemos que tener en cuenta que el nivel de líquido que tenemos en el reactor es algo fundamental en nuestra planta, como no disponemos de un sensor de nivel para mantener siempre un determinado nivel lo que se hace es colocar el tubo de salida en la parte superior del reactor y en vez de colocar el tubo al fondo le colocamos a cierta altura para que, aunque no introduzcamos líquido de entrada, no se pueda vaciar el reactor.

Otra consideración a tener en cuenta es que el flujo de líquido que entra en la camisa del reactor es igual al que sale.

Otra consideración importante es que por motivos de seguridad la unidad de potencia eléctrica solo pueda dar 9 KW.

En control de procesos son muy importantes las variables controladas y las variables manipuladas, respecto a las variables manipuladas, son las variables

que modificamos para que las variables controladas estén en los valores deseados, y en nuestras plantas tenemos las siguientes:

- La apertura de la válvula de flujo de refrigerante.
- La velocidad de giro de la bomba peristáltica de flujo de reactivo.
- La velocidad de giro de la bomba peristáltica doble.
- La potencia que suministra la unidad de potencia.

Respecto a las variables controladas, son las variables que estamos midiendo en cada momento mediante sensores, y que queremos que estén en el valor deseado, en nuestra planta tenemos las siguientes:

- La temperatura del reactor.
- La temperatura del flujo de salida del refrigerante.
- La temperatura del flujo de entrada al reactor.
- La temperatura de entrada de refrigerante.
- La temperatura del líquido de salida de la unidad de potencia.
- El caudal de líquido que entra a la camisa.
- El caudal del líquido que entra al reactor.

## 2. Objetivos

En este trabajo se aborda la simulación de una planta piloto que se quiere montar en el laboratorio del departamento de Ingeniería de sistemas y automática, con este trabajo se analizará los resultados de dicha planta para ver si los resultados que va a proporcionar esta planta son los adecuados o hay que cambiar algunos componentes para poder tener mejores resultados.

El modelado y simulación se lleva a cabo mediante un software llamado EcosimPro. Además de analizar los resultados se implementarán estrategias de control que se llevarán a cabo en esa planta para comprobar su correcto dimensionamiento y controlabilidad, porque lo que se pretende posteriormente con esta planta es la enseñanza de la asignatura de control de procesos para futuros alumnos de este grado, y que puedan conocer más de cerca aparatos de instrumentación utilizados en la industria y programar estrategias de control aprendidas durante la carrera en dicha planta.

Por tanto, los objetivos del proyecto son:

- Entender el funcionamiento del proceso.
- Realizar un modelo matemático dinámico del proceso.
- Dominar el lenguaje de simulación de EcosimPro.
- Realizar la simulación dinámica del proceso y comprobar su funcionamiento.
- Diseñar diversas estructuras de control de la planta.
- Realizar la sintonía de los controladores.
- Simular y comprobar el funcionamiento de las estructuras de control escogidas.



### 3. Modelado del reactor

En este apartado describiremos el modelo matemático que se ha usado en la simulación. En concreto el modelo se desarrollará para el caso de una reacción química en la que un mol del producto genérico A dan lugar a un mol del producto deseado B.

En el desarrollo del modelo se usarán los principios de conservación de masa y energía y otras leyes particulares del dominio de aplicación

#### 3.1. Planteamiento de las ecuaciones:

En este apartado se va a ir poniendo las ecuaciones y porque para modelar el reactor.

La nomenclatura que hemos utilizado es la siguiente:

Variable	Unidades	Descripción
T	°C	Temperatura del reactor
T <sub>r</sub>	°C	Temperatura de la camisa
Ca	Mol/l	Concentración de producto A que no reacciona
C <sub>ai</sub>	mol/l	Concentración de entrada del producto A
T <sub>ro</sub>	°C	Temperatura del flujo de refrigeración
T <sub>k</sub>	K	Temperatura del reactor en grados kelvin.
F <sub>i</sub>	l/min	Flujo de reactivo
K	s <sup>-1</sup>	Constante denominada factor preexponencial, con esta constante dependiendo si la reacción es de orden cero, uno o dos, va a tener unas unidades u otras. En nuestro caso va a ser de orden cero.
F <sub>r</sub>	l/min	Flujo de refrigerante.

Fres	l/min	Flujo que entra a las resistencias.
Tres	°C	Temperatura del líquido que sale de las resistencias.
E	KJ	Energía de activación

La conservación global de masa, como el nivel es constante implica que el caudal de entrada es igual al de salida.

La conservación de masa del producto A conduce a la siguiente ecuación (5) donde los distintos términos representan la acumulación de producto A en el reactor, la entrada por unidad de tiempo del producto A, la salida por unidad de tiempo del producto A y la cantidad que reacciona por unidad de tiempo convirtiéndose en producto B.

$$V \cdot \frac{dCa}{dt} = Fi \cdot (Cai - Ca) - V \cdot K \cdot e^{\frac{-E}{Rr \cdot T}} \cdot Ca \quad (1)$$

En la ecuación 1 cada término significa:

- $V \cdot K \cdot e^{\frac{-E}{Rr \cdot T}} \cdot Ca^2 \rightarrow$  Este término es la cantidad de producto A que se convierte en B por unidad de tiempo.

A continuación, aplicaremos el primer principio de la termodinámica al reactor, y a la camisa, por lo que sacamos dos ecuaciones. Tomando como nuestro volumen de control la camisa, suponemos que la temperatura es constante en la camisa, obtenemos:

$$mr \cdot Cer \frac{dT_r}{dt} = Fr \cdot \rho \cdot Cer \cdot Tro - Fr \cdot \rho \cdot Cer \cdot Tr + UA(T - Tr) \quad (2)$$

En la ecuación 2 cada término significa:

- $UA(T - Tr) \rightarrow$  Este término es la transferencia de calor desde el reactor a la camisa por unidad de tiempo que es proporcional a la superficie de intercambio y a la diferencia de temperaturas.
- $Fr \cdot \rho \cdot Cer \cdot Tr \rightarrow$  Este término es el calor por unidad de tiempo del refrigerante que sale de la camisa.
- $Fr \cdot \rho \cdot Cer \cdot Tro \rightarrow$  Este término es el calor por unidad de tiempo que aporta el refrigerante que se mete a la camisa.
- $mr \cdot Cer \frac{dT_r}{dt} \rightarrow$  Este término es la acumulación de calor que tenemos en la camisa, que varía según el tiempo.

Para obtener el coeficiente de intercambio de calor, U, utilizamos la siguiente ecuación:



$$U = 0.074 + 19.82 * Fr \quad (3)$$

La fórmula 3 se obtuvo de manera experimental, y Fr es el flujo que entra en la camisa. Para obtener este coeficiente se ha medido el caudal que le entramos a la camisa, la temperatura del reactor, y la temperatura de entrada y salida de la camisa, se ha introducido agua en el reactor a una temperatura, y se ha ido variando el flujo de entrada, se saca una gráfica del coeficiente U en función del flujo de refrigerante y con esa gráfica se obtiene la ecuación de arriba.

Ahora tomamos como volumen de control el reactor sin el encamisado, aplicamos el primer principio también, suponemos que al ser un reactor agitado la temperatura en todo el reactor es constante, y la ecuación que obtenemos es la siguiente:

$$m \cdot C_e \cdot \frac{dT}{dt} = W_i \cdot C_e \cdot T_{in} - W_i \cdot C_e \cdot T - U \cdot A \cdot (T - T_r) + Q_r \quad (4)$$

Cada término de la ecuación 4 significa:

- $Q_r \rightarrow$  Esto es el calor que obtenemos de las resistencias.
- $U \cdot A \cdot (T - T_r) \rightarrow$  Este es el calor que perdemos por transmisión de calor.
- $W_i \cdot C_e \cdot T \rightarrow$  Este término es el calor por unidad de tiempo del producto que sale del reactor.
- $W_i \cdot C_e \cdot T_{in} \rightarrow$  Este término es el calor por unidad de tiempo que aporta el reactivo que se mete al reactor.
- $m \cdot C_e \cdot \frac{dT}{dt} \rightarrow$  Este término es la acumulación de calor que tenemos en la camisa, que varía según el tiempo.

Ahora necesitamos las ecuaciones para saber el calor que tenemos que producir en la resistencia, para ello simulamos como si fuera una reacción, de un compuesto A que se transforma en un compuesto B, para ello usamos esta ecuación:

$$P = I^2 \cdot R = V \cdot K \cdot e^{\frac{-E}{R_r \cdot T}} \cdot C_a \cdot Inal \quad (5)$$

Donde la potencia eléctrica es igual al calor desprendido por la reacción el cual a su vez es igual a la cantidad que reacciona multiplicado por in al que representa el calor de reacción

Para obtener el caudal que nos da la válvula, utilizamos la siguiente ecuación:

$$Fr = \frac{1}{1,16} \cdot \sqrt{\frac{Pir - Ro \cdot G \cdot Hcam - Ro \cdot G \cdot Hic}{Ro \cdot (Kl + \frac{1}{Ap^2 \cdot Cv^2})}} \quad (6)$$

Que corresponde al caudal que circula por una válvula utilizando las características instaladas.

Para obtener el caudal que nos da la bomba centrífuga usamos la siguiente ecuación:

Tenemos dos bombas peristálticas, el caudal que circula es proporcional a la velocidad a la que gira.

Para obtener la temperatura después de la unidad de potencia, aplicamos un balance energético con volumen de control a la unidad de potencia, y la fórmula que obtenemos es la siguiente:

$$F_{res} \cdot R_o \cdot C_e \cdot T + Q_r = F_{res} \cdot R_o \cdot C_e \cdot T_{res} \quad (7)$$

A continuación, introducimos una tabla con las constantes usadas en el modelado de la planta:

Constante	Valor	Unidades	Descripción
R	8,31434	J/mol·K	Constante universal de los gases
K	1,380	S <sup>-1</sup>	Constante denominada factor preexponencial
V <sub>c</sub>	1	l	Volumen de la camisa
A	0,3	m <sup>2</sup>	Área de intercambio de calor
V	4,67	l	Volumen del reactor
C <sub>er</sub>	4,18	Kj/Kg·K	Calor específico del agua
T <sub>in</sub>	10	°C	Temperatura de entrada del líquido al depósito
P <sub>ir</sub>	15	Bar	Presión de entrada a la camisa0
R <sub>o</sub>	1	Kg/l	Densidad del agua

$C_{ai}$	0,8	mol/l	Concentración inicial del producto a
G	9,8	m/s <sup>2</sup>	Constante de la gravedad
Kl1	0		Constante de pérdidas
$C_v$	3,57		Constante de la válvula
$H_{ic}$	0,08	m	Diferencia entre la altura de entrada y de salida.
$H_{cam}$	0,33	m	Altura de la camisa del reactor
$H_{sr}$	0,10	m	Diferencia entre la salida de agua del reactor y el desagüe.
$H_{reac}$	0,12	m	Altura del reactor en el que está colocado el tubo de salida del reactor
E	2420	J/mol	Energía de activación
Inal	20	KJ/mol	Valor de la reacción, lo que reacciona cada segundo en la reacción

Con estas ecuaciones metiéndolas en EcosimPro podemos simular el sistema modelado que es lo que mostramos en el apartado siguiente.

### 3.2. Introducción a EcosimPro

Antes de hablar de las simulaciones, vamos a hablar de la herramienta que hemos usado para el modelado y la simulación de la planta.

EcosimPro es una herramienta matemática de modelado y simulación de sistemas multidisciplinares basado en ecuaciones algebraico-diferenciales y eventos discretos, EcosimPro permite representar sistemas mediante un lenguaje modelado o gráfico. Para modelar se ha creado un lenguaje de modelado, lenguaje de EcosimPro, que es muy sencillo de aprender y que toma idea de lenguajes orientados a objetos como C++.

El usuario modela cualquier sistema mediante las ecuaciones que la rigen. EcosimPro se encarga de extraer las ecuaciones del conjunto, ordenarlas y resolverlas numéricamente. Como el programa ordena las ecuaciones puedes poner las ecuaciones en el orden que tú quieras y de la forma que tú quieras que el programa se encarga de resolverlo.

### 3.3. Simulación del modelo obtenido y resultados

Una vez que hemos realizado el modelado de la planta, introducimos estas ecuaciones en EcosimPro.

El código en el lenguaje .el de EcosimPro se encuentra en el anexo 1.

A continuación, se han realizado una serie de experimentos para ver el comportamiento esperado de la planta observando el comportamiento de nuestro sistema en lazo abierto.

A continuación, mostramos una tabla con los valores iniciales de las variables:

Variables	Valores iniciales
T	15 °C
Tr	10 °C
Fi	1 l/min
Fo	1 l/min
Fres	3 l/min
Ca	0,05 mol/l
Tk	288 K

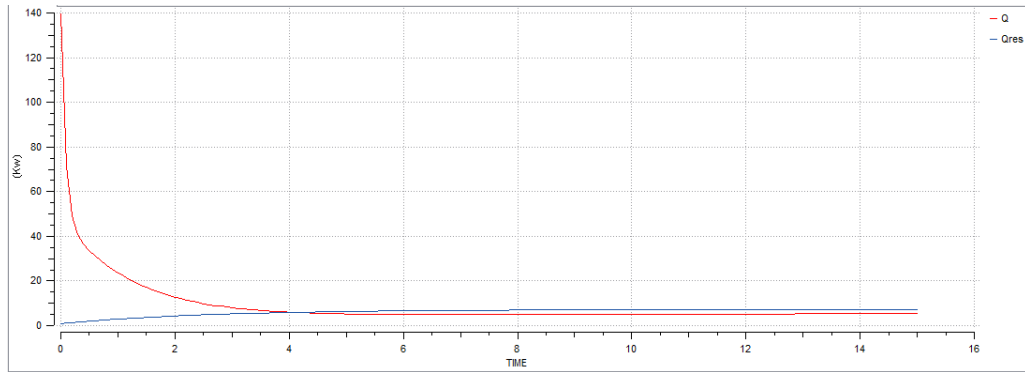


Figura 3.2.1: Resultados simulación en lazo abierta de Q y  $Q_{res}$ .

En la figura 3.2.1 tenemos los resultados de la simulación en lazo abierto de Q, que es el calor que se transmite a través de la pared al refrigerante, y  $Q_{res}$ , que es el calor que se produce en las resistencias es decir el calor que simulamos de una reacción química.

Como podemos observar  $Q_{res}$  tiene un valor de un poco más de 7KW, la máxima potencia que podemos suministrar debido a las limitaciones de las instalaciones, y el calor que se transmite, Q, es de 5KW para esas condiciones del parámetro U y de T y  $T_r$ , al principio alcanzamos tanto valor de Q puesto que en las condiciones iniciales elegidas tenemos una diferencia de 5°C lo que hace que valga tanto el calor intercambiado.

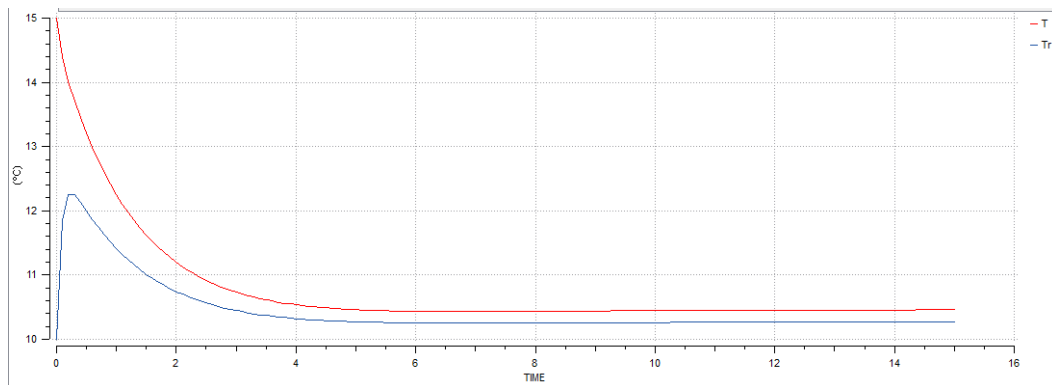


Figura 3.2.2: Resultados simulación en lazo abierta de T y  $T_r$ .

En la figura 3.2.2 tenemos los resultados de la simulación en lazo abierto de T, la temperatura del reactor, y  $T_r$ , la temperatura del flujo de salida de la camisa, como podemos observar T alcanza un valor de 10,5 °C y  $T_r$  de 10,3 °C, puesto que la apertura de la válvula está a la mitad obtenemos esta temperatura, si cerramos la válvula obtenemos 11,8 °C, que es la máxima temperatura que podemos alcanzar alimentando con 7kW a las resistencias. Inicialmente se ha puesto la configuración de 15 °C alimentando al reactor y 10 °C alimentando a la camisa, puesto que el flujo que alimentamos a la camisa viene de la calle y el del reactor está en un depósito en el laboratorio de automática.

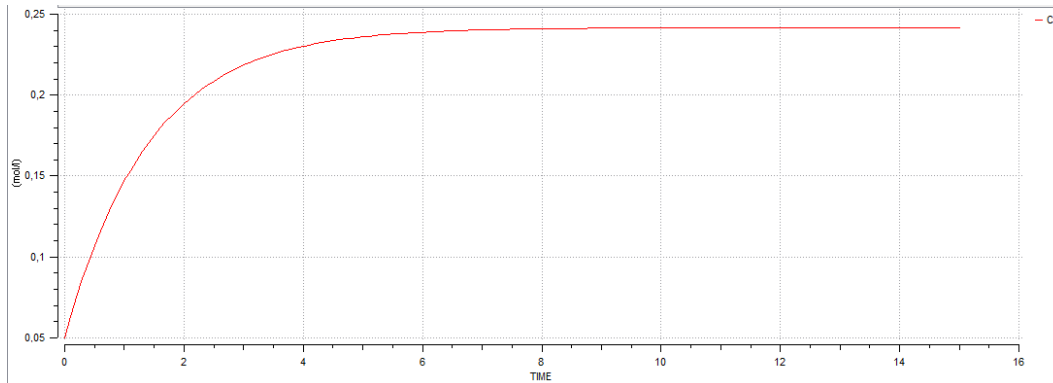


Figura 3.2.3: Resultados simulación en lazo abierta de  $C_a$ .

En la figura 3.2.3 tenemos el resultado de la simulación para  $C_a$ , que es la composición del producto A, observamos que llega hasta el 24%, recordemos que la concentración inicial que hemos puesto es del 80%, por lo cual se transforma en producto B el 75% del producto A.

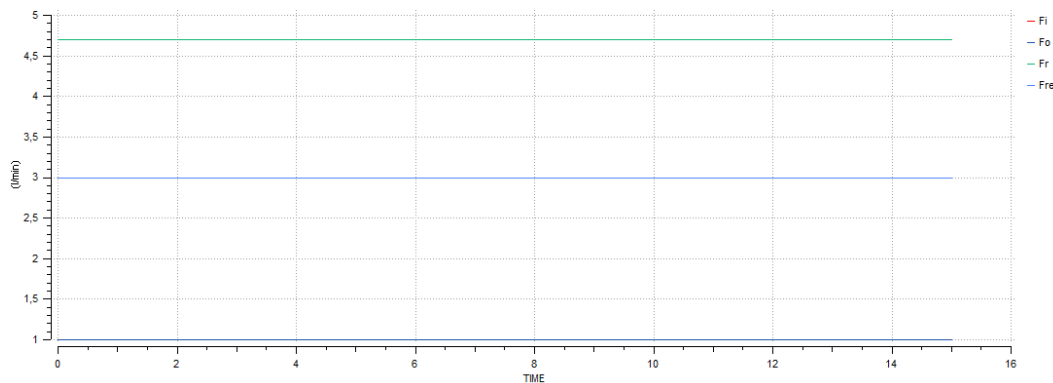


Figura 3.2.4: Resultados simulación en lazo abierta de  $F_i$ ,  $F_o$ ,  $F_{res}$  y  $F_r$ .

En la figura 3.2.4 tenemos los resultados de la simulación de los caudales en lazo abierto,  $F_o$ , es el caudal de salida del reactor a la calle,  $F_i$ , es el caudal de entrada de la calle al reactor,  $F_r$ , es el caudal que entra y sale de la camisa puesto que este caudal es el mismo,  $F_{res}$ , es el caudal que entra y sale de la unidad de potencia este caudal es igual.

Podemos observar como  $F_o$  es igual a  $F_i$  puesto que el volumen del reactor es constante, lo que entra tiene que ser igual a lo que sale para que no se vacíe el reactor y no se desborde.

Los valores obtenidos en las figuras anteriores respecto a la simulación son con  $F_o$  y  $F_i$  valiendo 1 L/min,  $F_{res}$  valiendo 3 l/min, y poniendo la apertura de la válvula en un valor intermedio de 0,5, obtenemos un valor de  $F_r$  de 4,7 l/min la mitad del valor máximo que podemos obtener.

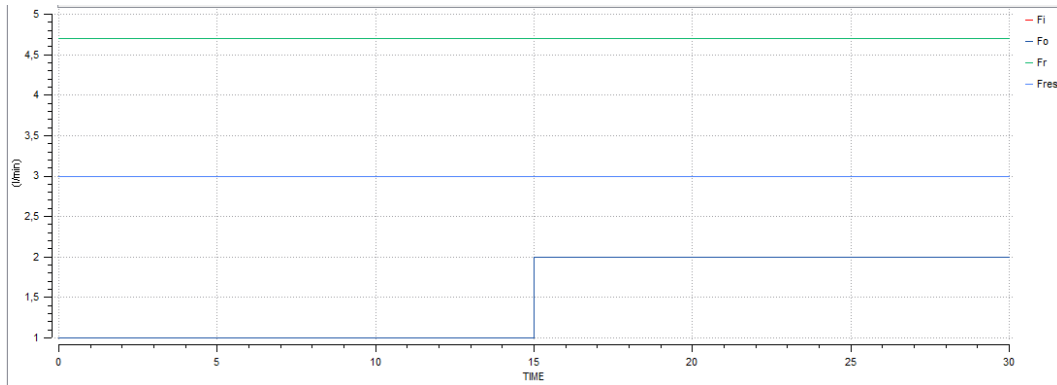


Figura 3.2.5: Resultados simulación en lazo abierta de  $F_i$ ,  $F_o$ ,  $F_{res}$  y  $F_r$ .

En la figura 3.2.5 tenemos los resultados cuando cambiamos  $F_i$  y  $F_o$  a 4 l/min, como podemos observar en las siguientes figuras tenemos cambios en todas las variables.

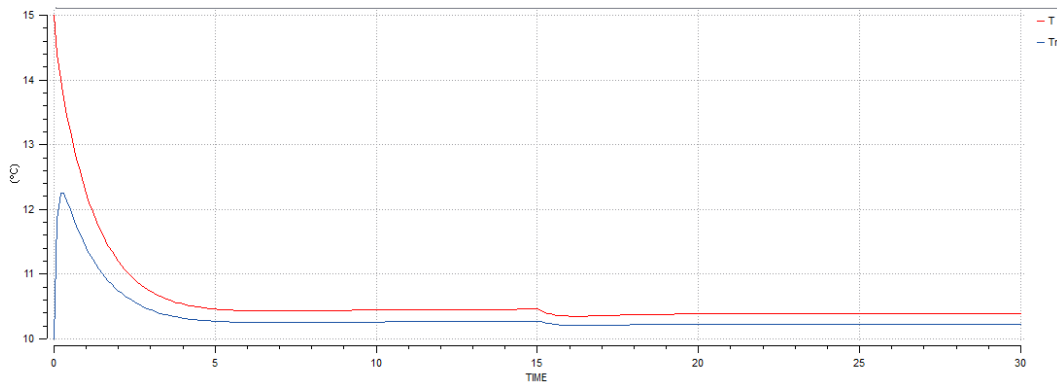


Figura 3.2.6: Resultados simulación en lazo abierta de  $T$  y  $T_r$ .

En la figura 3.2.6 tenemos el cambio de temperatura en el reactor, el cambio es a partir del minuto 15, y observamos cómo cambia de 10,5 °C a 10,38 °C, al aumentar más caudal frío baja la temperatura. Podemos observar esto a partir del minuto 15 de simulación. También observamos que  $T_r$  también disminuye. Esto es algo normal puesto que al reactor le estamos introduciendo más agua fría por lo cual tiene que bajar la temperatura.

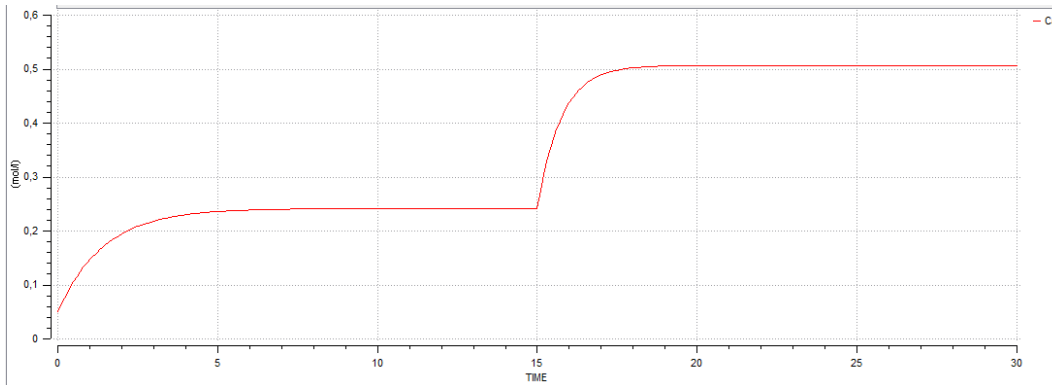


Figura 3.2.7: Resultados simulación en lazo abierta de  $C_a$ .

En la figura 3.2.7 tenemos la simulación cuando cambiamos los caudales de entrada y salida del reactor, podemos observar que como varía la temperatura en el reactor varía lo que reacciona de producto a en este caso reacciona menos producto, nos tenemos que fijar a partir de los 15 minutos de simulación.

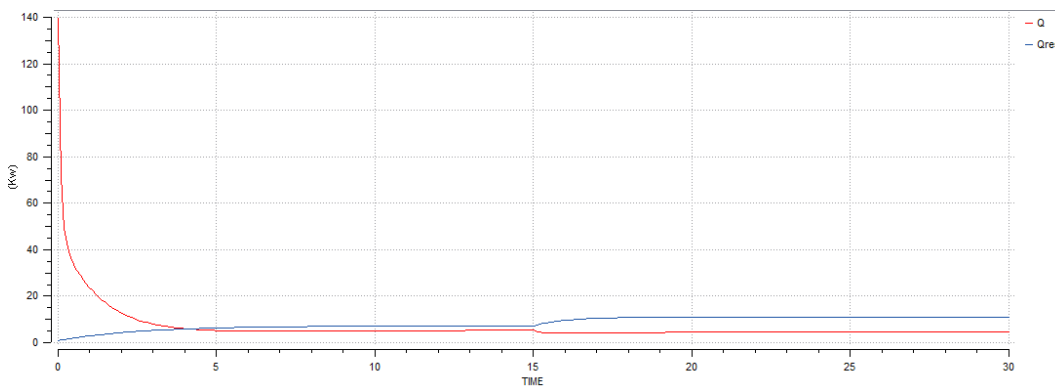


Figura 3.2.8: Resultados simulación en lazo abierta de  $Q$  y  $Q_{res}$ .

En la figura 3.2.8 tenemos los resultados de  $Q$  y  $Q_{res}$  cuando variamos los caudales de entrada y salida del reactor, al variar la temperatura en el reactor varía la velocidad de reacción, en este caso al disminuir la temperatura del reactor aumenta lo potencia, es decir aumentaría el calor que produce la reacción. Podemos ver este cambio a partir del minuto 15 de la simulación. También se observa que como hay menos calor en el reactor el calor que se transmite a la camisa es menor por lo cual  $Q$  disminuye.

Mencionar que por motivos de la instalación no nos puede proporcionar la unidad de potencia una potencia mayor a 9KW, al simular una reacción química el calor nos depende de la reacción entonces para aumentar el calor tendríamos que cambiar el tipo de reacción, para ello en nuestra simulación tendríamos que cambiar el incremento de entalpía o la energía de activación o la constante pre exponencial, como podemos ver en la fórmula 3 y 4, y cambiando alguno de estos parámetros cambiamos el calor aportado por las



resistencias y por ello conseguiríamos una temperatura mayor dependiendo de la potencia suministrada.

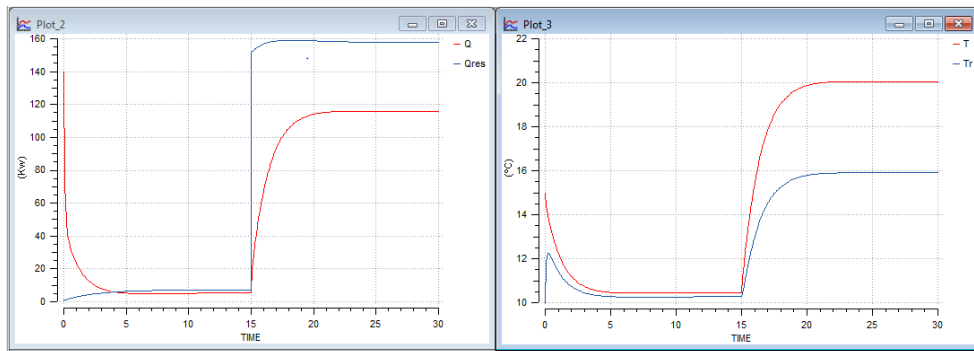


Figura 3.2.9: Resultados simulación en lazo abierta de Q y T cuando variamos  $Inal$ .

En la figura 3.2.9 tenemos los resultados de la simulación cuando aumentamos la potencia que nos ofrecen las resistencias, de la unidad de potencia, para aumentar esta potencia hemos aumentado la constante  $Inal$ , que es el incremento de entalpia de la reacción, y ha pasado de valer 20 a 420, este aumento es la simulación del cambio en los reactivos y en los productos que hace que desprenda más calor la reacción química.

Como podemos observar la temperatura está cerca de 20 °C, y la potencia alcanza un valor de 160 KW, mencionar que esta potencia sí que la puede suministrar la unidad de potencia, pero no se puede obtener físicamente por la instalación que tenemos en el laboratorio. Los caudales son los mismos que en la simulación anterior puesto que no se han modificado, la que si observamos que varía puesto que varía la temperatura del reactor es la concentración del producto A, que alcanza un valor de 0,23, es decir reacciona más producto A puesto que la temperatura ha aumentado, como podemos observar en la figura 3.2.10.

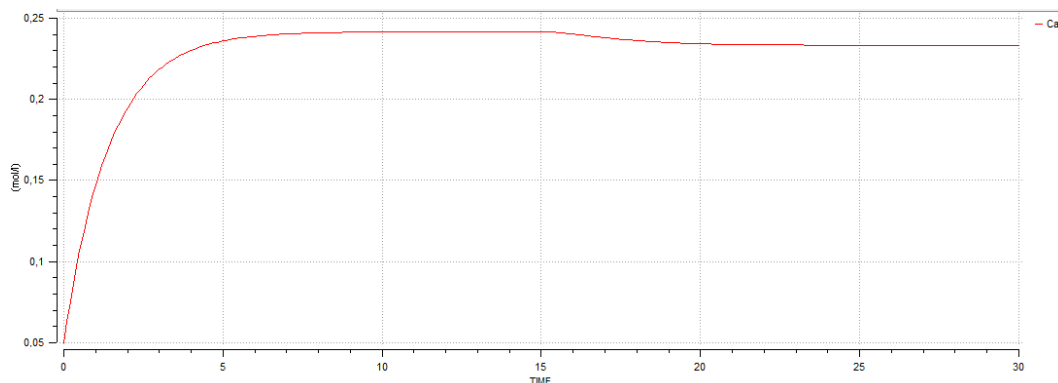


Figura 3.2.10: Resultados simulación en lazo abierta de  $C_a$  cuando variamos  $Inal$ .



## 4. Estrategias de control

En este apartado vamos analizar las distintas estrategias de control que se pueden en nuestra planta, las modelaremos y después en el punto siguiente las simularemos para observar los resultados obtenidos.

### 4.1. Control de temperatura

En este apartado, hemos empezado por una estrategia de control muy simple para observar el comportamiento del sistema.

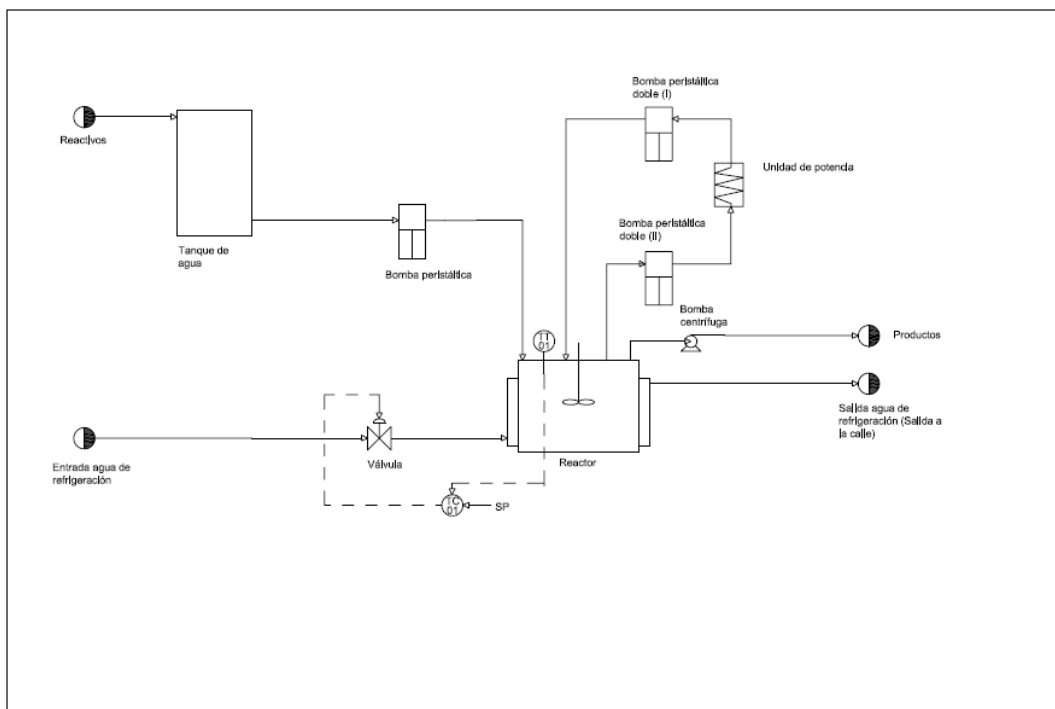


Figura 4.1.1: Diagrama P&ID de un control de temperatura.

En la figura 4.1.1 observamos un control de temperatura en el reactor, SP es la temperatura que deseamos en el reactor, mediante un controlador PID, que comparando la señal del sensor de temperatura y el set point, obtiene una señal de salida que actúa sobre la variable manipulada la apertura de la válvula.

### 4.2. Control de caudal

En este apartado lo que realizamos es un control de caudal, al flujo que entra en la camisa.

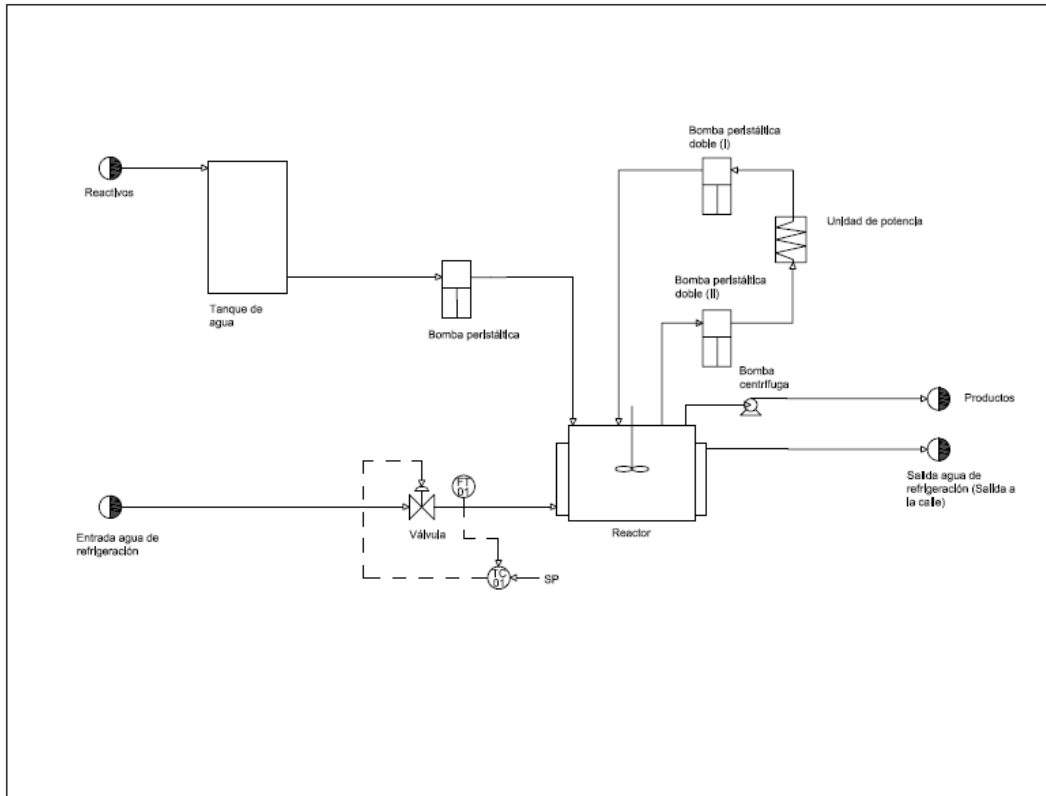


Figura 4.2.1: Diagrama P&ID de un control de caudal.

Esta estrategia de control lo que se compara es el caudal que entra a la camisa y se manipula mediante un controlador PID la apertura de la válvula, es muy parecido al anterior en funcionamiento, lo único que en este en vez de comparar la temperatura comparamos el caudal. En la figura 4.2.1 tenemos el diagrama P&ID para este lazo de control.

### 4.3. Control de temperatura en la camisa

En esta estrategia de control lo que se compara es la temperatura en la salida del reactor con un set point.

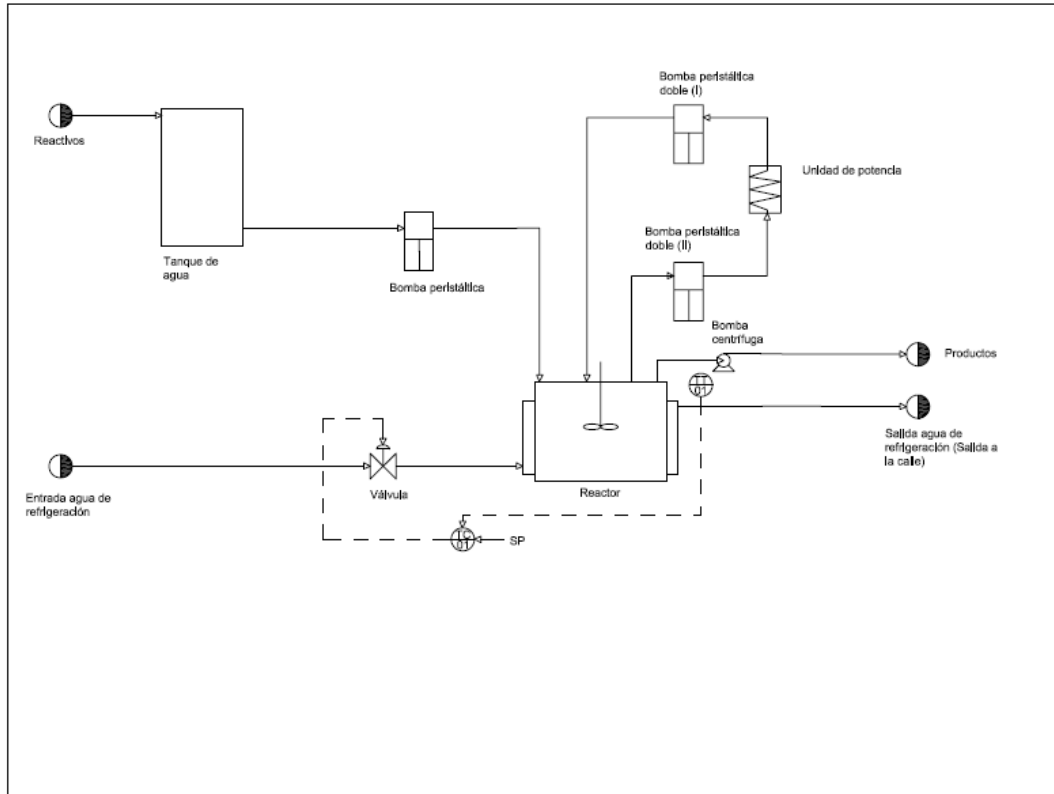


Figura 4.3.1: Diagrama P&ID de un control de temperatura en la camisa.

En la figura 4.3.1 podemos observar el diagrama P&ID de esta estrategia de control, como podemos observar es igual que el que realizamos en el punto 4.1 lo único que cambia es que en lugar de medir la temperatura en el reactor la medimos en el flujo que sale de la camisa, y la variable manipulada sigue siendo la apertura de la válvula del flujo que entra a la camisa.

#### 4.4. Control en cascada para la temperatura del reactor

Esta es una de las tres estrategias de control avanzado que vamos a usar en nuestra planta.

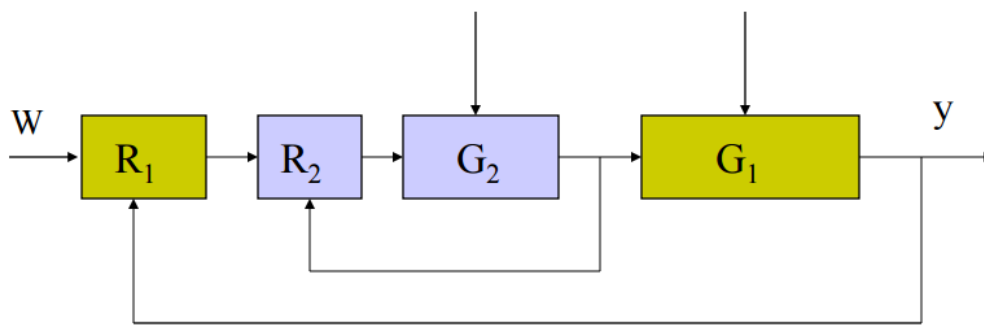


Figura 4.4.1: Diagrama de bloques de un control en cascada.

En la figura 4.4.1 tenemos un diagrama de bloques de un control en cascada, en el que consta de dos procesos, el proceso principal o  $G_1$ - $R_1$ , en la figura 4.4.1, es el proceso lento el que tarda más tiempo en estabilizarse, el proceso secundario o  $G_2$ - $R_2$ , en la figura 4.4.1, es el proceso que tarda menos en estabilizarse.

Las perturbaciones que se producen se mitigan y se actúa en el proceso secundario, por lo que no afecta al proceso principal. Las perturbaciones que se producen son no medibles, si dichas perturbaciones fueran medibles habría que realizar otro control.

Si hablamos de sintonizar estos controladores tenemos que tener en cuenta que primero se sintonizan los lazos interiores, es decir el proceso secundario, para ello el controlador del lazo exterior, o principal, está en modo manual y una vez que sintonizamos el controlador secundario, el controlador principal le sintonizamos y le ponemos en automático.

La ventaja de este sistema a uno simple es que mitiga el efecto de las perturbaciones mucho más rápido.

Si ponemos un lazo en manual los lazos externos a él tienen que estar en manual, puesto que si no el sistema sería inestable.

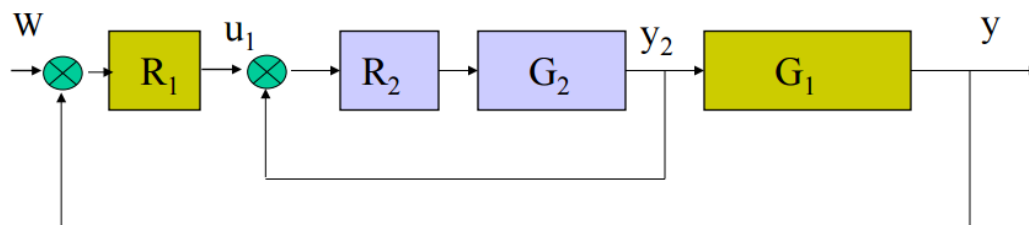


Figura 4.4.2: Diagrama de bloques de un control en cascada.

En la figura 4.4.2 tenemos un diagrama equivalente.

El primer controlador R1, le llega la suma de  $w$  que es el set point o la señal de referencia, y la de la realimentación de la  $y$ , que ese dato nos lo proporciona un sensor y es lo que vale la variable controlada principal de nuestra planta. La salida del controlador R1 es  $u_1$  y sumada a la realimentación de  $y_2$ , que este dato es la variable secundaria de nuestra planta y nos la proporciona un sensor, nos da el valor de entrada, o variable manipulada, a nuestro controlador interior, o secundario, y la salida que es  $y_2$  es la variable manipulada que metemos a la planta G2.

Como se ha mencionado anteriormente el lazo exterior tiene que ser más lento que el lazo interior, por lo que no le podemos utilizar en cualquier caso este tipo de estrategia.

A continuación, vemos algunos ejemplos de variables en los que sí que se podría usar control en cascada:

- **Cascada Temperatura – Presión:**

Este es un ejemplo de dos variables en las que sí que se puede usar control en cascada.

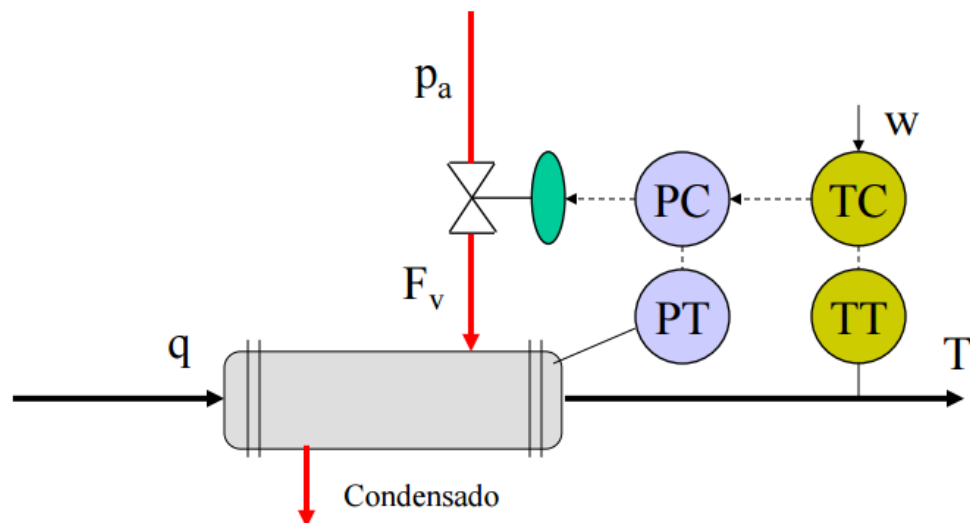


Figura 4.4.3: Esquema de un control en cascada Temperatura – Presión.

Como podemos observar en la figura 4.4.3 el lazo principal es la temperatura ya que es la variable más lenta, y el lazo interior es la presión. El set point del lazo interior, el lazo de presión, es la salida o variable manipulada del controlador de temperatura.

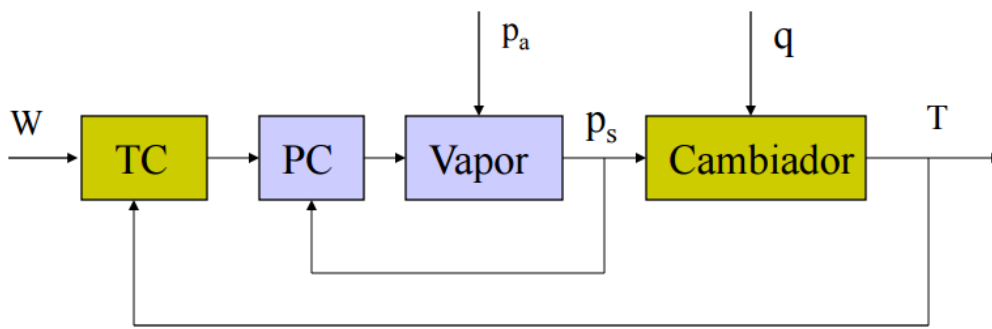


Figura 4.4.4: Diagrama de bloques de un control en cascada Temperatura - Presión.

En la figura 4.4.4 tenemos como es el diagrama de bloques de un control en cascada de Temperatura. Según podemos observar en este diagrama de bloques tenemos dos perturbaciones,  $P_a$  que es la presión de la línea caliente que entra al intercambiador, y  $q$  que es la cantidad de caudal de agua fría que entra al intercambiador, el lazo de temperatura o lazo principal mide la temperatura de la línea de salida del intercambiador, se mide en líquido que entra frío y luego se calienta por el intercambiador.

- **Cascada Nivel - Caudal:**

Este es otro caso en los que podemos usar un control en cascada.

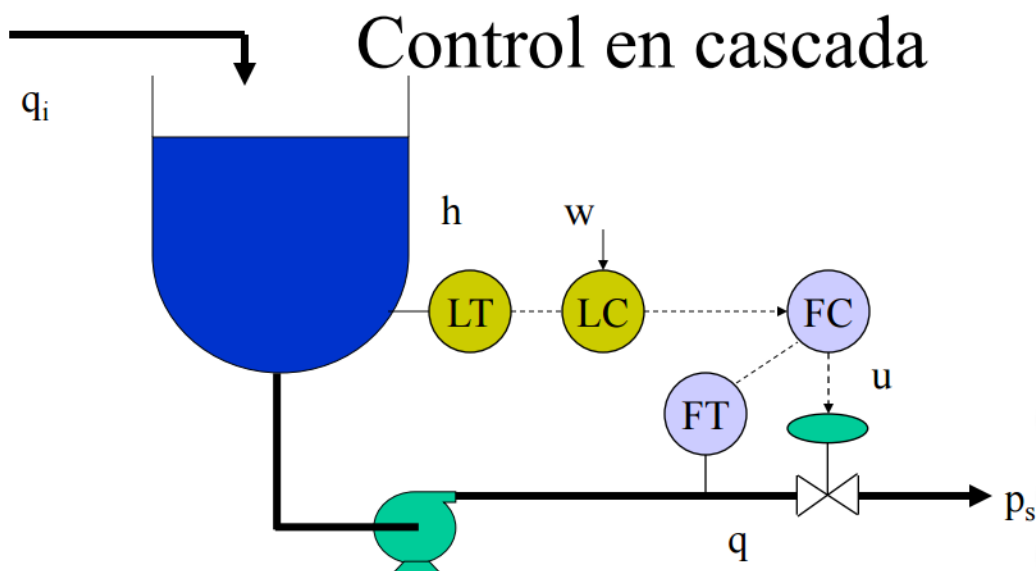


Figura 4.4.5: Esquema de un control en cascada Nivel - Caudal.



En la figura 4.4.5 observamos que el lazo exterior o principal es el de nivel, puesto que es la variable más lenta de las dos, y el lazo interior o secundario es el de caudal.

El set point del controlador de caudal es la salida o variable manipulada del controlador de nivel.

El controlador de caudal actúa sobre la válvula que está situada en la tubería de salida de flujo del depósito. Para vaciar el depósito tenemos una bomba centrífuga como podemos observar en la figura 4.4.5.

Si tenemos alguna perturbación en el caudal de salida lo corrige el lazo interno, esto hace que no afecte al controlador principal.

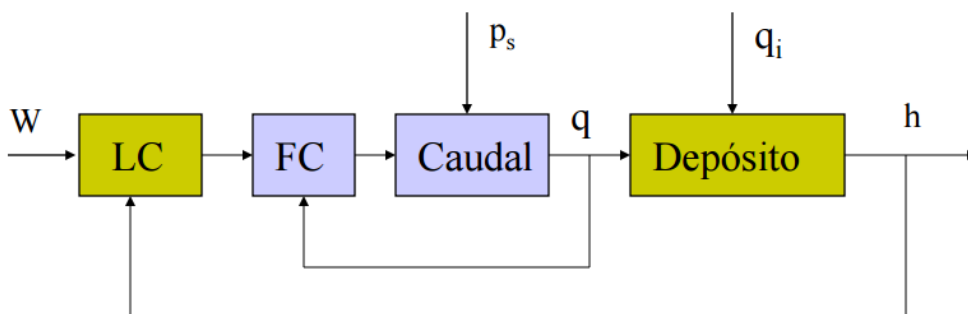


Figura 4.4.6: Diagrama de bloques de un control en cascada Nivel - Caudal.

En la figura 4.4.6 tenemos el diagrama de bloques del control en cascada nivel - caudal. Como podemos observar según ese diagrama tenemos dos perturbaciones,  $P_s$  que es la cantidad de caudal que sale del depósito, y  $q_i$  que es la cantidad de líquido que entra al depósito.

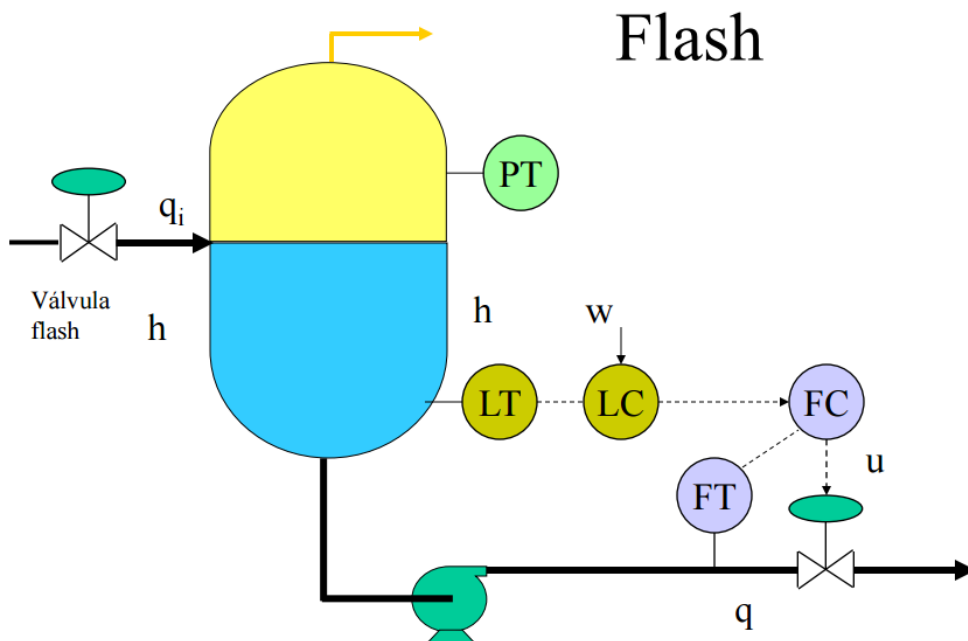


Figura 4.4.7: Esquema de un control en cascada Nivel – Caudal.

En la figura 4.4.7 tenemos otro ejemplo de control en cascada Nivel-caudal, en este la entrada de líquido al tanque está regulada por una válvula, y el lazo secundario manipula la apertura de la válvula de salida del tanque.

En los puntos anteriores hemos analizado lazos de control simples realizados sobre nuestra planta, ahora vamos a aplicar una serie de controles en cascada para observar que tenemos mejores resultados, a continuación, mostramos los tres tipos de controles en cascada que hemos diseñado:

#### 4.4.1. Control en cascada tipo 1

Este tipo es el control más completo, el esquema es el siguiente:

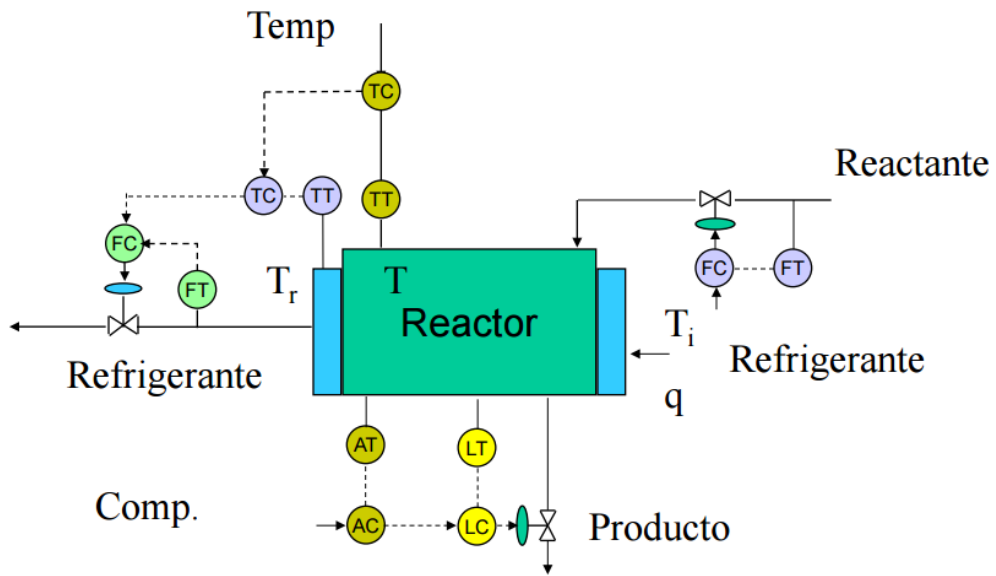


Figura 4.4.1.1: Esquema de un control en cascada para nuestra planta.

En la figura 4.4.1.1 podemos observar el esquema del control en cascada que queremos diseñar, de este esquema solo nos quedamos con el control en la salida del refrigerante, y el control en cascada implementado allí, como podemos observar controlamos la temperatura del reactor, la temperatura de la camisa y el flujo de salida del refrigerante, en nuestra planta será el flujo de entrada puesto que la válvula la tenemos a la entrada y no a la salida, puesto que el reactor siempre va a tener el mismo volumen en su interior si por algún causal la válvula se estropea al ser aire abre quedaría cerrada por lo cual ni entraría ni saldría liquido de la camisa es decir siempre tendría el mismo volumen en su interior, en este caso si se puede poner a la entrada pero lo normal es que se ponga a la salida.

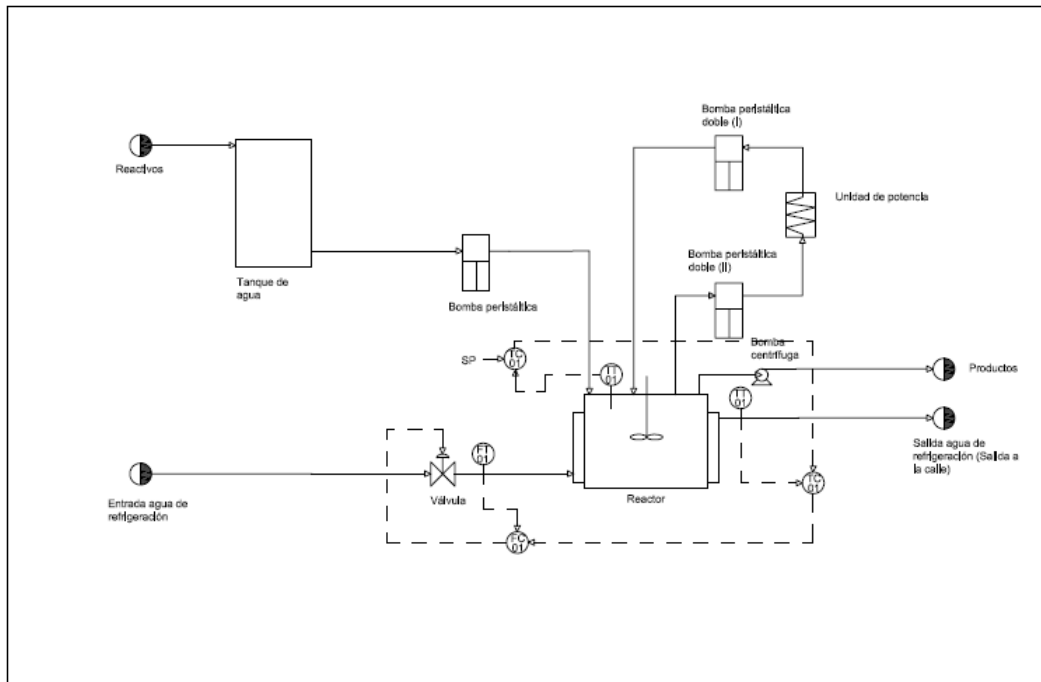


Figura 4.4.1.2: Diagrama P&ID de un control en cascada para nuestra planta.

En la figura 4.4.1.2 tenemos el diagrama P&ID para este control en cascada, como podemos observar el lazo exterior o el lazo principal es el lazo de temperatura del reactor, después el siguiente lazo es el lazo de temperatura de la camisa, y por último el lazo interior es el lazo de flujo de refrigerante.

Como perturbaciones tenemos 3, la primera sería la variación del flujo de refrigerante, que de corregir esto se encarga el lazo de flujo, después tenemos otra perturbación con la variación de la temperatura de la camisa, que de solventar esta perturbación se encarga el lazo de temperatura de la camisa, y por último la variación de temperatura del reactor, que de corregir esto se encarga el lazo de temperatura o el lazo principal, el set point es el dato que introducimos y es la temperatura a la que queremos que este el líquido del reactor. La perturbación de cambio de flujo de refrigerante o la de la variación de temperatura en la camisa se encargan de corregirlos los controladores secundarios antes que se note en la temperatura del reactor.

Como hemos podido comprobar este control es un control en cascada Temperatura – Temperatura – Caudal.

#### 4.4.2. Control en cascada tipo 2

Este es otro tipo de controlador en cascada que podemos usar en nuestra planta, a continuación, mostramos el esquema para explicar su funcionamiento:

## Cascada Temp-Temp

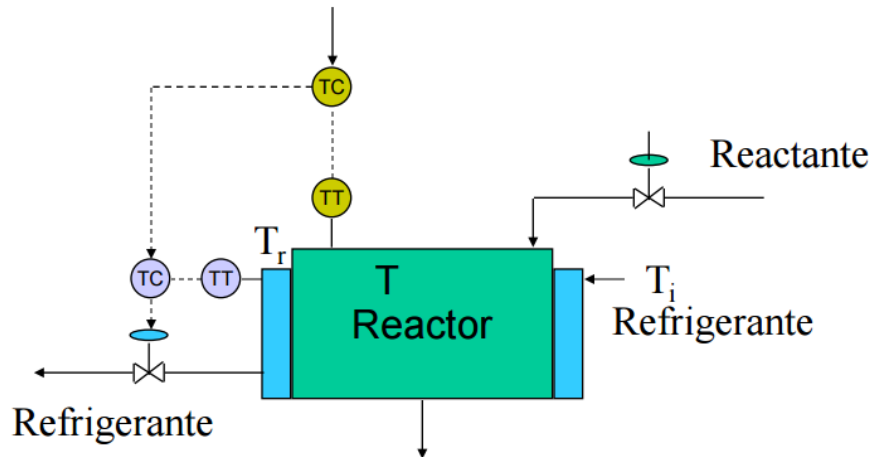


Figura 4.4.2.1: Esquema de un control en cascada para nuestra planta.

En la figura 4.4.2.1 tenemos el esquema del control en cascada que hemos utilizado en las simulaciones de nuestra planta.

Como podemos observar medimos la temperatura del reactor y la temperatura de la camisa y con ello manipulamos la apertura de la válvula. En este esquema actuamos sobre la salida de refrigerante en nuestra planta es sobre el flujo de refrigerante que entra.

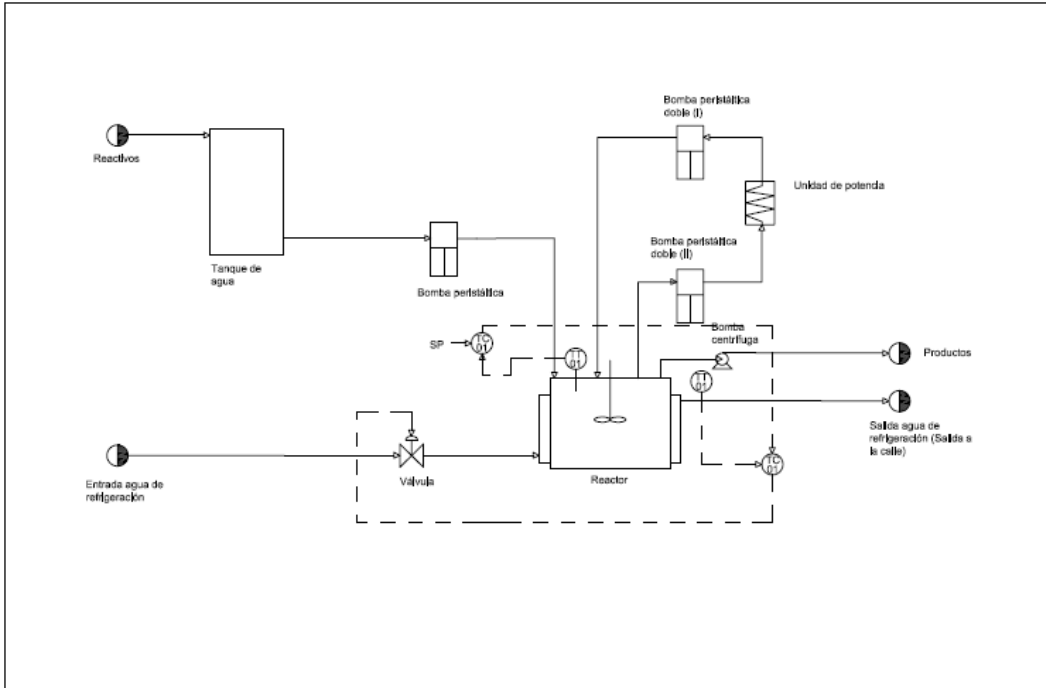


Figura 4.4.2.2: Diagrama P&ID de un control en cascada para nuestra planta.

En la figura 4.4.2.2 tenemos el diagrama P&ID de nuestra planta, en este control en cascada tenemos dos lazos de control, el lazo principal que mide la temperatura en el reactor, y el lazo secundario que mide la temperatura en la camisa. La salida del controlador secundario, su variable manipulada, nos modifica la apertura de la válvula de entrada de flujo a la camisa. En tipo tenemos un control en cascada Temperatura - Temperatura.

## Cascada Temp-Temp

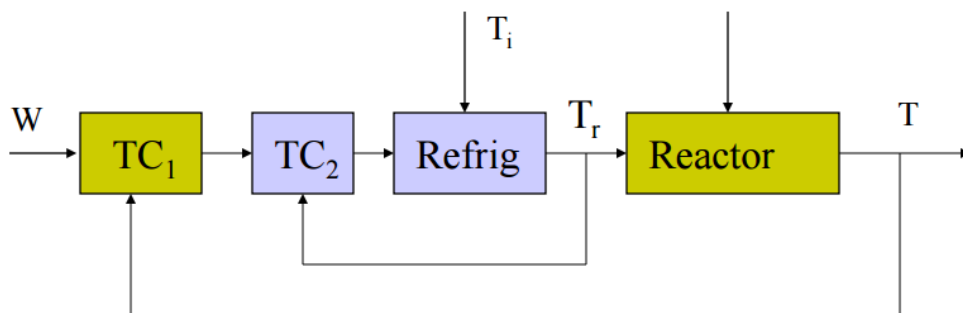


Figura 4.4.2.3: Diagrama de bloques de un control en cascada para nuestra planta.

En la figura 4.4.2.3 tenemos el diagrama de bloques de este control en cascada, podemos observar que tenemos dos perturbaciones que son la

variación de la temperatura de la camisa y la variación de la temperatura del reactor.

La primera perturbación, la variación de la temperatura de la camisa, se corrige con el lazo secundario es decir con el controlador secundario que tiene como set point la variable manipulada del controlador principal y que mide la temperatura de la camisa y que su variable manipulada es la variación de la apertura de la válvula, y la segunda perturbación, la variación de la temperatura del reactor, se corrige con el controlador principal que tiene como set point la temperatura deseada en el líquido del reactor, mide la temperatura del reactor con un sensor de temperatura, y su variable manipulada es el set point del controlador secundario.

#### 4.4.3. Control en cascada tipo 3

Este es el último tipo de control en cascada que hemos diseñado para nuestra planta, a continuación, mostramos en esquema para poder explicar mejor en que consiste este control:

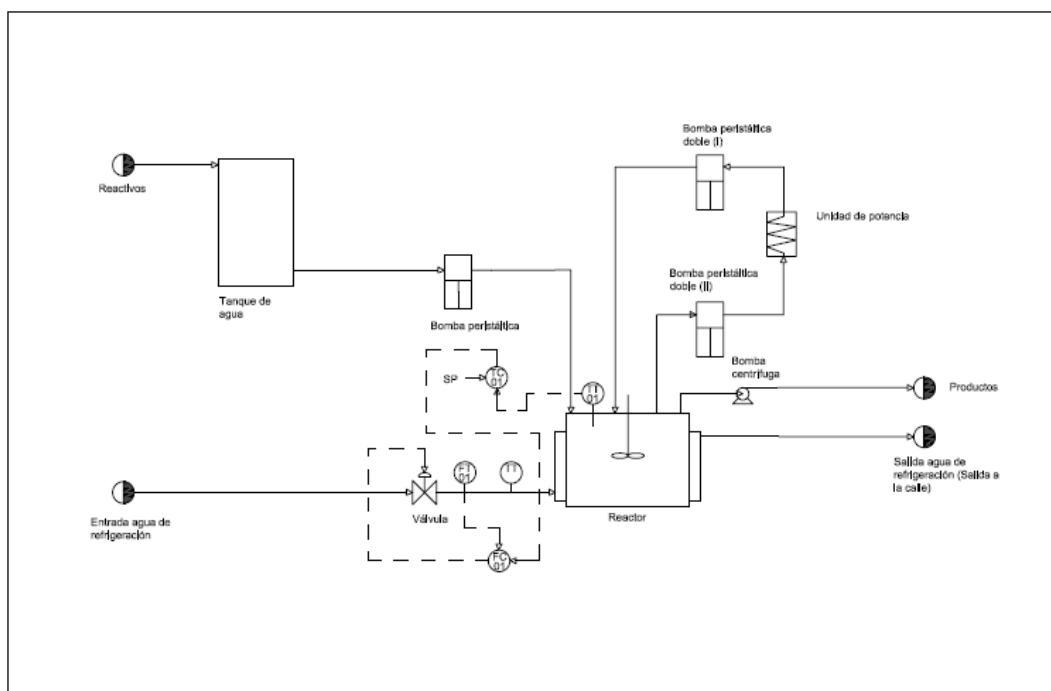


Figura 4.4.3.1: Diagrama P&ID de un control en cascada para nuestra planta.

En la figura 4.4.3.1 tenemos el diagrama P&ID para el controlador en cascada del tipo 3, como podemos observar tenemos un lazo principal que es la temperatura en el reactor y un lazo secundario que es el flujo de entrada de

refrigerante a la camisa. Por lo cual tenemos dos perturbaciones la variación de flujo de entrada y la variación de temperatura del reactor.

La primera perturbación, la variación de flujo de refrigerante, la corregimos con el lazo secundario el cual tiene como set point la variable manipulada del lazo principal y mide el caudal que entra del refrigerante y su salida, la variable manipulada, actúa sobre la apertura de la válvula. La segunda perturbación, la variación de temperatura en el reactor, la corregimos con el controlador principal cuyo set point es la temperatura deseada para el reactor, mide la temperatura del reactor, y su salida como hemos mencionado anteriormente es el set point del controlador secundario.

Este tipo de control en cascada es un control Temperatura – Caudal.

#### 4.5. Control Feedforward

El control Feedforward es otra de las estrategias de control que vamos a usar en la simulación de la planta.

Este control es para corregir perturbaciones de variables principales del proceso. Estas perturbaciones tienen que ser medibles y de efecto no controlable directamente.

Este tipo de control se diferencia del control en cascada en que las perturbaciones en este caso son medibles en cambio en un control en cascada son no medibles.

Para utilizar un control en Feedforward se necesita instrumentación adicional puesto que necesitamos medir variables adicionales, y calculo adicional para poder implementar este control. Este control es una compensación en lazo abierto que debe emplearse junto a un regulador en lazo cerrado.



# Feedforward

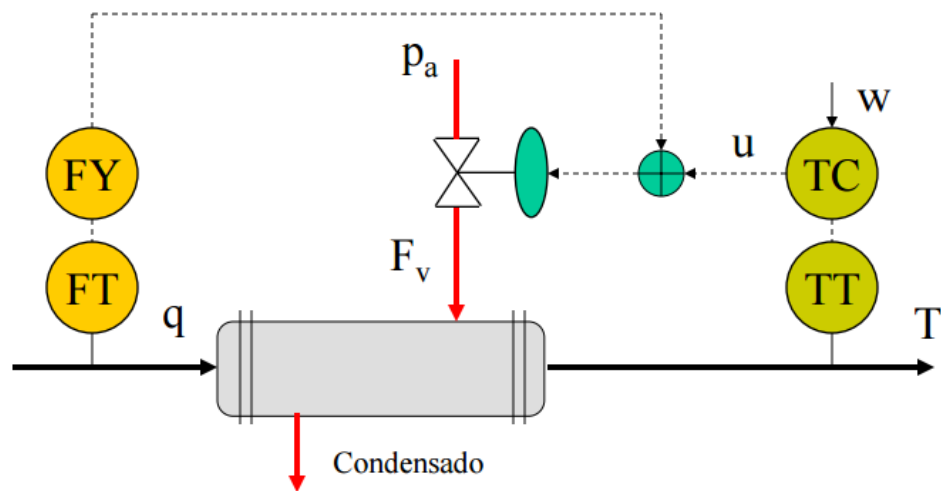


Figura 4.5.1: Esquema de un control en Feedforward.

En la figura 4.5.1 tenemos un esquema de cómo sería un control Feedforward, en este caso medimos la temperatura de salida del reactor y la temperatura de entrada, y actuamos sobre la válvula del flujo de entrada de líquido caliente al intercambiador. FY es la ganancia por la que multiplicamos a la variación de la perturbación, a continuación explicamos cómo se calcula esa ganancia, la salida del controlador de temperatura sumada a la multiplicación del controlador de la perturbación, de flujo en este caso, por la ganancia, que a partir de ahora la llamaremos  $G_{F}$  será la variable manipulada que actúa sobre el actuador directamente o iría como set point a un control en cascada, para nuestra planta utilizamos esto último que hemos mencionada un control Feedforward + Cascada como ya explicaremos más adelante.

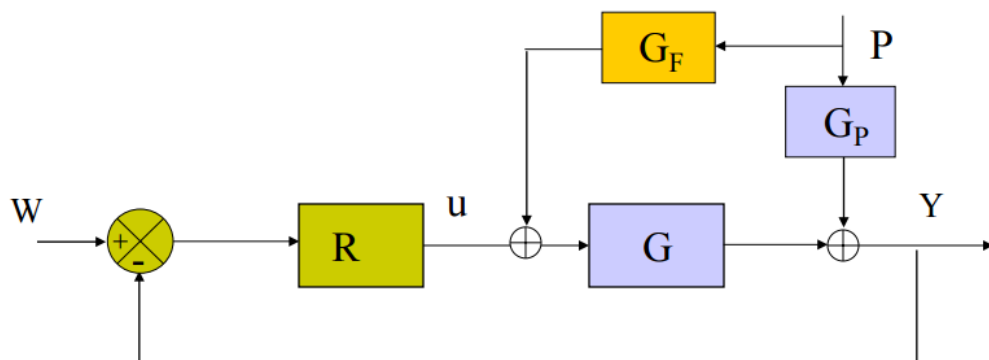


Figura 4.5.2: Diagrama de bloques de un control en Feedforward.

En la figura 4.5.2 tenemos el diagrama de bloques para un control Feedforward, P es la perturbación, y cómo podemos observar la variable

manipulada que le llega al actuador es la suma de la salida del controlador,  $u$ , y la  $P$  por la ganancia  $G_F$ . La variable controlada es la suma de la perturbación por  $G_p$  y la salida de la variable controlada de la planta.

Para obtener  $G_p$  y  $G_F$  se explica a continuación:

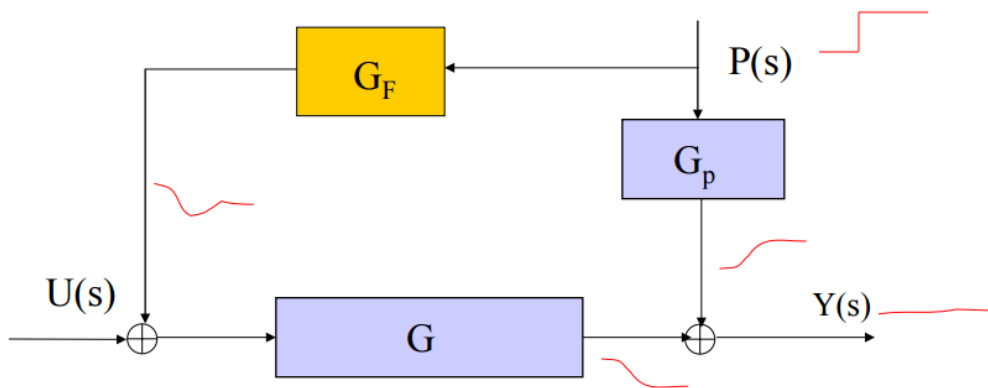


Figura 4.5.3: Diagrama de bloques de un control en Feedforward, para obtener las ganancias.

En la figura 4.5.3 tenemos un diagrama de bloques de cómo obtener  $G_p$  y  $G_F$ , damos un cambio a la perturbación,  $P(s)$ , y observamos como varia la salida,  $Y(s)$ , y  $G_p$  es la división de la variación de  $Y(s)$  entre la variación de la entrada  $P(s)$ .  $G$  lo hallamos variando la entrada,  $U(s)$ , y observando como varia la salida,  $Y(s)$ , y dividiendo el incremento de la salida entre el incremento de la entrada obtenemos  $G$ . Para obtener las ganancias cabe destacar que se realiza en lazo abierto es decir sin tener ningún controlador automático.

Ahora para obtener  $G_F$  utilizamos la siguiente formula:

$$G_F = -\frac{G_p(s)}{G(s)}$$

Figura 4.5.4: Formula para obtener  $G_F$ .

Si usamos la fórmula de la figura 4.5.4 para el cálculo de  $G_F$ , no tiene la realizabilidad asegurada, puede ser de un orden alto y la validez está limitada a la validez de  $G_p$  y  $G$ . Por ello en la práctica se suele usar esta fórmula:

$$G_F = -\frac{K_F (bs + 1)}{(as + 1)} \quad K_F = \frac{K_P}{K}$$

Figura 4.5.5: Formula para obtener  $G_F$  práctica.

La fórmula de la figura 4.5.5 es lo que se denomina Lead/Lag.

En nuestro caso:

- $G_p = \frac{1,32}{3 \cdot s + 1}$
- $G = \frac{-0,4}{6,1 \cdot s + 1}$
- $G_F = \frac{3,325 \cdot (6,1 \cdot s + 1)}{3 \cdot s + 1}$

Como podemos observar la perturbación es más rápida que la variable controlada por lo cual no es aconsejable usar esta estrategia, veremos en las simulaciones porque no se debe de usar.

Tenemos  $G_F$  en el dominio de Laplace como nosotros lo queremos en el dominio del tiempo para poder meterlo a EcosimPro tenemos que hacer un cambio de variable y pasarlo al tiempo, por lo cual la ecuación nos queda de la siguiente manera

Para poder utilizar esta estrategia de control  $G_p$  tiene que ser más lenta que  $G$ , en caso contrario no se podría usar esta estrategia.

Ahora vamos a aplicar este control a nuestra planta, por lo cual el diagrama P&ID queda de la siguiente manera:

$$3 \cdot \frac{dZ}{dt} + Z = 3,325 \cdot 6,1 \cdot \frac{dP}{dt} + 3,325 \cdot P$$

Siendo  $Z$  la variable después de  $G_F$  que se suma con  $U(s)$ .

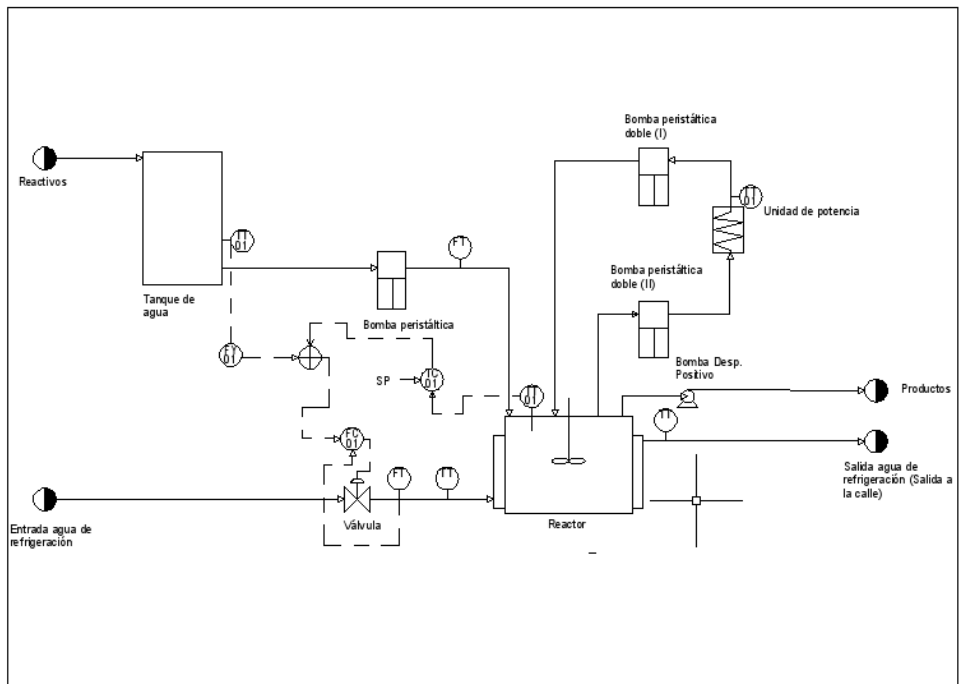


Figura 4.5.6: Diagrama P&ID de un control Feedforward de nuestra planta.

En la figura 4.5.6 tenemos un diagrama P&ID del control Feedforward que vamos a implementar en nuestra planta, como ya hemos mencionada anteriormente este control es un Feedforward + Cascada, puesto que combinamos ambas estrategias de control.

La perturbación que hemos tomado es la temperatura del líquido que se encuentra en el depósito. Esa perturbación la medimos con un sensor de temperatura que está colocado en dicho depósito. Después esta perturbación la multiplicamos por la ganancia  $G_F$  y la sumamos a la señal manipulada que nos da el controlador que está en lazo de temperatura del reactor, esa señal es el set point para el lazo de control de temperatura en las resistencias, este sería el control en cascada, este set point le compararemos con la señal que nos da el caudalímetro de refrigerante y la señal manipulada es la apertura de la válvula para que entre más o menos refrigerante.

#### 4.6. Control de concentración

En este control lo que vamos a hacer es controlar la concentración de producto A y para ello regulamos el flujo de reactivo que introducimos al reactor.

Este control de concentración es control en cascada como podemos observar en la figura 4.6.1, el set point es la concentración que queremos que reaccione de producto A, y su salida es el set point de un control de flujo, y la salida

manipulada es la señal a la bomba peristáltica que es la que introduce el líquido.

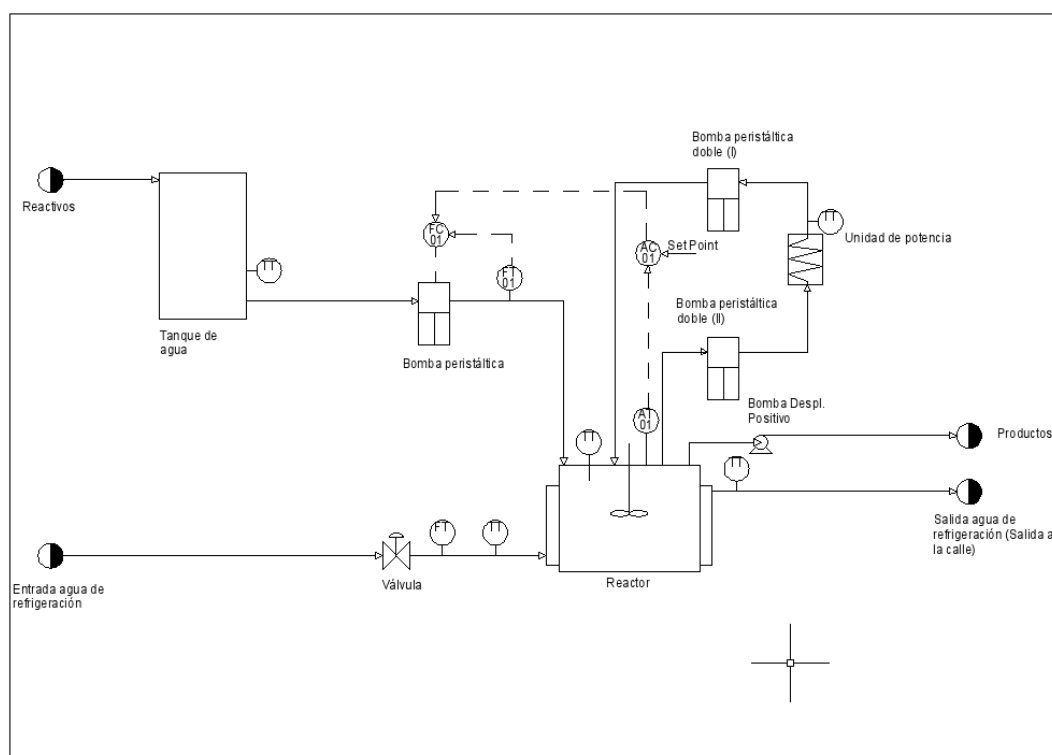


Figura 4.6.1: Diagrama P&ID de un control para la concentración de nuestra planta.

Realmente en la planta este control no lo podemos diseñar puesto que no tenemos un sensor de concentración y al simular una reacción no valdría de nada, pero en la simulación al simular la reacción sí que podemos realizar este control y ver como varía la concentración.

#### 4.7. Control por desacople

En este apartado vamos a estudiar el control por desacople, una estrategia de control que solo sirve para sistemas multivariables, MIMO, es necesario tener varias entradas y varias salidas en el controlador, es decir varias variables controladas y varias variables manipuladas y que haya interacción entre ellas.

En nuestra planta como ya hemos comentado apartados anteriores tenemos 7 variables controladas y 4 variables manipuladas, por lo cual cumple la restricción de que la planta sea un sistema MIMO.

Esta estrategia de control no es muy utilizada en la industria porque su empleo requiere un esfuerzo significativo de modelado, sintonía y mantenimiento.

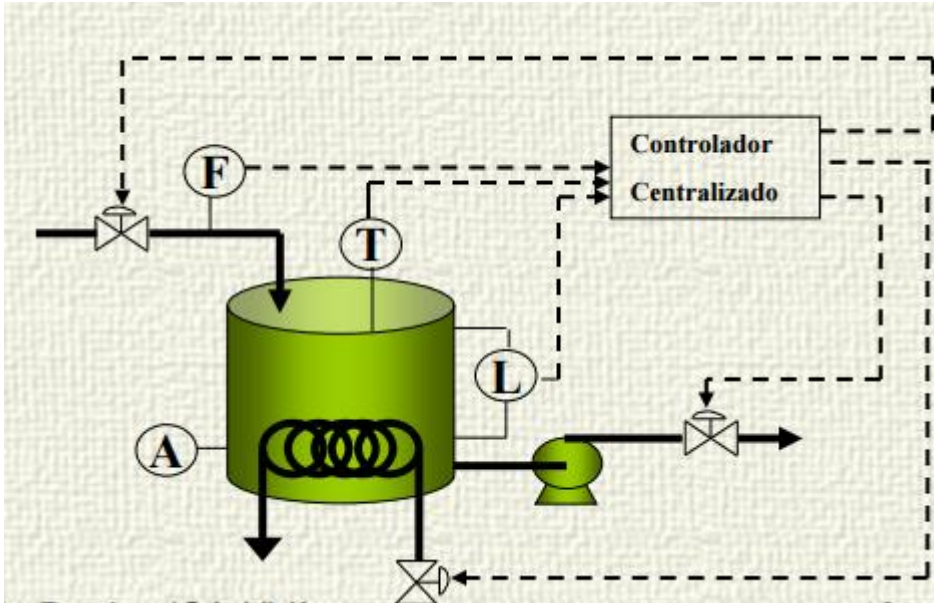


Figura 4.7.1: Esquema de un control por desacoplo.

En la figura 4.6.1 tenemos un esquema de control de un control por desacoplo, como podemos observar todo está centralizado es decir todas las variables de control y todas las variables manipuladas que hay interacción entre ellas la señal manipulada que sale de sus controladores se la multiplica por la matriz de desacoplo para evitar esta interacción.

Ahora vamos analizar la estructura interna:

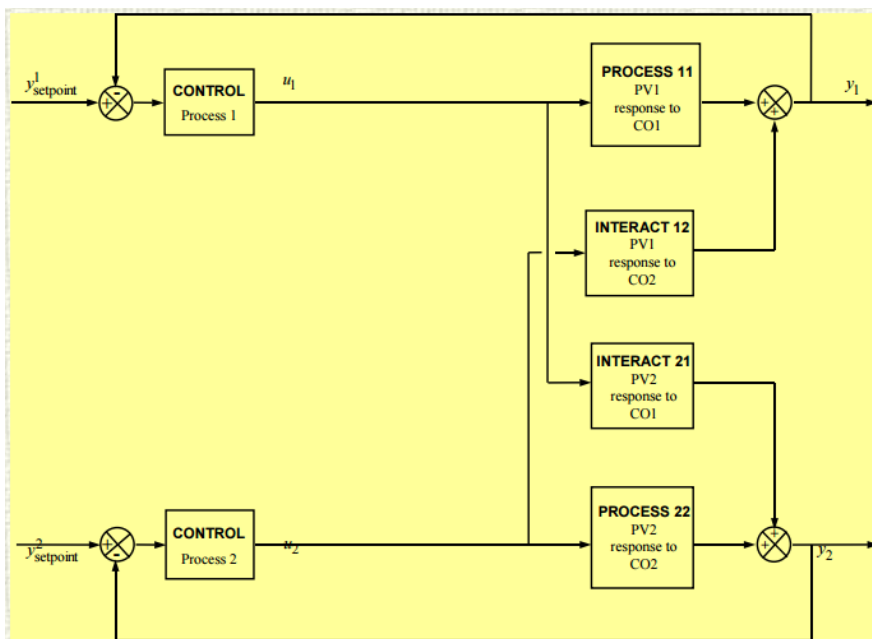


Figura 4.7.2: Interacción entre lazos de control.

En la figura 4.7.2 tenemos la interacción de los lazos de control, como podemos observar la  $y_1$  y la  $y_2$ , las variables controladas de ese ejemplo, por eso en la figura tenemos un bloque de interacción después de la salida del controlador a la otra variable manipulada.

En la figura 4.7.3 se puede observar mejor la estructura interna de este controlador, como para evitar la interacción de una variable manipulada con la otra variable controlada que no debería de haber se le multiplica a la salida del otro controlador una matriz de desacoplo y se le suma a la salida de tu controlador y esa es la señal manipulada, tanto para un controlador como para el otro.

Las dimensiones de la matriz interacción la determinamos según que variables manipuladas interacción con que variables controladas, puesto que al cambiar algunas variables manipuladas no tienen efecto sobre algunas variables controladas, esta matriz tiene que ser cuadrada.

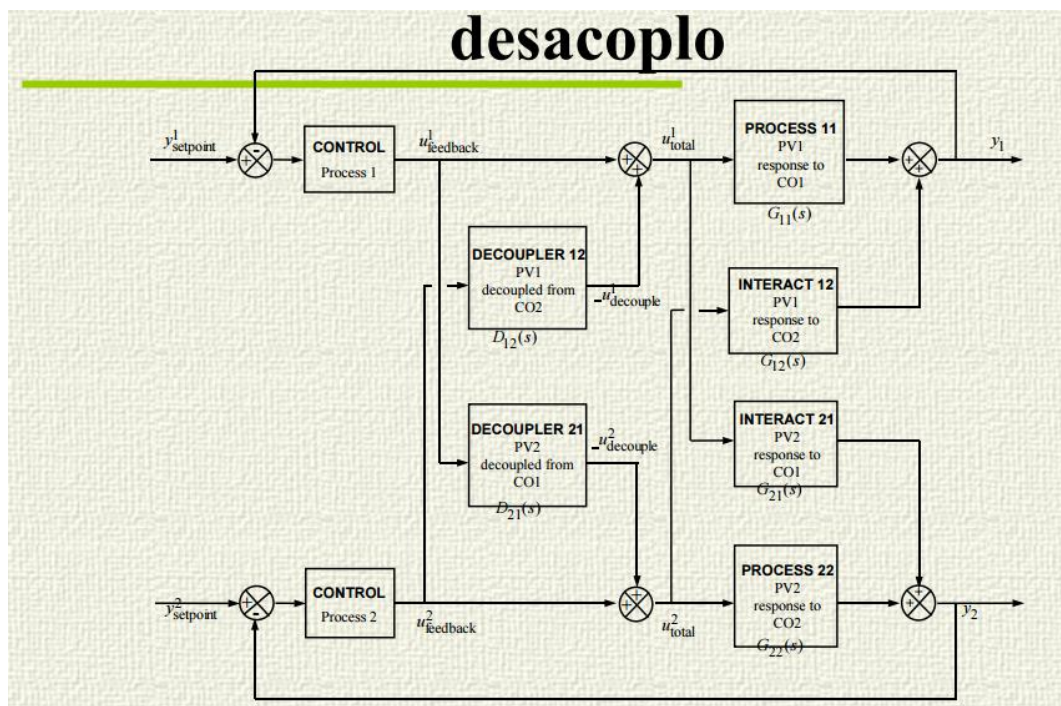


Figura 4.7.3: Estructura de control con desacoplo.

En la figura 4.7.3 tenemos la estructura de control con desacoplo, así es como se ve la estructura interna del controlador.

Para utilizar un matriz de desacoplo primero tenemos que diseñar los lazos de control a usar, en este caso hemos diseñado, como podemos observar en la figura 4.7.4, tenemos un control en cascada para la temperatura del reactor y

un cascada para la concentración, entre estos dos lazos no debería haber interacción pero efectivamente aunque halla poca pero la tenemos, por lo cual utilizamos una matriz de desacoplo para evitar esta interacción, este es otro tipo de control que se puede realizar a la planta.

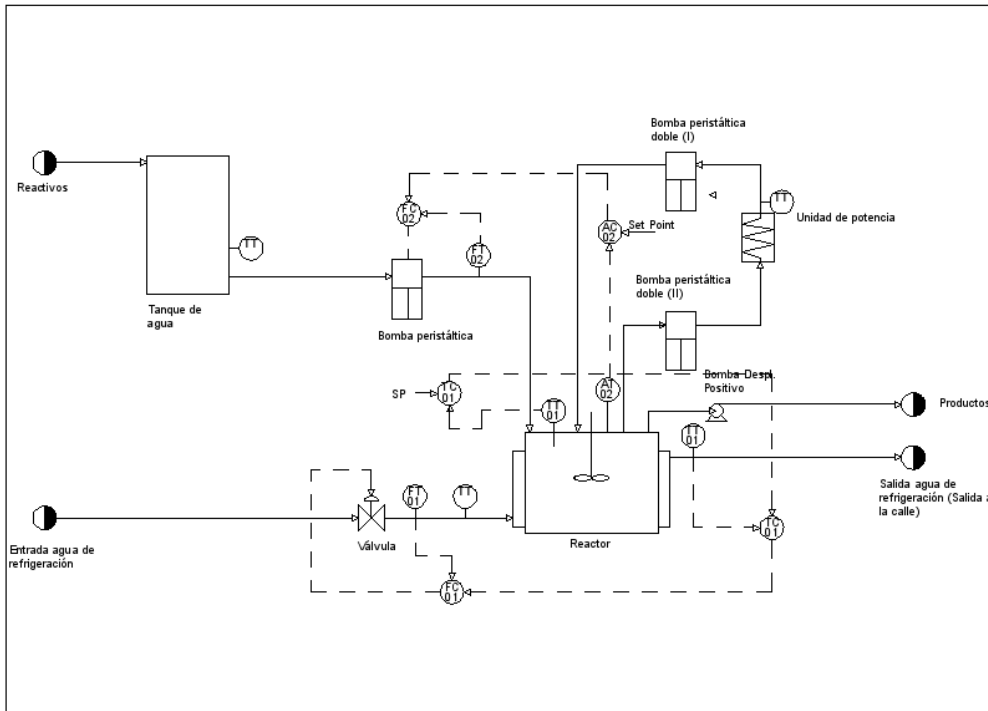


Figura 4.7.4: Diagrama P&ID del control de desacoplo.

Este control no se ha realizado en la simulación, pero también es un posible control bastante interesante que se podría realizar en la planta.



## 5. Sintonía de controladores PID

En este apartado vamos a explicar cómo hemos sintonizado los controladores PID que método hemos usado y que es un controlador PID.

### 5.1. Introducción a los controladores PID

Un controlador PID aunque su primera aplicación se hizo en 1911 y en 1939 se hizo el primer controlador comercial, en la actualidad es el más usado en la industria puesto que es bastante fácil de implementar en los computadores.

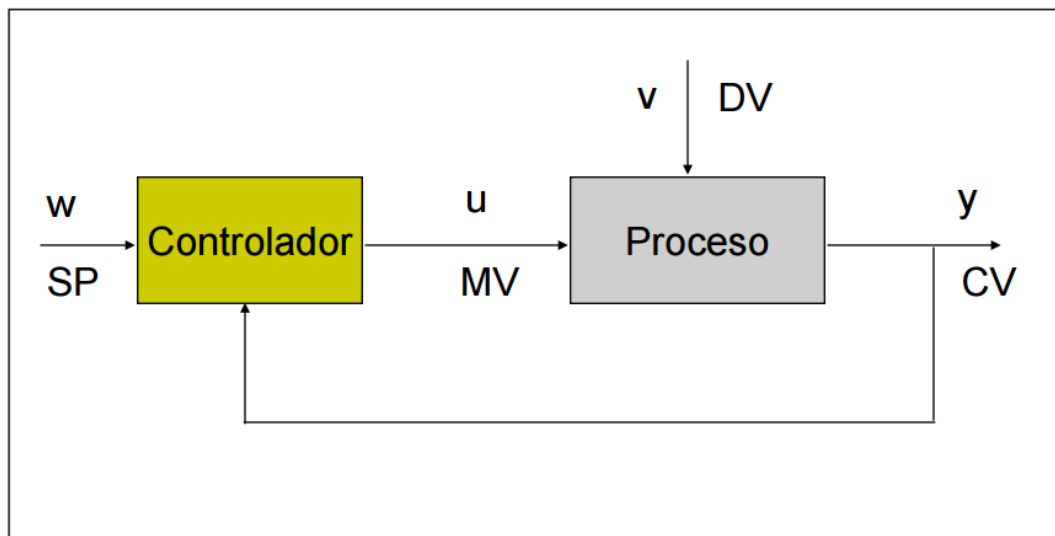


Figura 5.1.1: Diagrama de bloques controlador PID.

En la figura 5.1.1 tenemos el diagrama de bloques de un proceso con un controlador, como ya hemos explicado anteriormente el controlador compara dos señales, W e Y en este caso, y con ellas se obtiene la variable manipulada, u en este caso.

Ahora vamos a entrar en más profundidad y vamos a analizar que ecuaciones hay que programar en un controlador.

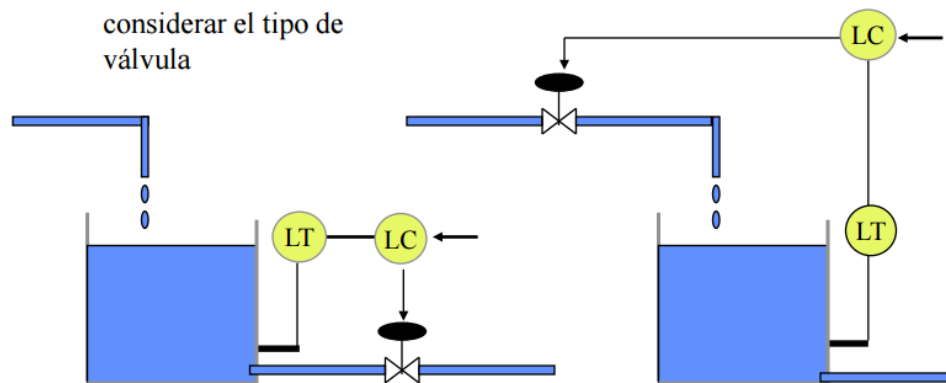
$$e(t) = w(t) - y(t)$$
$$u(t) = K_p \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(\tau) d\tau + T_d \frac{de}{dt} \right)$$

Figura 5.1.2: Ecuaciones de un controlador PID continuo.

En la figura 5.1.2 tenemos las dos ecuaciones que se necesita para programar un controlador PID, e es el error y es la diferencia entre el set point,  $w$ , y la  $y$ , o variable controlada.

El controlador PID tiene 3 parámetros de sintonía:

- $K_p$ : Este parámetro es la ganancia o el termino proporcional, y se mide en % del span de control o en % del span de la variable controlada.
- $T_i$ : Es el tiempo integral o termino integral, y se mide en minutos o en segundos.
- $T_d$ : Es el tiempo derivativo o termino derivativo, y se mide en minutos o en segundos.



Direct acting controller  $K_p < 0$  Reverse acting controller  $K_p > 0$

Figura 5.1.3: Acción directa o inversa en los controladores.

En la figura 5.1.3 tenemos un esquema para explicar la acción directa e inversa del controlador, en la parte de la izquierda de la figura 5.1.3 tenemos un controlador de nivel, si el nivel del tanque está por encima del set point significa que tenemos un error negativo entonces si la ganancia es positiva la variable manipulada,  $u$ , será negativa por lo cual la válvula se cerrara y el tanque se desbordara, por lo cual la ganancia tiene que ser negativa para que así la variable manipulada sea positiva y la válvula este abierta para que el tanque se vacíe hasta el valor del set point. En la parte de la derecha le pasa lo opuesto la ganancia tiene que ser positiva para que la variable manipulada sea negativa y la válvula se cierre.

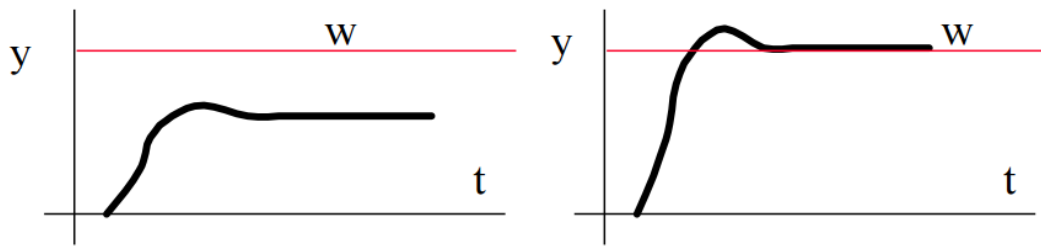


Figura 5.1.4: Acción integral de los controladores PID.

En la figura 5.1.4 tenemos el efecto de la acción integral de un controlador PID sobre una señal, la acción integral se encarga de eliminar el error estacionario, la acción integral continúa cambiando la  $u$  hasta que el error es cero.

$$u(t) = \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau$$

Figura 5.1.5: Fórmula de la acción integral de los controladores PID.

En la figura 5.1.5 tenemos la parte de la fórmula de la acción integral de un controlador PID,  $e$  es el error que ya hemos mencionado anteriormente como obtenerlo,  $T_i$  es el tiempo integral, es el tiempo que tarda la acción integral en igualar a la acción proporcional si  $e = \text{constante}$ .

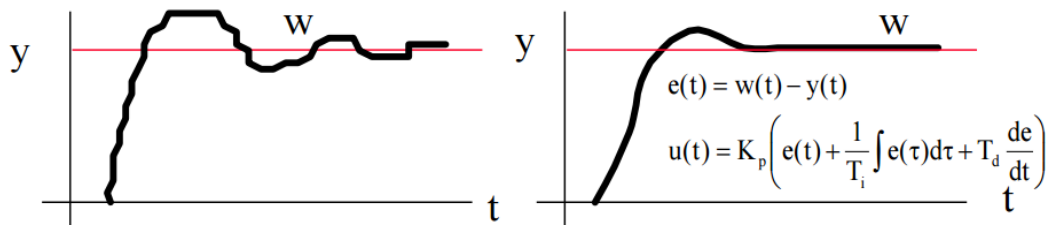


Figura 5.1.6: Acción integral de los controladores PID.

En la imagen 5.1.6 podemos observar el efecto de la acción derivativa de un controlador PID, la acción derivativa acelera la  $u$  si  $e$  crece y la modera si  $e$  decrece, evitando oscilaciones, estas oscilaciones las suele provocar la acción proporcional con ganancia alta para dar respuesta rápida, se provocan por una  $u$  excesiva.

$$u(t) = K_p T_d \frac{de}{dt}$$

Figura 5.1.7: Fórmula de la acción derivativa de los controladores PID.

En la figura 5.1.7 tenemos la fórmula de la acción derivativa de los controladores PID, Td es el tiempo que tarda la acción derivativa en igualar a la acción proporcional si e= a.t.

$$u(t) = K_p e(t) + \text{bias}$$

Figura 5.1.8: Fórmula de la acción proporcional de los controladores PID.

En la figura 5.1.8 tenemos la fórmula de la acción proporcional de un controlador PID, donde Kp es la ganancia proporcional.

Las tres acciones que hemos visto anteriormente son las que puede realizar un controlador, ahora bien, no se tiene por que usar las tres, se puede usar la acción proporcional e integral y sería un PI, se puede usar la acción proporcional y derivativa y sería un PD, o se puede usar solo la proporcional y sería un P, o las tres a la vez y sería un PID.

En nuestra planta ya que la mejoría de resultados usando un PID va a ser pequeña y requiere un esfuerzo mayor, se ha utilizado un PI en todos los controladores, como vamos a ver más adelante con buenos resultados.

## 5.2. Métodos de sintonía

El método de sintonía utilizado es S-IMC, a continuación, vamos a explicar en qué consiste este método que hemos utilizado.

Tipo controlador	Kp	Ti
PI	$\frac{\tau}{K(\lambda + d)}$	$\min(\tau, 4(\lambda + d))$

Figura 5.2.1: Tabla del cálculo de PI mediante S-IMC.

En la figura 5.2.1 tenemos la tabla para lo obtención de los parámetros del controlador PI mediante el método S-IMC para lazo abierto.

Por defecto el valor de λ, que es una variable que nosotros asignamos su valor, es igual a d, que es el retardo es decir lo que tarda en cambiar la variable controlada desde que nosotros cambiamos la variable manipulada. Si disminuimos λ se obtiene un control más agresivo, este parámetro es el que variamos para conseguir robustez en nuestro controlador.

Estas fórmulas son para lazo abierto, pero este método tiene mejores resultados en lazo cerrado, por lo cual vamos a explicar, a continuación, cómo se obtienen los parámetros del controlador en lazo cerrado.

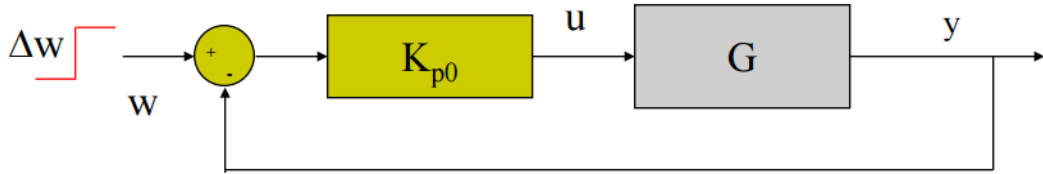


Figura 5.2.2: Diagrama de bloques de una planta.

La metodología que se lleva a cabo para este método es la siguiente, es un experimento en lazo cerrado por lo cual tenemos una ganancia que es  $K_{p0}$ , como podemos observar en la figura 5.2.2, y damos un salto a la referencia  $\Delta w$  y observamos el cambio de  $\Delta y$ , el tiempo de pico  $t_p$  y el sobrepico  $\Delta y_p$ . Estos parámetros los podemos observar mejor en la figura 5.2.3.

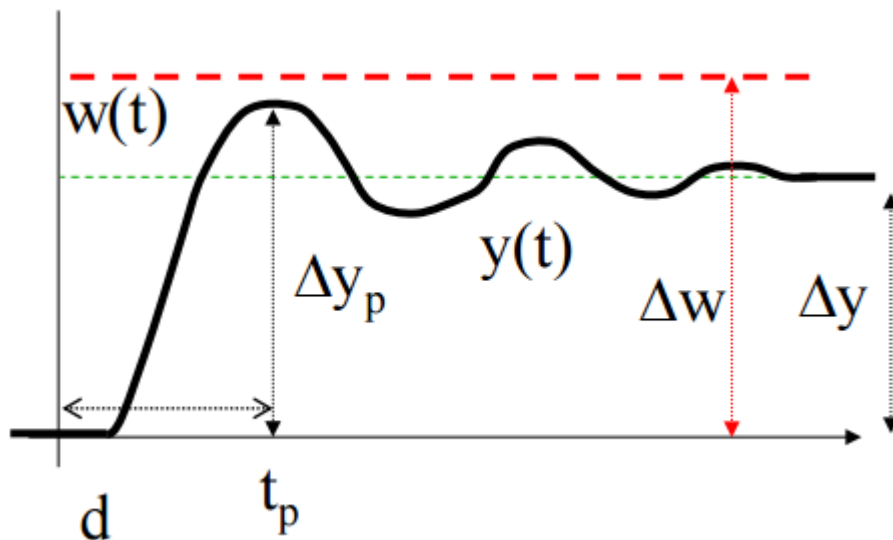


Figura 5.2.3: Gráfica de la respuesta del controlador y los parámetros.

El valor de  $K_{p0}$  la ganancia del controlador para que sea en lazo cerrado se lo ponemos nosotros, y esta ganancia la tenemos que elegir de tal manera que la respuesta de la variable controlada tenga oscilaciones como se puede apreciar en la figura 5.2.3.

$$b = \frac{\Delta y}{\Delta w}$$

$$O_s = \frac{\Delta y_p - \Delta y}{\Delta y}$$

$$A = 1.152O_s^2 - 1.607O_s + 1$$

$$K_p = \frac{K_{p0}A}{F} \quad \text{PI tuning rules}$$

$$T_i = \min\left(0.86A \left| \frac{b}{1-b} \right| t_p, 2.44t_p F\right)$$

Figura 5.2.4: Fórmula para la obtención de los parámetros del controlador en lazo cerrado.

En la figura 5.2.4 tenemos las fórmulas que se utilizan para la obtención de los parámetros del controlador PI utilizando el método S-IMC en lazo cerrado.

De estas fórmulas tenemos F que es un parámetro de sintonía, si aumentamos su valor por encima de 1 obtenemos sintonías más lentas y robustas y si lo decrecemos por debajo de ese valor se acelera la respuesta.

### 5.3. Conclusiones

Como ya hemos dicho en el apartado anterior hemos usado ese método porque tenemos que tener en cuenta que, al ser una simulación, al aplicar una acción a la variable manipulada en ese mismo instante se actuaba sobre la variable controlada sin haber un retardo, esto solo pasa en las simulaciones porque como ya se sabe en una planta física desde que se hace el control hasta que actúa sobre la variable controlada tiene un cierto tiempo, un retardo. Al ser este retardo cero no podíamos aplicar otros métodos porque al ser cero este parámetro y en la fórmula de otro método al estar en el numerador o denominador obteníamos cero o infinito en las variables. De los pocos que podíamos usar que son 3, el que hemos usado, el S-IMC,  $\lambda$  tuning y IMC Morai, nos hemos decantado por S-IMC porque es el único que es en lazo cerrado de los 3, porque es sencillo de usar y porque se obtienen buenos resultados.

## 6. Simulaciones

En este apartado vamos hablar de los resultados que hemos obtenido de nuestra planta en lazo cerrado, es decir cuando puesto los controladores.

### 6.1. Simulación de control de temperatura en el reactor

En el anexo 2 tenemos el código del programa realizado en EcosimPro para realizar la simulación de este control, en este apartado se comentarán los resultados de la simulación utilizando este control.

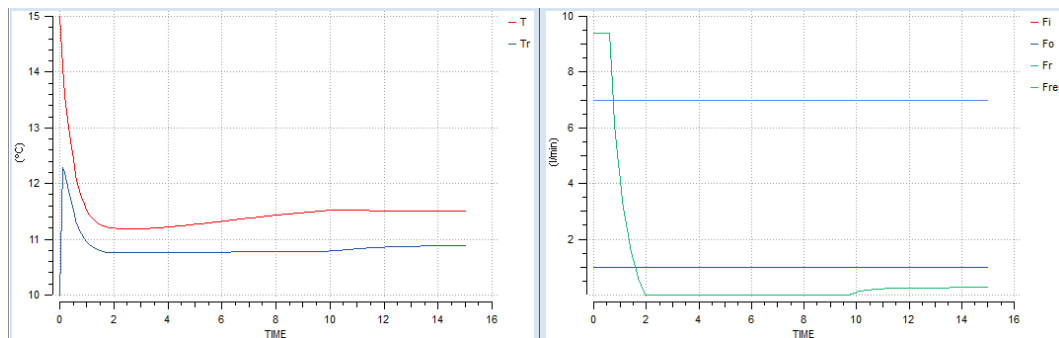


Figura 6.1.1: Resultados de simulación de control de temperatura del reactor.

En la figura 6.1.1 mostramos los resultados de la temperatura del reactor y de la camisa, y de los caudales. El control que hacemos es comparar la temperatura del reactor con una temperatura de referencia, y actuamos sobre la válvula para meter más flujo de líquido a la camisa o menos.

Como podemos observar partimos de una temperatura de 15 °C en el reactor y de 10 °C en la camisa como condiciones iniciales, al principio la válvula está abierta a tope y entra a la camisa 9,4 l/min, lo máximo que podemos introducir, puesto que la temperatura de referencia está situada en 11,5 °C, y cuando el reactor está por debajo de este valor cierra la válvula para que el reactor se caliente, así hasta que finalmente se estabiliza la temperatura del reactor en la temperatura de referencia, 11,5 °C.

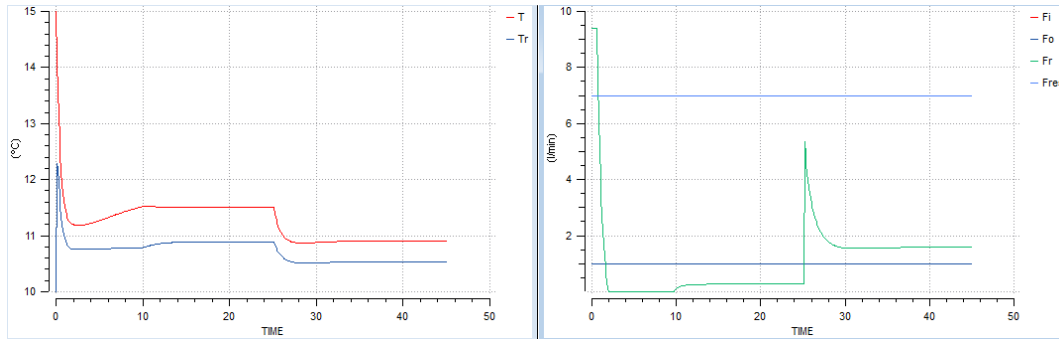


Figura 6.1.2: Resultados de simulación de control de temperatura del reactor cambiando la temperatura de referencia.

En la figura 6.1.2 tenemos los resultados cuando le damos otro valor a la temperatura de referencia para ver cómo actúa la planta para llegar a esa nueva temperatura de referencia. El cambio se le hemos dado a partir del minuto 25, y hemos pasado de 11,5 °C a 10,9 °C, observamos que como queremos enfriar la temperatura del reactor abrimos la válvula para flujo de líquido al refrigerante para enfriar hasta que llega a 10,9 °C y se mantiene, como observamos también varía la temperatura del refrigerante que está llega a un valor final de 10,5 °C.

Los parámetros que se han utilizado para el controlador tienen los siguientes valores:

- $P=-1$
- $T_i=10$

## 6.2. Simulación de control de caudal

En el anexo 3 tenemos el código del programa realizado en EcosimPro para realizar la simulación de este control, en este apartado se comentarán los resultados de la simulación utilizando este control.

Este control lo que se hace es abrir la válvula para que el flujo del líquido que entra a la camisa, Fr, se estabilice en el caudal que introducimos como referencia, como a la hora de hacer esto con EcosimPro obteníamos un lazo algebraico, se decidió resolver este lazo algebraico poniendo que la salida del controlador en lugar de ser la válvula es Fr, puesto que el caudal es una variable bastante rápida en alcanzar el valor, suponemos que tiene una acción instantánea y así evitamos este lazo algebraico.



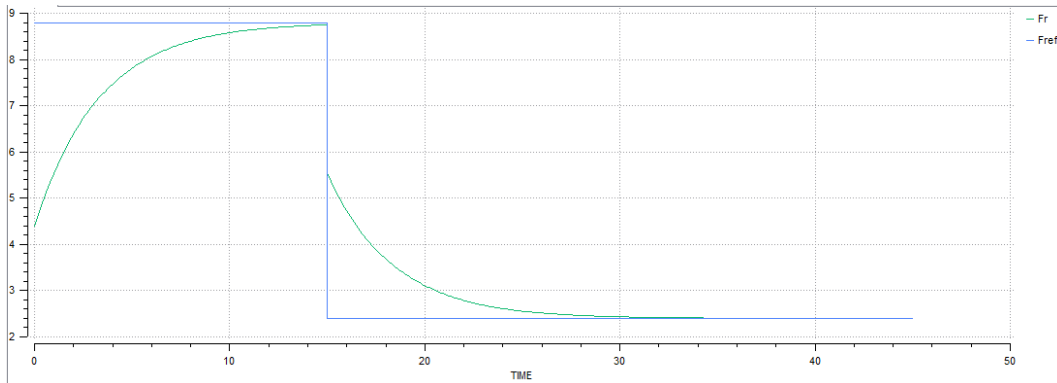


Figura 6.2.1: Resultados de simulación de flujo de control de caudal.

En la figura 6.2.1 tenemos como el controlador que regula el caudal Fr responde ante cambios en la variable de referencia, y al final se estabiliza en el valor que introducimos como referencia.

El primer valor de Fref, el flujo de referencia, es de 8,8 y el segundo valor es de 2,4.

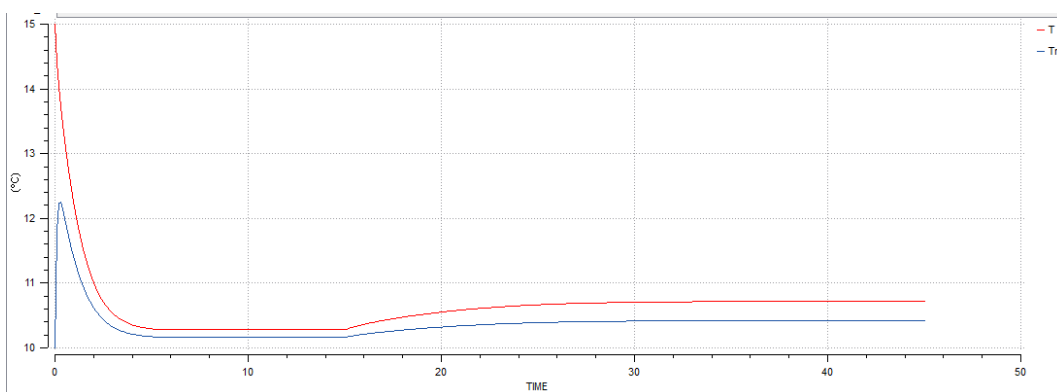


Figura 6.2.2: Resultados de simulación de la temperatura de control de caudal.

En la figura 6.2.2 mostramos como varia la temperatura según hemos cambiado Fr en la figura 6.3.1, al principio vemos como se enfría el reactor puesto que le estamos metiendo más flujo de refrigerante y a partir de los 15 minutos al bajar el flujo de refrigerante la temperatura del reactor aumenta.

También comentar que como la potencia que nos proporciona la unidad de potencia es de 9KW, no podemos calentar el reactor más de 11.8 °C, puesto que con esa potencia es la máxima temperatura que se puede alcanzar.

Teniendo un flujo de líquido de entrada a l reactor y de salida al reactor de 1 l/min, y un flujo de entrada y salida de resistencia de 7 l/min, le estamos metiendo mucho más líquido caliente que líquido frio, la resistencias nos dan una temperatura de 10,9 °C, y el reactor llega a una temperatura de 10,7 °C, algo lógico porque le estamos metiendo más líquido caliente que frio por lo cual prácticamente toda la temperatura que tiene el líquido al salir de las

resistencias es la temperatura que tenemos en el reactor, puesto que el flujo de refrigerante también es pequeño, si cambiamos los valores de los flujos de entrada y salida del reactor vemos como la temperatura del reactor ya no es prácticamente la misma que el líquido que sale de las resistencias, podemos hacer que sea menor jugando con estos parámetros.

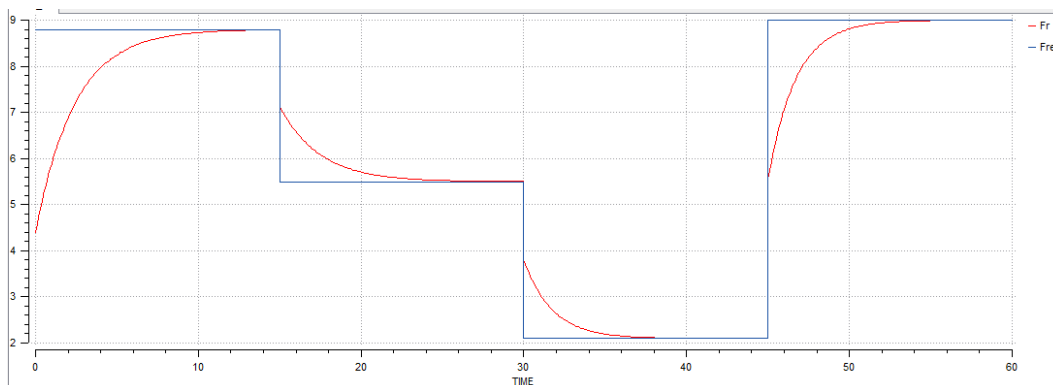


Figura 6.2.3: Resultados de simulación ante cambios en la consigna.

En la figura 6.2.3 tenemos cómo se comporta el controlador ante cambios en varios cambios en la consigna para que se pueda observar mejor, vemos que tarda unos 6 minutos en estabilizarse. Al ser la variable manipulada directamente el caudal Fr y no ser la apertura de la válvula observamos que al principio baja muy rápidamente de golpe por este motivo y es en el mismo instante que bajamos la señal de referencia porque no tenemos retardo al ser una simulación.

Los parámetros usados para este controlador son:

- $P=1$
- $Ti=1.5$

### 6.3. Simulación de control de temperatura en la camisa

En el anexo 4 tenemos el código del programa realizado en EcosimPro para realizar la simulación de este control, en este apartado se comentarán los resultados de la simulación utilizando este control.

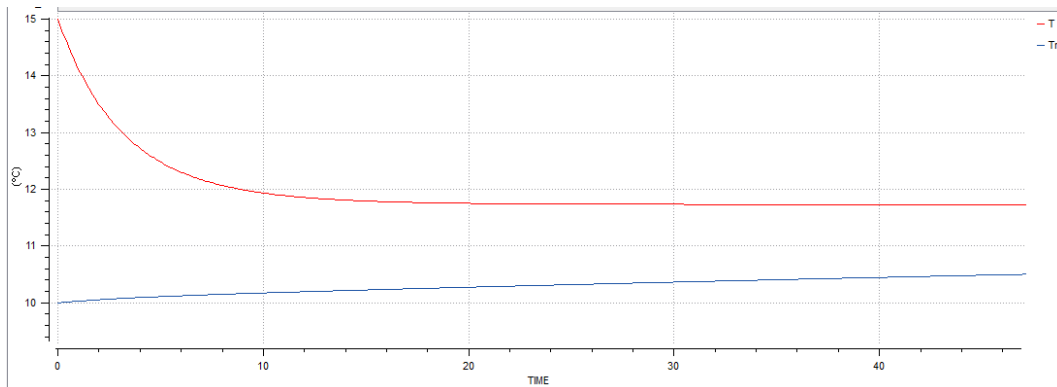


Figura 6.3.1: Resultados de la simulación de la temperatura de refrigeración.

En la figura 6.3.1 tenemos la gráfica para este control de temperatura, la temperatura de consigna está en 10,5 °C, la temperatura de la camisa inicialmente se encuentra a 10°C por lo cual cierra la válvula por lo que ya no entra flujo de refrigerante, la unidad de potencia nos calienta el agua como máximo a 11,8 °C por lo cual es a la temperatura que llega el reactor, y como no entra flujo de refrigerante vemos como el reactor no pierde temperatura porque le estas constantemente metiendo agua caliente y no entra refrigerante, y la camisa se va calentando poco a poco hasta que alcanza la temperatura deseada luego para que no siga subiendo y mantener esa temperatura tendrá que abrir la válvula y regular el refrigerante.

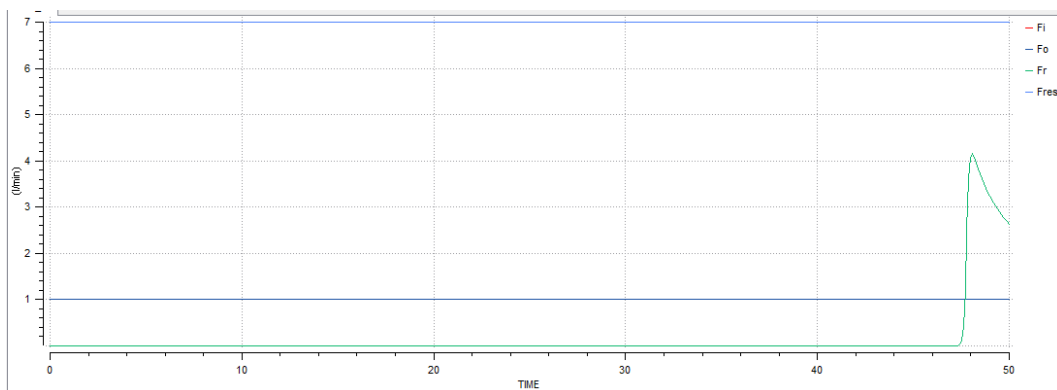


Figura 6.3.2: Resultados de la simulación del caudal para este control.

En la figura 6.3.2 podemos observar como para calentar la camisa el flujo de refrigerante está cerrado, y en el instante 49 abre la válvula por lo que entra refrigerante para mantener la temperatura de la camisa en valor de referencia.

Como podemos observar este control funciona bien, aunque lo más adecuado es el control de temperatura del reactor más que de la camisa eso es lo que más se usa.

Los parámetros usados en el controlador son:

- $P=-1$
- $T_i=10$

A partir de ahora vamos a analizar los resultados de estrategias de control avanzadas, que son las que más se utilizan a nivel industrial puesto que presentan mejores resultados que lazos de control simple.

## 6.4. Simulación de control en cascada para la temperatura del reactor

En este sub apartado vamos a analizar los resultados de la simulación de los tres controles en cascada que analizamos en el punto 4.4.

### 6.4.1. Control en cascada tipo 1

En el anexo 5 tenemos el código del programa realizado en EcosimPro para realizar la simulación de este control, en este apartado se comentarán los resultados de la simulación utilizando este control.

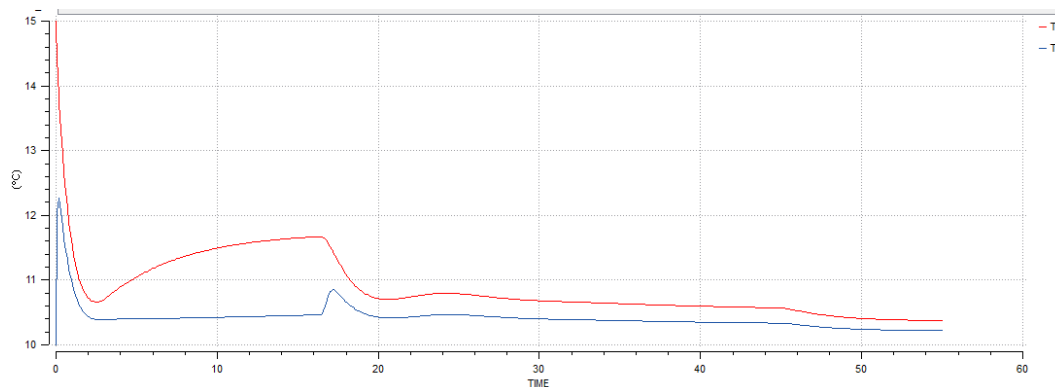


Figura 6.4.1.1: Resultados de la simulación de temperatura para este control.

En la figura 6.4.1.1 tenemos la gráfica de la temperatura tanto de la camisa como del reactor para varias temperaturas de referencia, al principio hasta el minuto 18, tenemos puesto que la temperatura de referencia es 11,8 °C, observamos que al principio abrimos la válvula para que se enfríe y cuando está por debajo cierra la válvula para que se caliente hasta alcanzar la temperatura de referencia, en el segundo tramo de la simulación hasta los 30 minutos observamos que la temperatura de referencia ha cambiado ahora está situada a 10,8 °C por lo cual la válvula se abre para enfriar el reactor, y en el último tramo de simulación hasta el final, observamos cómo se reduce la temperatura de referencia hasta 10,3 °C por lo cual la válvula se abre para que

entre más refrigerante y así bajar la temperatura del reactor. También se observa que de condiciones iniciales el reactor tiene 15°C y la camisa 10 °C, y que la temperatura que calienta el agua nos da una temperatura máxima de 11,8 °C.

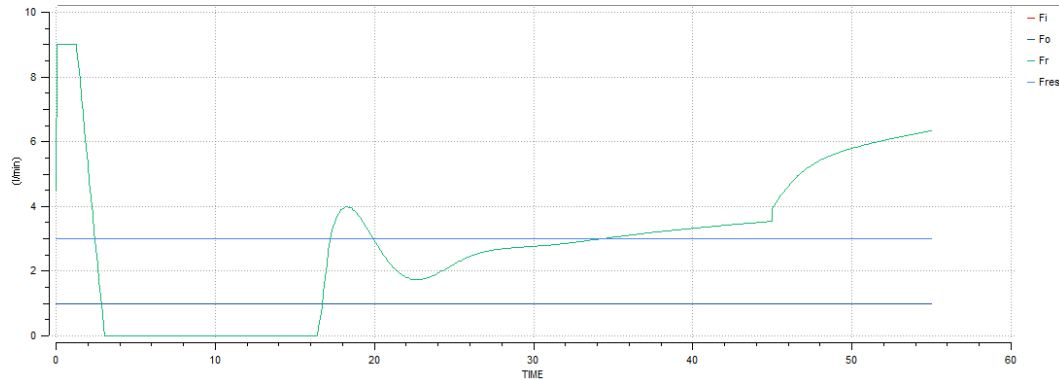


Figura 6.4.1.2: Resultados de la simulación de caudal para este control.

En la figura 6.4.1.2 tenemos la simulación de los caudales para obtener la temperatura de la figura 6.4.1.1, y observamos que al principio el caudal disminuye hasta cero para calentar el reactor, y luego se abre puesto que se quiere enfriar la temperatura del reactor.

También mencionar que estas simulaciones se han obtenido con una potencia de la unidad de potencia, donde están las resistencias, de 7 KW, ahora vamos hacer una simulación cambiando estos parámetros para poder aumentar la temperatura de referencia.

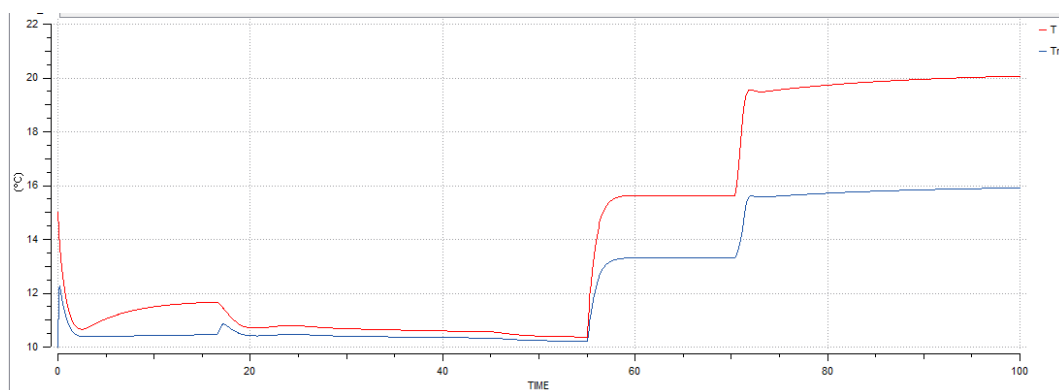


Figura 6.4.1.3: Resultados de la simulación de temperatura para este control aumentando la potencia.

En la figura 6.4.1.3 tenemos la simulación de temperatura cuando aumentamos la potencia que le metemos a las resistencias, siendo ahora la potencia de 150 KW, observamos que a partir de los 55 minutos es cuando se incrementa la potencia y al principio se tiene puesto de referencia 15,7 °C, después se aumenta hasta los 20,2 °C, y se puede apreciar que regula bastante bien la temperatura.

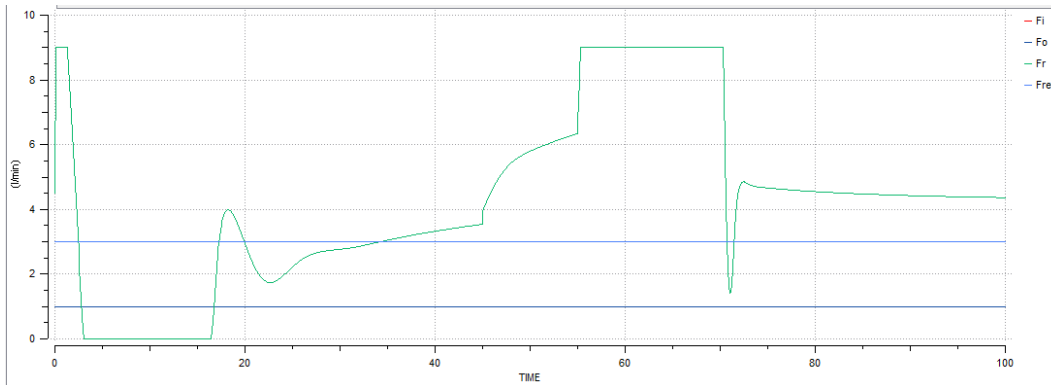


Figura 6.4.1.4: Resultados de la simulación de caudal para este control aumentando la potencia.

En la figura 6.4.1.4 se puede observar como variamos el caudal para obtener la temperatura deseada del reactor, a partir del minuto 55 es cuando le hemos aumentado la potencia a las resistencias.

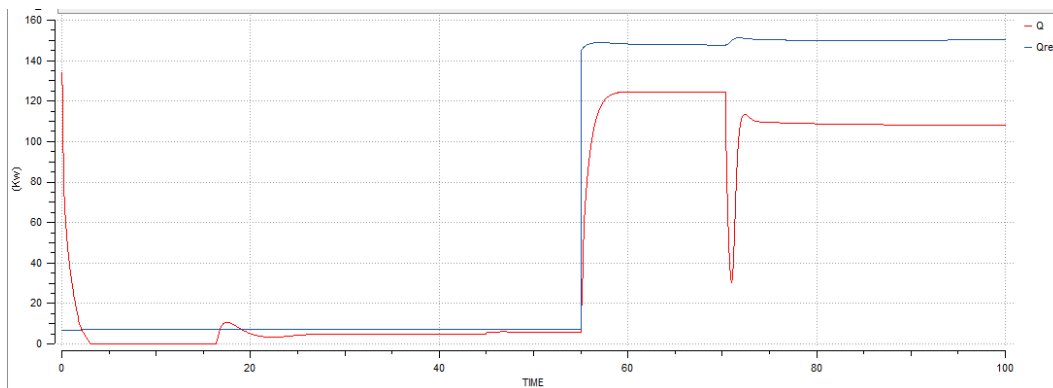


Figura 6.5.1.5: Resultados de la simulación de la potencia para este control.

En la figura 6.4.1.5 se puede observar los resultados de la potencia o el calor que aportan las resistencias,  $Q_{res}$ , y del calor que se transmite del reactor a la camisa,  $Q$ , en el minuto 55 es cuando aumentamos la potencia de las resistencias hasta los 150 KW, y al principio está potencia vale 7 KW. En las simulaciones solo se suele poner esta potencia porque es la que nos permite la instalación.

Por último de este control comentar que, aunque las condiciones iniciales son para obtener una temperatura baja, podemos observar que, aunque salgamos del rango en el que estamos operando el controlador funciona correctamente como hemos podido observar, siendo más rápido que en el apartado 6.2 puesto que comparamos tanto la variación de la temperatura del reactor como de la camisa.

Los parámetros que se ha usado para el controlador son:

- Primer controlador:

- $P=1$
- $T_i=10$
- Segundo controlador:
  - $P=-2$
  - $T_i=0.5$

Recordemos que faltaría un controlador, pero al ser un controlador de caudal y comparar  $F_r$  con la señal manipulada que recibimos del segundo controlador y variar la apertura de la válvula teníamos un lazo algebraico, para solucionarlo se ha optado por quitar este último controlador ya que es de efecto rápido y poner que la salida del segundo controlador es directamente el caudal de refrigeración para evitar así el lazo algebraico.

#### 6.4.2. Control en cascada tipo 2

En el anexo 6 tenemos el código del programa realizado en EcosimPro para realizar la simulación de este control, en este apartado se comentarán los resultados de la simulación utilizando este control.

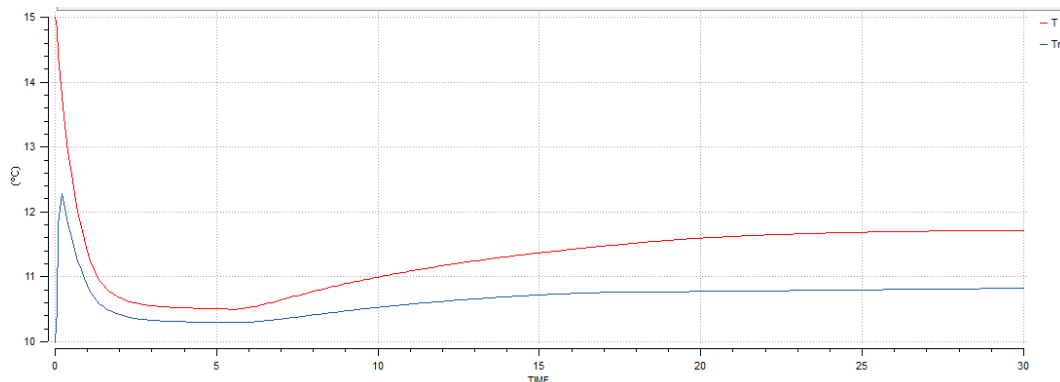


Figura 6.4.2.1: Resultados de la simulación de la Temperatura para este control.

En la figura 6.4.2.1 tenemos la simulación de la temperatura para este control, la temperatura de referencia está puesta a 11,8 °C y observamos como al final se establece en esa temperatura, también se puede observar que la configuración del PI es moderada.

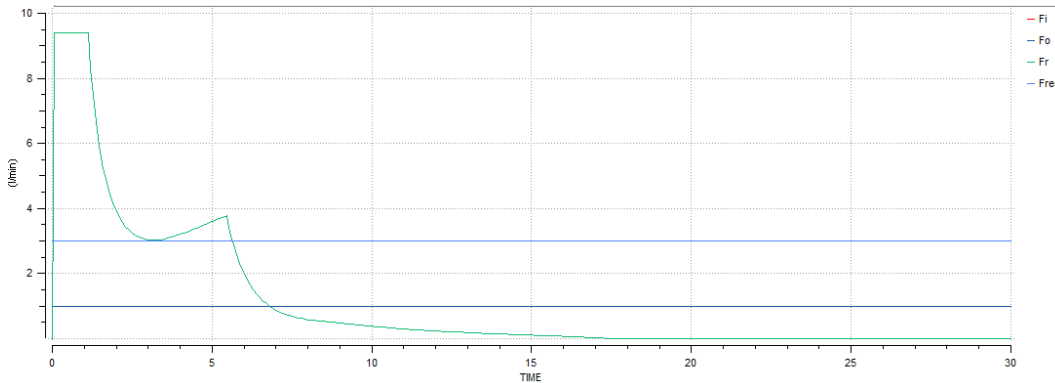


Figura 6.4.2.2: Resultados de la simulación de los caudales para este control.

En la figura 6.4.2.2 tenemos los resultados para el caudal, siendo el único que se varía  $F_r$  puesto que este control en cascada varía la apertura de la válvula, como hemos comentado antes aquí se puede observar como la variación del caudal es moderada sin que cambie bruscamente, se podría haber usado una configuración más agresiva de los parámetros, en este caso se ha preferido usar una más moderada, los parámetros usados para el controlador son los siguientes:

- Para el primer controlador:
  - $P=1$
  - $T_i=5$
- Para el segundo controlador:
  - $P=-2$
  - $T_i=10$

### 6.4.3. Control en cascada tipo 3

En el anexo 7 tenemos el código del programa realizado en EcosimPro para realizar la simulación de este control, en este apartado se comentarán los resultados de la simulación utilizando este control.

Este control según nos ha tocado implementarle para evitar el lazo algebraico es muy igual al control de temperatura del reactor, hemos quitado el control de caudal, lo que sale del lazo de temperatura del reactor es directamente el flujo en vez de hacer un control de caudal de refrigerante y variar la apertura de la válvula, como el flujo varía rápido la simulación sigue siendo efectiva. Por eso este control no vamos a comentarle demasiado profundo sus simulaciones porque van a ser muy parecidos al punto 6.2.



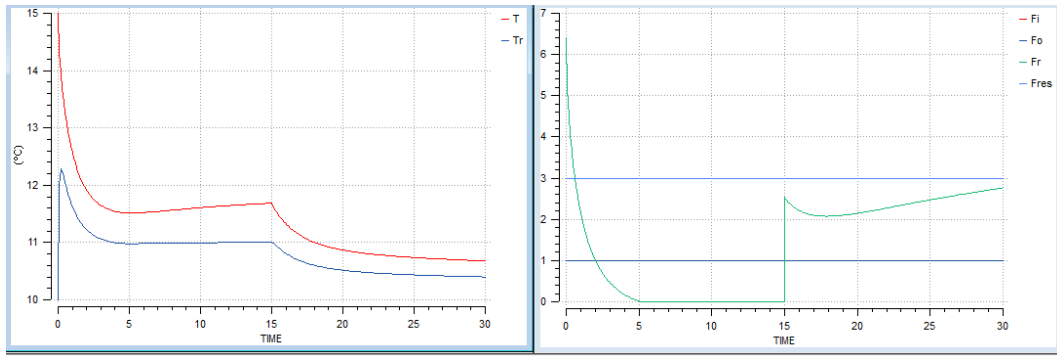


Figura 6.4.3.1: Resultados de la simulación de los caudales y temperaturas para este control.

En la figura 6.5.3.1 tenemos los resultados de la simulación de la temperatura y de los caudales, hasta el minuto 15 la temperatura de referencia es de 11,8 °C y vemos que se estabiliza en ese valor y después se cambia la temperatura de referencia hasta los 10,5 °C y se observa que abre la válvula para conseguirlo, se ha optado por una configuración de los controladores moderada sin ser muy agresiva.

Los parámetros usados para el controlador son:

- $K=-2$
- $T_i=10$

Como se puede comprobar el efecto que hacen los tres controles que hemos diseñado en cascada son muy parecidos y funcionan de forma parecida, estos 3 son los que más se implementan a nivel industrial cuando hablamos de reactores y observamos que los resultados son bastante buenos.

De los tres controladores en cascada diseñados el mejor es el tipo 1 porque es el más completo y el que va a tener mejores resultados tanto a perturbaciones como a cambios de consigna.

## 6.5. Simulación de control Feedforward

En el anexo 8 tenemos el código del programa realizado en EcosimPro para realizar la simulación de este control, en este apartado se comentarán los resultados de la simulación utilizando este control.

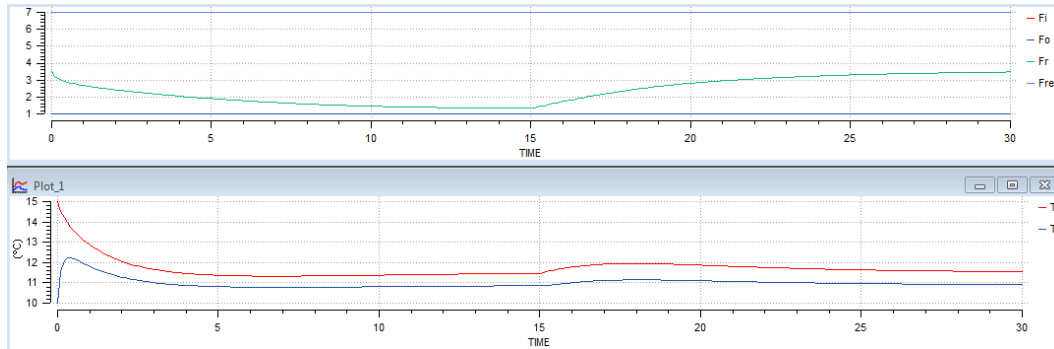


Figura 6.5.1: Resultados de la simulación de los caudales y temperaturas para este control.

En la figura 6.5.1 podemos ver los resultados de la simulación de los caudales y temperaturas para este control, hasta el minuto 15 observamos como la temperatura del reactor se estabiliza en 11,5 °C siendo la temperatura de entrada del flujo al reactor de 10 °C, ahora en el minuto 15 lo aumentamos a 12 °C y observamos como el controlador abre el flujo de la camisa para bajar la temperatura debido a este incremento, y podemos observar que el controlador funciona correctamente y corrige esta perturbación sin ser demasiado lento.

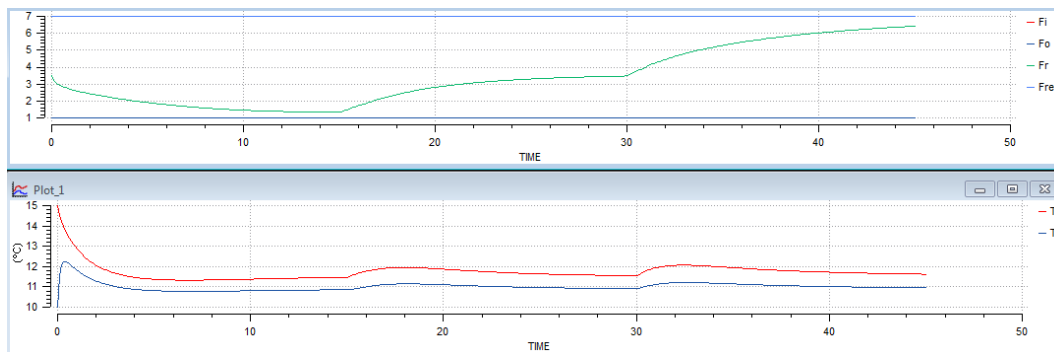


Figura 6.5.2: Resultados de otra simulación de los caudales y temperaturas para este control.

En la figura 6.5.2 tenemos los resultados de otra simulación para ver cómo se comporta el controlador ante un salto de 12 °C a 15 °C, y se puede observar que abre el caudal para enfriar hasta estabilizarse en 11,5 °C.

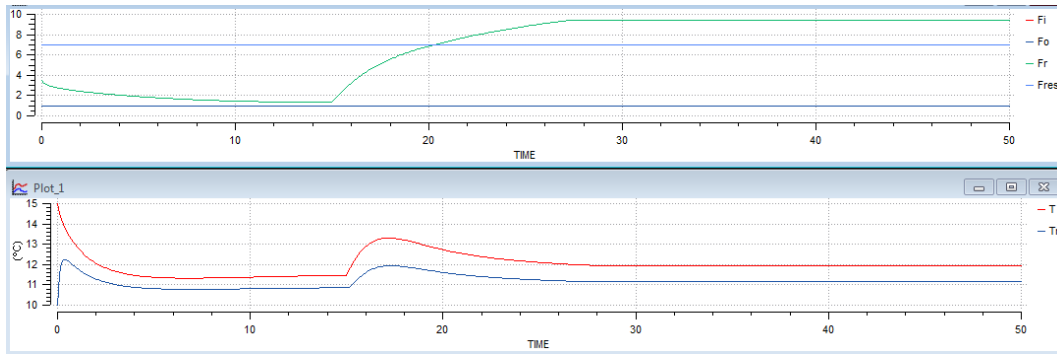


Figura 6.5.3: Resultados de simulación de los caudales y temperaturas para este control.

En la figura 6.5.3 tenemos una simulación para ver el funcionamiento de este control, en este caso se ha aumentado en 10 °C la perturbación a partir del minuto 15, y cómo podemos observar corrige esta perturbación bastante bien, no llega a 11,5 °C puesto que ya ha abierto toda la válvula de refrigerante y no puede enfriarlo más, bastaría con aumentar el caudal de líquido que entra al reactor,

Los parámetros usados en el controlador son:

- $P=-1$
- $T_i=10$

Aunque hemos visto en la simulación que este controlador funciona bien, es decir ante una variación en la perturbación responde y estabiliza, ahora vamos a explicar porque es mejor no utilizar este tipo de control en la planta como hemos comentado en el apartado 4.5.

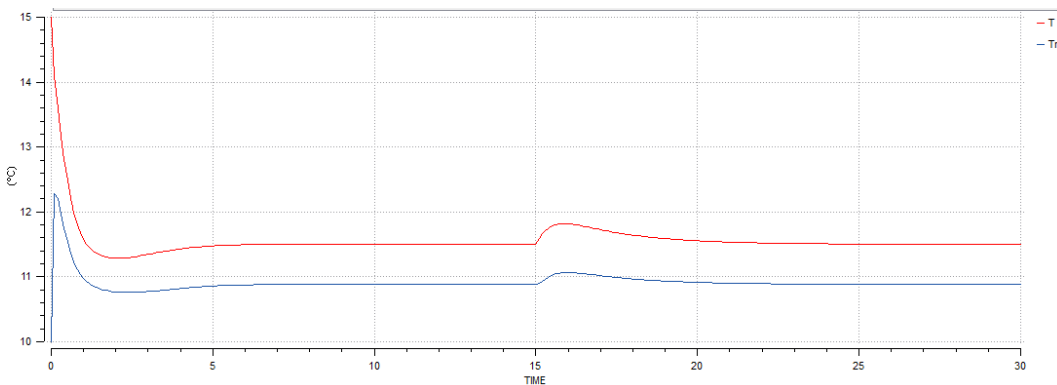


Figura 6.5.4: Resultados de simulación de los caudales y temperaturas para este control.

En la figura 6.5.4 tenemos un lazo de control de temperatura del reactor, sin ser feedforward, a partir del minuto 15 le incrementamos en 5 °C la temperatura de entrada del flujo de reactivo, y como podemos observar comparado con las imágenes anteriores se estabiliza mucho más rápido que si

tenemos un feedforward, por eso es por lo que en este caso no se podría utilizar un feedforward, porque se obtiene peores resultados con el que sin él.

## 6.6. Simulación de control de concentración

En el anexo 9 tenemos el código del programa realizado en EcosimPro para realizar la simulación de este control, en este apartado se comentarán los resultados de la simulación utilizando este control.

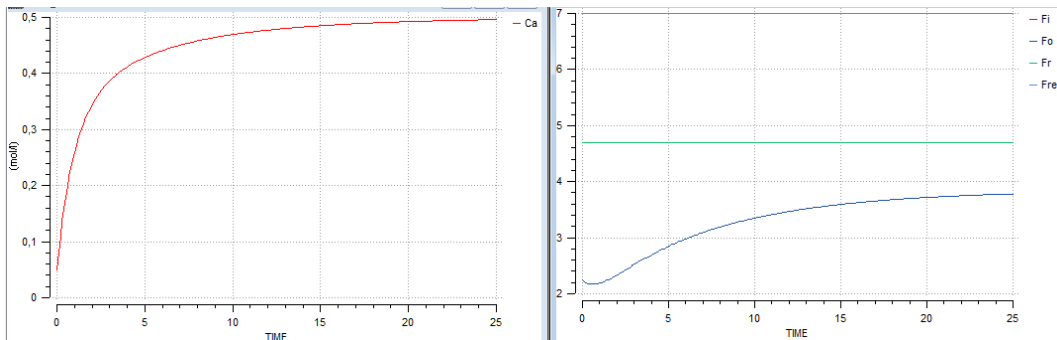


Figura 6.6.1: Resultados de simulación de los caudales y concentración para este control.

En la figura 6.6.1 tenemos los resultados de la variación de la concentración y los caudales, como varia  $F_i$  para obtener la concentración de referencia de 0,5%.

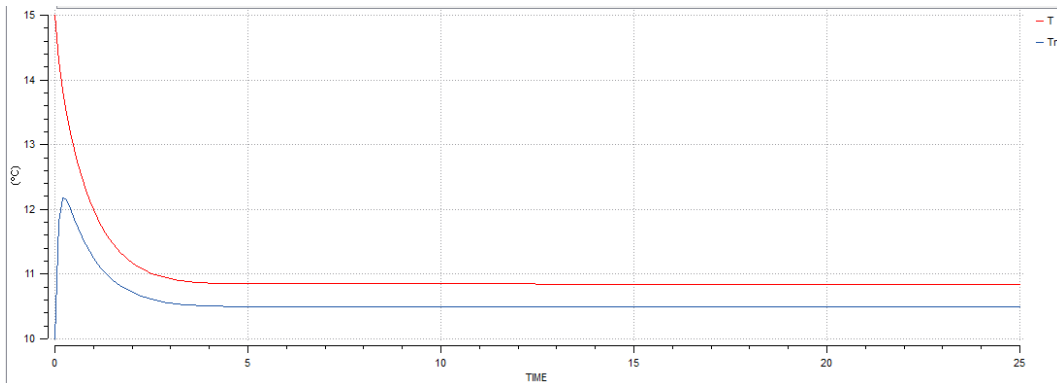


Figura 6.6.2: Resultados de simulación de las temperaturas para este control.

En la figura 6.6.2 tenemos los resultados de la simulación de la temperatura del reactor y de la camisa para conseguir que un 0,5% de producto no reaccione.

Ahora vamos a aumentar la concentración que reacciona, es decir disminuir la concentración de las gráficas, y ver qué resultados se obtienen.

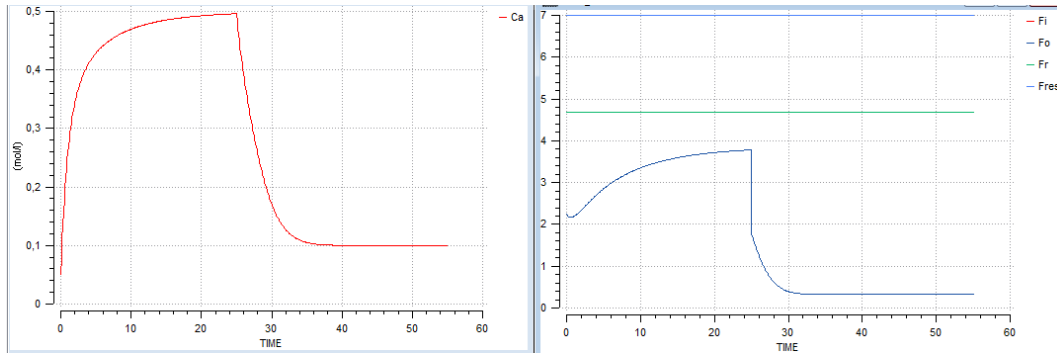


Figura 6.6.3: Resultados de simulación de los caudales y concentración para este control.

En la figura 6.6.3 se muestra otra simulación, marcando ahora como referencia una concentración que no reacciona del 0,1%, como se puede observar disminuye el caudal de entrada para que reaccione más reactivo.

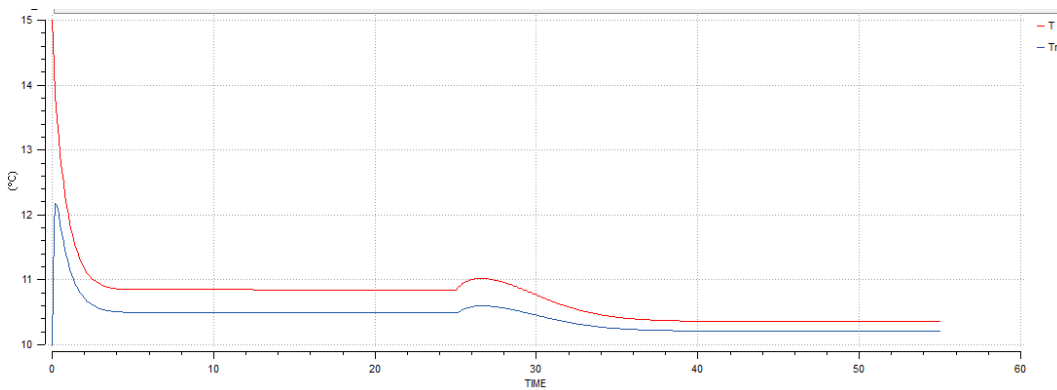


Figura 6.6.4: Resultados de simulación de las temperaturas para este control.

En la figura 6.6.4 se tiene los resultados de la temperatura para alcanzar solo un 0,1% de reactivo que no reaccione y como se puede observar la temperatura del reactor disminuye debido que la concentración aumenta y por lo cual aumenta el tiempo de retención.

Se puede observar que el controlador funciona correctamente puesto que varía el caudal de entrada para obtener la concentración que queremos, y como podemos observar los hace rápido y de forma correcta. Para hacer esta simulación y que no tuviéramos problemas de lazos algebraicos se ha tenido que quitar en la simulación el lazo de caudal entonces la salida manipulada del control de concentración es el flujo de entrada que entra al reactor.

Los parámetros usados en el controlador son:

- $K=5$
- $T_i=10$



## 7. Conclusiones

Después de hacer este trabajo viendo las simulaciones y los resultados obtenidos, las ecuaciones están bien planteadas porque efectivamente las variables cambian de forma similar a lo que lo haría en la realidad.

Las estrategias de control diseñadas también funcionarían, se podría haber usado alguna estrategia de control más puesto que al tener un sistema MIMO se pueden diseñar muchos sistemas de control, los expuestos aquí son sistemas de control bastante usados en la realidad y cómo podemos observar en las simulaciones se obtienen buenos resultados.

También como hemos podido observar al solo poder meter como máximo una potencia de 9 KW a las resistencias se obtienen temperaturas bajas, por lo que mejorando la instalación del laboratorio y permitiendo dar más potencia se pueden obtener temperaturas más altas, puesto que lo normal sería temperaturas de 50 °C porque así se puede ver mejor las respuestas de los sistemas de control.

Otra cosa que habría que mencionar es que en la salida como ya hemos comentado tenemos una bomba de desplazamiento positiva, es una bomba bastante potente por lo que está sobredimensionada, con una bomba más pequeña sería suficiente, ya que por gravedad no se vaciaría porque el reactor por abajo no tiene la salida de agua si no está colocada en la parte superior.

Una variable muy importante del reactor, aunque no se habla mucho, es el nivel de líquido en su interior, puesto que si se vacía es bastante malo y si se llena en exceso se puede desbordar, a parte que al simular una reacción química esta depende del volumen por lo cual tiene que ser constante y el caudal que entra tendría que ser igual al que sale, como ya se he mencionado antes está diseñado los tubos para que en el reactor siempre halla 4,68 litros, aunque no le entre líquido de reactivo.

Por tanto, es una planta que funciona bien pero que necesita más potencia para ser eficaz para el departamento de automática. Al tener muchas variables controladas y manipuladas se pueden enseñar muchos tipos de estrategias.





## Bibliografía

- J. Acedo Sánchez. “Instrumentación y control avanzado de procesos”.
- Pedro Ollero de Castro y Eduardo Fernández Camacho. “Control e instrumentación de procesos químicos”.
- L. Puigjaner, P. Ollero, C. de Prada y L. Jiménez. “Estrategias de modelado, simulación y optimización de procesos químicos”.
- P. Ollero de Castro y E. Fernández Camacho. “Instrumentación y control de plantas químicas”.
- K. J. Aström. “Advanced control PID”.
- Apuntes de la asignatura control de procesos de Cesar de Prada. Enlace: <http://www.isa.cie.uva.es/~prada/>



## Anexo 1: Código del modelado del reactor

```
/*-----  
Modelado del reactor en lazo abierto  
LIBRARY: DEFAULT_LIB  
FILE: Reactor  
CREATION DATE: 02/03/2016  
-----*/  
USE MATH  
USE CONTROL  
COMPONENT Reactor_Bueno  
DATA --Poner las unidades como las tengo apuntadas en el folio.  
REAL Ap=0.5 -- Apertura de la valvula  
--REAL R -- El valor de la resistencia  
REAL A=0.3 UNITS "m^2" -- El area de intercambio de calor, unidades m^2  
REAL V=4.67 UNITS "l" -- Volumen del reactor, unidades en l  
REAL Vc=1 UNITS "l" --Volumen de la camisa  
REAL Cer=4.18 UNITS "Kj/Kg" -- Calor especifico, unidades en Kj/Kg  
REAL Tin=10 UNITS "°C" -- Temperatura del caudal que entra al reactor, es la  
ambiente, unidades °C  
REAL Pir=15 UNITS "Bar" -- Presion de entrada a la camisa en bar  
REAL Ro=1 UNITS "Kg/l" -- Densidad del agua, unidades Kg/l  
REAL G=9.8 UNITS "m/s^2" -- Gravedad, unidades m/s^2  
REAL KI1=0 -- Constante de perdidas en la tuberia, al no poder medirlo  
exactamente porque aun no esta montada la planta, al ser un tramo muy pequeño  
las ponemos despreciables  
REAL Cv=3.57 -- Constante de la valvula  
REAL Hic=0.08 UNITS "m" -- Es la diferencia entre la altura de entrada y la  
salida del agua en esa linea, unidades m.  
REAL Hcam=0.33 UNITS "m" -- Altura de la camisa del reactor, unidades m  
REAL Hsr= 0.10 UNITS "m" -- Diferencia entre la salida de agua del reactor a la  
bomba y el desague, unidades m.  
REAL Hreac= 0.12 UNITS "m" -- Altura de liquido que hay por encima de la  
salida a la bomba centrifuga, unidades m  
--Para la reaccion quimica hemos cogido la formacion de agua, H2+O2 -> H2O  
REAL E=2420 UNITS "J/mol" -- Parametro propio de la reaccion, unidades J/mol  
REAL Inal= 20 UNITS "Kj/mol" -- Valor constante, lo que reacciona cada  
segundo en la reaccion, unidades KJ/mol  
REAL Rr=8.31434 UNITS "J/mol*K" --Constante universal de los gases,  
unidades J/(mol*K)  
--E/Rr=3000  
REAL Cai= 0.8 UNITS "mol/l" -- Concentracion inicial de A en mol/l  
REAL K=1.380 UNITS "s^-1"--Esta constante tiene que estar s^-1.  
REAL Vbp1=1  
REAL Vbp2=3  
DECLS  
REAL U -- Valor del coeficiente de intercambio de calor
```

REAL mr UNITS "Kg" -- Masa del reactor, unidades Kg.  
 REAL mc UNITS "Kg" -- Masa de la camisa  
 REAL Wro UNITS "Kg/min" -- Flujo de Caudal que le entra a la camisa  
 REAL Wr UNITS "Kg/min" -- Flujo de caudal que le sale a la camisa  
 REAL Fr UNITS "l/min" -- Caudal que entra y sale de la camisa, ambos son iguales, unidades l/min  
 REAL T=15 UNITS "°C" -- Temperatura del reactor, unidades C°  
 REAL Tr=10 UNITS "°C" -- Temperatura de la camisa  
 REAL Wi UNITS "Kg/min" -- Flujo de caudal que entra al reactor de la calle, unidades Kg/min  
 REAL Fi UNITS "l/min" -- Caudal que entra al reactor de la calle, unidades l/min  
 REAL Wres UNITS "Kg/min" -- Flujo de caudal que entra desde la resistencia, unidades Kg/min  
 REAL Fres UNITS "l/min" -- Caudal que entra desde la resistencia, unidades l/min  
 REAL Tres UNITS "°C" -- Temperatura del caudal que entra desde la resistencia, unidades °C  
 REAL Hb UNITS "l/min" -- Altura que da la bomba dosificadora, esta la ponemos nosotros  
 REAL Qres UNITS "Kw" -- Calor producido por las resistencias  
 --REAL I -- Intensidad que enviamos a las resistencias  
 REAL Fo UNITS "l/min" -- Caudal de salida del reactor, unidades l/min.  
 REAL Wo UNITS "Kg/min" -- Flujo de caudal de salida del reactor, unidades Kg/min  
 REAL Tro UNITS "°C" -- Temperatura del flujo que sale de la camisa, unidades °C  
 REAL Q UNITS "Kw" -- Calor por conduccion o por conveccion  
 REAL Ca=0.05 UNITS "mol/l" -- Concentracion de a, hemos cogido que el producto a se tranforma en un producto b, unidades mol/l.  
 REAL P UNITS "Kw" -- Potencia que da la unidad de potencia, unidades en W.  
 REAL Vreac -- Velocidad de la reaccion  
 REAL Mat UNITS "Kj\*°C/min"  
 REAL Ment UNITS "Kj\*°C/min"  
 REAL Msal UNITS "Kj\*°C/min"  
 REAL Tk UNITS "K" --Temperatura del reactor en Kelvin  
 DISCRETE  
 CONTINUOUS  
 --Ecuacion del coeficiente global de transferencia de calor ¿Preguntar si es necesaria usar?  

$$U=0.074+1.982*Fr*10$$
 Tro=10  
 Hb=75  
 --Fo y Fi tienen que ser iguales porque el volumen del reactor es constante  
 --Ecuaciones que relacionan el caudal con la altura de las bombas peristalticas  

$$Fi=Vbp1$$

$$Fo=Fi$$

$$Fres=Vbp2$$
 -- Formula de calculo de caudal cuando tenemos una valvula

```

Fr=((1/1.16)*((Pir-Ro*G*Hcam-
Ro*G*Hic)/(Ro*(Kl1+(1/((Ap**2)*(Cv**2))))))**((1/2)))/3.6
mr=V*Ro -- Masa del reactor es volumen por densidad
mc=Vc*Ro -- Masa de la camisa
Q=U*A*(T-Tr) -- Transferencia de calor por conduccion y conveccion, calor que
perdemos en el encamisado
-- E=mr*Cer*T --Energia
Qres=P --I**2*R--Calor producido en la resistencia --> P=V*I, La v es constante,
y la I es la que tenemos que ver que no pase la maxima permitida por la unidad de
potencia.
Wro=Fr*Ro -- Calculo del flujo máximo
Wr=Wro
Wi=Fi*Ro
Wres=Fres*Ro
Wo=Fo*Ro
Mat=Wi*Cer*(Tin-T)
Ment=Wr*Cer*Tr
Msal=Wro*Cer*Tro
--Balance de materia a la camisa
mc*Cer*Tr'=Msal-Ment+Q
--Balance de materia al reactor
mr*Cer*T'=Mat-Q+Qres
Tk=T+273
--Ecuacion para el calculo de Tres
Fres*Ro*Cer*T + Q = Fres*Ro*Cer*Tres
--Ecuaciones que relacionan el calor de la resistencia con el de una reaccion
quimica
Vreac=V*K*exp(-E/(Rr*Tk))*Ca
P=Vreac*Inal
V*Ca'=Wi*Ca- Wi*Ca-Vreac
--V*K*exp(-E/(Rr*T))*Ca --> Esta es la velocidad de reaccion
END COMPONENT

```



## Anexo 2: Código del control de temperatura

```
/*-----  
Lazo de control de temperatura del reactor  
LIBRARY: DEFAULT_LIB  
FILE: Reactor  
CREATION DATE: 02/03/2016  
-----*/  
USE MATH  
USE CONTROL  
COMPONENT Reactor_Bueno_ControlPID  
DATA  
REAL A=0.3 UNITS "m^2" -- El area de intercambio de calor, unidades m^2  
REAL V=4.67 UNITS "l" -- Volumen del reactor, unidades en l  
REAL Vc=1 UNITS "l"  
REAL Cer=4.18 UNITS "Kj/Kg" -- Calor especifico, unidades en Kj/Kg  
REAL Tin=10 UNITS "°C" -- Temperatura del caudal que entra al reactor, es la  
ambiente, unidades °C  
REAL Pir=15 UNITS "Bar" -- Presion de entrada a la camisa en bar  
REAL Ro=1 UNITS "Kg/l" -- Densidad del agua, unidades Kg/l  
REAL G=9.8 UNITS "m/s^2" -- Gravedad, unidades m/s^2  
REAL KI1=0 -- Constante de perdidas en la tuberia, al no poder medirlo  
exactamente porque aun no esta montada la planta, al ser un tramo muy pequeño  
las ponemos despreciables  
REAL Cv=3.57 -- Constante de la valvula  
REAL Hic=0.08 UNITS "m" -- Es la diferencia entre la altura de entrada y la  
salida del agua en esa linea, unidades m.  
REAL Hcam=0.33 UNITS "m" -- Altura de la camisa del reactor, unidades m  
REAL Hsr= 0.10 UNITS "m" -- Diferencia entre la salida de agua del reactor a la  
bomba y el desa gue, unidades m.  
REAL Hreac= 0.12 UNITS "m" -- Altura de liquido que hay por encima de la  
salida a la bomba centrifuga, unidades m  
--Para la reaccion quimica hemos cogido la formacion de agua, H2+O2 -> H2O  
REAL E=2420 UNITS "Kj" -- Parametro propio de la reaccion, unidades KJ  
REAL Inal= 20 UNITS "Kj/mol" -- Valor constante, lo que reacciona cada  
segundo en la reaccion, unidades KJ/mol  
REAL Rr=8.31434 UNITS "J/mol*K" --Constante universal de los gases,  
unidades J/(mol*K)  
--E/Rr=3000  
REAL Cai= 0.8 UNITS "mol/l" -- Concentracion inicial de A en mol/l  
REAL K=1.380 UNITS " s^-1"-- Constante de velocidad de reaccion, en nuestro  
caso es de orden 0.  
--REAL Ap=0.5 -- Apertura de la valvula  
REAL k=-1  
REAL Ti=10  
REAL Tt=2  
REAL Tref=11.5
```

DECLS  
 REAL U  
 REAL Ap=0.5 -- Apertura de la valvula  
 REAL mr UNITS "Kg" -- Masa del reactor, unidades Kg.  
 REAL mc UNITS "Kg"  
 REAL Wro UNITS "Kg/min" -- Flujo de Caudal que le entra a la camisa  
 REAL Wr UNITS "Kg/min" -- Flujo de caudal que le sale a la camisa  
 REAL Fr UNITS "l/min" -- Caudal que entra y sale de la camisa, ambos son iguales, unidades l/min  
 REAL T=15 UNITS "°C" -- Temperatura del reactor, unidades C°  
 REAL Tr=10 UNITS "°C" -- Temperatura de la camisa  
 REAL Wi UNITS "Kg/min" -- Flujo de caudal que entra al reactor de la calle, unidades Kg/min  
 REAL Fi UNITS "l/min" -- Caudal que entra al reactor de la calle, unidades l/min  
 REAL Wres UNITS "Kg/min" -- Flujo de caudal que entra desde la resistencia, unidades Kg/min  
 REAL Fres UNITS "l/min" -- Caudal que entra desde la resistencia, unidades l/min  
 REAL Tres UNITS "°C" -- Temperatura del caudal que entra desde la resistencia, unidades °C  
 REAL Vbp1 UNITS "l/min" -- Velocidad de giro de la bomba peristaltica 1  
 REAL Vbp2 UNITS "l/min" -- Velocidad de giro de la bomba peristaltica 2  
 REAL Hb UNITS "l/min" -- Altura que da la bomba dosificadora, esta la ponemos nosotros  
 REAL Qres UNITS "Kw" -- Calor producido por las resistencias  
 --REAL I -- Intensidad que enviamos a las resistencias  
 REAL Fo UNITS "l/min" -- Caudal de salida del reactor, unidades l/min.  
 REAL Wo UNITS "Kg/min" -- Flujo de caudal de salida del reactor, unidades Kg/min  
 REAL Tro UNITS "°C" -- Temperatura del flujo que sale de la camisa, unidades °C  
 REAL Q UNITS "Kw" -- Calor por conduccion o por conveccion  
 REAL Ca=0.05 UNITS "mol/l" -- Concentracion de a, hemos cogido que el producto a se tranforma en un producto b, unidades mol/l.  
 REAL P UNITS "Kw" -- Potencia que da la unidad de potencia, unidades en W.  
 REAL Vreac -- Velocidad de la reaccion  
 REAL Mat UNITS "Kj\*°C/min"  
 REAL Ment UNITS "Kj\*°C/min"  
 REAL Msal UNITS "Kj\*°C/min"  
 REAL e  
 REAL v  
 REAL u  
 REAL ew  
 REAL L  
 REAL Tk UNITS "K" --Temperaturas en grados Kelvin  
 DISCRETE  
 CONTINUOUS



--Ecuacion del coeficiente global de transferencia de calor ¿Preguntar si es necesaria usar?  
 $U=0.074+1.982*Fr*10$   
 $Tro=10$   
--Ap=0.5  
 $Vbp1=1$   
 $Vbp2=7$   
 $Hb=75$   
--"Fo y Fi tienen que ser iguales porque el volumen del reactor es constante"  
--Ecuaciones que relacionan el caudal con la altura de las bombas peristálticas  
 $Fi=Vbp1$   
 $Fo=Fi$   
 $Fres=Vbp2$   
-- Formula de calculo de caudal cuando tenemos una valvula  
 $Fr=((1/1.16)*((Pir-Ro*G*Hcam-Ro*G*Hic)/(Ro*(Kl1+(1/((Ap**2)*(Cv**2))))))**(1/2)))/3.6$   
 $mr=V*Ro$  -- Masa del reactor es volumen por densidad  
 $mc=Vc*Ro$   
 $Q=U*A*(T-Tr)$  -- Transferencia de calor por conduccion y conveccion, calor que perdemos en el encamisado  
--Ecuacion para el calculo de Tres  
 $Fres*Ro*Cer*T + Q = Fres*Ro*Cer*Tres$   
--  $E=mr*Cer*T$  --Energia  
 $Qres=P$  --  $I**2*R$ --Calor producido en la resistencia -->  $P=V*I$ , La v es constante, y la I es la que tenemos que ver que no pase la maxima permitida por la unidad de potencia.  
 $Wro=Fr*Ro$  -- Calculo del flujo máximo  
 $Wr=Wro$   
 $Wi=Fi*Ro$   
 $Wres=Fres*Ro$   
 $Wo=Fo*Ro$   
 $Mat=Wi*Cer*(Tin-T)$   
 $Ment=Wr*Cer*Tr$   
 $Msal=Wro*Cer*Tro$   
--Balance de materia a la camisa  
 $mc*Cer*Tr'=Msal-Ment+Q$   
--Balance de materia al reactor  
 $mr*Cer*T'=Mat-Q+Qres$   
 $Tk=T+273$   
--Ecuaciones que relacionan el calor de la resistencia con el de una reaccion quimica  
 $Vreac=V*K*exp(-E/(Rr*Tk))*Ca$   
 $P=Vreac*Inal$   
 $V*Ca'=Wi*Ca_i - Wi*Ca - Vreac$   
--  $V*K*exp(-E/(Rr*Tk))*Ca$  --> Esta es la velocidad de reaccion  
--Mi Controlador  
 $e=Tref-T$   
-- $u=k*e+v$

```
L=k*e+v
u= ZONE ( L < 1 AND L >0 ) L
ZONE ( L >= 1 ) 1
OTHERS 0
ew=u-v -- Termino para evitar el Antiwindup
v'=(k*e/Ti)+ew/Tt
Ap=u
END COMPONENT
```

## Anexo 3: Código del control de temperatura en la camisa

```
/*-----  
Lazo de control de temperatura para la camisa  
LIBRARY: DEFAULT_LIB  
FILE: Reactor  
CREATION DATE: 02/03/2016  
-----*/  
USE MATH  
USE CONTROL  
COMPONENT Reactor_Bueno_ControlPID_Temp_Cam  
DATA  
--REAL R -- El valor de la resistencia  
REAL A=0.3 UNITS "m^2" -- El area de intercambio de calor, unidades m^2  
REAL V=4.67 UNITS "l" -- Volumen del reactor, unidades en l  
REAL Vc=1 UNITS "l"  
REAL Cer=4.18 UNITS "Kj/Kg" -- Calor especifico, unidades en Kj/Kg  
REAL Tin=10 UNITS "°C" -- Temperatura del caudal que entral al reactor, es la  
ambiente, unidades °C  
REAL Pir=15 UNITS "Bar" -- Presion de entrada a la camisa en bar  
REAL Ro=1 UNITS "Kg/l" -- Densidad del agua, unidades Kg/l  
REAL G=9.8 UNITS "m/s^2" -- Gravedad, unidades m/s^2  
REAL KI1=0 -- Constante de perdidas en la tuberia, al no poder medirlo  
exactamente porque aun no esta montada la planta, al ser un tramo muy pequeño  
las ponemos despreciables  
REAL Cv=3.57 -- Constante de la valvula  
REAL Hic=0.08 UNITS "m" -- Es la diferencia entre la altura de entrada y la  
salida del agua en esa linea, unidades m.  
REAL Hcam=0.33 UNITS "m" -- Altura de la camisa del reactor, unidades m  
REAL Hsr= 0.10 UNITS "m" -- Diferencia entre la salida de agua del reactor a la  
bomba y el desa gue, unidades m.  
REAL Hreac= 0.12 UNITS "m" -- Altura de liquido que hay por encima de la  
salida a la bomba centrifuga, unidades m  
REAL E=2420 UNITS "Kj" -- Parametro propio de la reaccion, unidades KJ  
REAL Inal= 20 UNITS "Kj/mol" -- Valor constante, lo que reacciona cada  
segundo en la reaccion, unidades KJ/mol  
REAL Rr=8.31434 UNITS "J/mol*K" --Constante universal de los gases,  
unidades J/(mol*K)  
--E/Rr=3000  
REAL Cai= 0.8 UNITS "mol/l" -- Concentracion inicial de A en mol/l  
REAL K=1.380 UNITS " s^-1"-- Constante de velocidad de reaccion, en nuestro  
caso es de orden 0.  
--REAL Ap=0.5 -- Apertura de la valvula  
REAL k=-1  
REAL Ti=10  
REAL Tt=2  
REAL Tref=11.5
```

DECLS  
 REAL U  
 REAL Ap=0.5 -- Apertura de la valvula  
 REAL mr UNITS "Kg" -- Masa del reactor, unidades Kg.  
 REAL mc UNITS "Kg"  
 REAL Wro UNITS "Kg/min" -- Flujo de Caudal que le entra a la camisa  
 REAL Wr UNITS "Kg/min" -- Flujo de caudal que le sale a la camisa  
 REAL Fr UNITS "l/min" -- Caudal que entra y sale de la camisa, ambos son iguales, unidades l/min  
 REAL T=15 UNITS "°C" -- Temperatura del reactor, unidades C°  
 REAL Tr=10 UNITS "°C" -- Temperatura de la camisa  
 REAL Wi UNITS "Kg/min" -- Flujo de caudal que entra al reactor de la calle, unidades Kg/min  
 REAL Fi UNITS "l/min" -- Caudal que entra al reactor de la calle, unidades l/min  
 REAL Wres UNITS "Kg/min" -- Flujo de caudal que entra desde la resistencia, unidades Kg/min  
 REAL Fres UNITS "l/min" -- Caudal que entra desde la resistencia, unidades l/min  
 REAL Tres UNITS "°C" -- Temperatura del caudal que entra desde la resistencia, unidades °C  
 REAL Vbp1 UNITS "l/min" -- Velocidad de giro de la bomba peristaltica 1  
 REAL Vbp2 UNITS "l/min" -- Velocidad de giro de la bomba peristaltica 2  
 REAL Hb UNITS "l/min" -- Altura que da la bomba dosificadora, esta la ponemos nosotros  
 REAL Qres UNITS "Kw" -- Calor producido por las resistencias  
 --REAL I -- Intensidad que enviamos a las resistencias  
 REAL Fo UNITS "l/min" -- Caudal de salida del reactor, unidades l/min.  
 REAL Wo UNITS "Kg/min" -- Flujo de caudal de salida del reactor, unidades Kg/min  
 REAL Tro UNITS "°C" -- Temperatura del flujo que sale de la camisa, unidades °C  
 REAL Q UNITS "Kw" -- Calor por conduccion o por conveccion  
 REAL Ca=0.05 UNITS "mol/l" -- Concentracion de a, hemos cogido que el producto a se tranforma en un producto b, unidades mol/l.  
 REAL P UNITS "Kw" -- Potencia que da la unidad de potencia, unidades en W.  
 REAL Vreac -- Velocidad de la reaccion  
 REAL Mat UNITS "Kj\*°C/min"  
 REAL Ment UNITS "Kj\*°C/min"  
 REAL Msal UNITS "Kj\*°C/min"  
 REAL e  
 REAL v  
 REAL u  
 REAL ew  
 REAL L  
 REAL Tk UNITS "K" --Temperaturas en grados Kelvin  
 DISCRETE  
 CONTINUOUS

--Ecuacion del coeficiente global de transferencia de calor ¿Preguntar si es necesaria usar?  
 $U=0.074+1.982*Fr*10$   
 $Tro=10$   
--Ap=0.5  
 $Vbp1=1$   
 $Vbp2=7$   
 $Hb=75$   
--"Fo y Fi tienen que ser iguales porque el volumen del reactor es constante" --> Importante.  
--Ecuaciones que relacionan el caudal con la altura de las bombas peristalticas  
 $Fi=Vbp1$   
 $Fo=Fi$   
 $Fres=Vbp2$   
-- Formula de calculo de caudal cuando tenemos una valvula  
 $Fr=((1/1.16)*((Pir-Ro*G*Hcam-Ro*G*Hic)/(Ro*(Kl1+(1/((Ap**2)*(Cv**2))))))**(1/2)))/3.6$   
 $mr=V*Ro$  -- Masa del reactor es volumen por densidad  
 $mc=Vc*Ro$   
 $Q=U*A*(T-Tr)$  -- Transferencia de calor por conduccion y conveccion, calor que perdemos en el encamisado  
--Esta Q es pequeña mirarlo.  
--Ecuacion para el calculo de Tres  
 $Fres*Ro*Cer*T + Q = Fres*Ro*Cer*Tres$   
--  $E=mr*Cer*T$  --Energia  
 $Qres=P$  -- $I**2*R$ --Calor producido en la resistencia -->  $P=V*I$ , La v es constante, y la I es la que tenemos que ver que no pase la maxima permitida por la unidad de potencia.  
 $Wro=Fr*Ro$  -- Calculo del flujo máximo  
 $Wr=Wro$   
 $Wi=Fi*Ro$   
 $Wres=Fres*Ro$   
 $Wo=Fo*Ro$   
 $Mat=Wi*Cer*(Tin-T)$   
 $Ment=Wr*Cer*Tr$   
 $Msal=Wro*Cer*Tro$   
--Balance de materia a la camisa  
 $mc*Cer*Tr'=Msal-Ment+Q$   
--Balance de materia al reactor  
 $mr*Cer*T'=Mat-Q+Qres$   
 $Tk=T+273$   
--Ecuaciones que relacionan el calor de la resistencia con el de una reaccion quimica  
 $Vreac=V*K*exp(-E/(Rr*Tk))*Ca$   
 $P=Vreac*Inal$   
 $V*Ca'=Wi*Ca- Wi*Ca-Vreac$   
-- $V*K*exp(-E/(Rr*Tk))*Ca$  --> Esta es la velocidad de reaccion  
--Mi Controlador

```
e=Tref-Tr
--u=k*e+v
L=k*e+v
u= ZONE ( L < 1 AND L >0 ) L
ZONE ( L >= 1 ) 1
OTHERS 0
ew=u-v -- Termino para evitar el Antiwindup
v'=(k*e/Ti)+ew/Tt
Ap=u
END COMPONENT
```

## Anexo 4: Código del control de caudal

```
/*-----  
Lazo de control para el caudal de refrigerante  
LIBRARY: DEFAULT_LIB  
FILE: Reactor  
CREATION DATE: 02/03/2016  
-----*/  
USE MATH  
USE CONTROL  
COMPONENT Reactor_Bueno_ControlPID_Caudal  
DATA  
--REAL R -- El valor de la resistencia  
REAL A=0.3 UNITS "m^2" -- El area de intercambio de calor, unidades m^2  
REAL V=4.67 UNITS "l" -- Volumen del reactor, unidades en l  
REAL Vc=1 UNITS "l"  
REAL Cer=4.18 UNITS "Kj/Kg" -- Calor especifico, unidades en Kj/Kg  
REAL Tin=10 UNITS "°C" -- Temperatura del caudal que entral al reactor, es la  
ambiente, unidades °C  
REAL Pir=15 UNITS "Bar" -- Presion de entrada a la camisa en bar  
REAL Ro=1 UNITS "Kg/l" -- Densidad del agua, unidades Kg/l  
REAL G=9.8 UNITS "m/s^2" -- Gravedad, unidades m/s^2  
REAL K11=0 -- Constante de perdidas en la tuberia, al no poder medirlo  
exactamente porque aun no esta montada la planta, al ser un tramo muy pequeño  
las ponemos despreciables  
REAL Cv=3.57 -- Constante de la valvula  
REAL Hic=0.08 UNITS "m" -- Es la diferencia entre la altura de entrada y la  
salida del agua en esa linea, unidades m.  
REAL Hcam=0.33 UNITS "m" -- Altura de la camisa del reactor, unidades m  
REAL Hsr= 0.10 UNITS "m" -- Diferencia entre la salida de agua del reactor a la  
bomba y el desa gue, unidades m.  
REAL Hreac= 0.12 UNITS "m" -- Altura de liquido que hay por encima de la  
salida a la bomba centrifuga, unidades m  
--Para la reaccion quimica hemos cogido la formacion de agua, H2+O2 -> H2O  
REAL E=2420 UNITS "Kj" -- Parametro propio de la reaccion, unidades KJ  
REAL Inal= 20 UNITS "Kj/mol" -- Valor constante, lo que reacciona cada  
segundo en la reaccion, unidades KJ/mol  
REAL Rr=8.31434 UNITS "J/mol*K" --Constante universal de los gases,  
unidades J/(mol*K)  
--E/Rr=3000  
REAL Cai= 0.8 UNITS "mol/l" -- Concentracion inicial de A en mol/l  
REAL K=1.380 UNITS " s^-1"-- Constante de velocidad de reaccion, en nuestro  
caso es de orden 0.  
--REAL Ap=0.5 -- Apertura de la valvula  
REAL k=1  
REAL Ti=10  
REAL Tt=2
```

REAL Fref=8.8  
 DECLS  
 REAL U  
 --REAL Ap=0.5 -- Apertura de la valvula  
 REAL mr UNITS "Kg" -- Masa del reactor, unidades Kg.  
 REAL mc UNITS "Kg" -- Masa de la camisa.  
 REAL Wro UNITS "Kg/min" -- Flujo de Caudal que le entra a la camisa  
 REAL Wr UNITS "Kg/min" -- Flujo de caudal que le sale a la camisa  
 REAL Fr UNITS "l/min" -- Caudal que entra y sale de la camisa, ambos son iguales, unidades l/min  
 REAL T=15 UNITS "°C" -- Temperatura del reactor, unidades C°  
 REAL Tr=10 UNITS "°C" -- Temperatura de la camisa  
 REAL Wi UNITS "Kg/min" -- Flujo de caudal que entra al reactor de la calle, unidades Kg/min  
 REAL Fi UNITS "l/min" -- Caudal que entra al reactor de la calle, unidades l/min  
 REAL Wres UNITS "Kg/min" -- Flujo de caudal que entra desde la resistencia, unidades Kg/min  
 REAL Fres UNITS "l/min" -- Caudal que entra desde la resistencia, unidades l/min  
 REAL Tres UNITS "°C" -- Temperatura del caudal que entra desde la resistencia, unidades °C  
 REAL Vbp1 UNITS "l/min" -- Velocidad de giro de la bomba peristaltica 1  
 REAL Vbp2 UNITS "l/min" -- Velocidad de giro de la bomba peristaltica 2  
 REAL Hb UNITS "l/min" -- Altura que da la bomba dosificadora, esta la ponemos nosotros  
 REAL Qres UNITS "Kw" -- Calor producido por las resistencias  
 --REAL I -- Intensidad que enviamos a las resistencias  
 REAL Fo UNITS "l/min" -- Caudal de salida del reactor, unidades l/min.  
 REAL Wo UNITS "Kg/min" -- Flujo de caudal de salida del reactor, unidades Kg/min  
 REAL Tro UNITS "°C" -- Temperatura del flujo que sale de la camisa, unidades °C  
 REAL Q UNITS "Kw" -- Calor por conduccion o por conveccion  
 REAL Ca=0.05 UNITS "mol/l" -- Concentracion de a, hemos cogido que el producto a se tranforma en un producto b, unidades mol/l.  
 REAL P UNITS "Kw" -- Potencia que da la unidad de potencia, unidades en W.  
 REAL Vreac -- Velocidad de la reaccion  
 REAL Mat UNITS "Kj\*°C/min"  
 REAL Ment UNITS "Kj\*°C/min"  
 REAL Msal UNITS "Kj\*°C/min"  
 REAL e  
 REAL v  
 REAL u  
 REAL ew  
 REAL L  
 REAL Tk UNITS "K" --Temperaturas en grados Kelvin  
 DISCRETE  
 CONTINUOUS



--Ecuacion del coeficiente global de transferencia de calor ¿Preguntar si es necesaria usar?  
 $U=0.074+1.982*Fr*10$   
 $Tro=10$   
--Ap=0.5  
 $Vbp1=1$   
 $Vbp2=7$   
 $Hb=75$   
--"Fo y Fi tienen que ser iguales porque el volumen del reactor es constante" --> Importante.  
--Ecuaciones que relacionan el caudal con la altura de las bombas peristalticas  
 $Fi=Vbp1$   
 $Fo=Fi$   
 $Fres=Vbp2$   
-- Formula de calculo de caudal cuando tenemos una valvula  
-- $Fr=((1/1.16)*((Pir-Ro*G*Hcam-Ro*G*Hic)/(Ro*(K11+(1/((Ap**2)*(Cv**2))))))**((1/2)))/3.6$   
 $mr=V*Ro$  -- Masa del reactor es volumen por densidad  
 $mc=Vc*Ro$   
 $Q=U*A*(T-Tr)$  -- Transferencia de calor por conduccion y conveccion, calor que perdemos en el encamisado  
--Ecuacion para el calculo de Tres  
 $Fres*Ro*Ce*r*T + Q = Fres*Ro*Ce*r*Tres$   
--  $E=mr*Ce*r*T$  --Energia  
 $Qres=P$  -- $I**2*R$ --Calor producido en la resistencia -->  $P=V*I$ , La v es constante, y la I es la que tenemos que ver que no pase la maxima permitida por la unidad de potencia.  
 $Wro=Fr*Ro$  -- Calculo del flujo máximo  
 $Wr=Wro$   
 $Wi=Fi*Ro$   
 $Wres=Fres*Ro$   
 $Wo=Fo*Ro$   
 $Mat=Wi*Ce*r*(Tin-T)$   
 $Ment=Wr*Ce*r*Tr$   
 $Msal=Wro*Ce*r*Tro$   
--Balance de materia a la camisa  
 $mc*Ce*r*Tr'=Msal-Ment+Q$   
--Balance de materia al reactor  
 $mr*Ce*r*T'=Mat-Q+Qres$   
 $Tk=T+273$   
--Ecuaciones que relacionan el calor de la resistencia con el de una reaccion quimica  
 $Vreac=V*K*exp(-E/(Rr*Tk))*Ca$   
 $P=Vreac*Inal$   
 $V*Ca'=Wi*Ca_i - Wi*Ca - Vreac$   
-- $V*K*exp(-E/(Rr*Tk))*Ca$  --> Esta es la velocidad de reaccion  
--La Ca es muy pequeña por eso no cambia la T, mirar.  
--Mi Controlador

```
e=Fref-Fr
--u=k*e+v
L=k*e+v
u= ZONE ( L < 9.4 AND L >0 ) L
ZONE ( L >= 9.4) 9.4
OTHERS 0
ew=u-v -- Termino para evitar el Antiwindup
v'=(k*e/Ti)+ew/Tt
Fr=u
END COMPONENT
```

## Anexo 5: Código del control en cascada tipo 1

```
/*-----  
Estructura de control en cascada tipo 1  
LIBRARY: DEFAULT_LIB  
FILE: Reactor  
CREATION DATE: 02/03/2016  
-----*/  
USE MATH  
USE CONTROL  
COMPONENT Reactor_Bueno_Control_Cascada  
DATA --Poner las unidades como las tengo apuntadas en el folio.  
--REAL R -- El valor de la resistencia  
-- Valor del coeficiente de intercambio de calor, unidades en  $\text{Kj/m}^2\text{°C KW}$  ceo  
que es.  
REAL A=0.3 UNITS "m^2" -- El area de intercambio de calor, unidades  $\text{m}^2$   
REAL V=4.67 UNITS "l" -- Volumen del reactor, unidades en l  
REAL Cer=4.18 UNITS "Kj/Kg*K" -- Calor especifico, unidades en  $\text{Kj/Kg}$   
REAL Tin=10 UNITS "°C" -- Temperatura del caudal que entra al reactor, es la  
ambiente, unidades  $^{\circ}\text{C}$   
REAL Pir=15 UNITS "Bar" -- Presion de entrada a la camisa en bar  
REAL Ro=1 UNITS "Kg/l" -- Densidad del agua, unidades  $\text{Kg/l}$   
REAL G=9.8 UNITS "m/s^2" -- Gravedad, unidades  $\text{m/s}^2$   
REAL KI1=0 -- Constante de perdidas en la tuberia, al no poder medirlo  
exactamente porque aun no esta montada la planta, al ser un tramo muy pequeño  
las ponemos despreciables  
REAL Cv=3.57 -- Constante de la valvula  
REAL Hic=0.08 UNITS "m" -- Es la diferencia entre la altura de entrada y la  
salida del agua en esa linea, unidades m.  
REAL Hcam=0.33 UNITS "m" -- Altura de la camisa del reactor, unidades m  
REAL Hsr= 0.10 UNITS "m" -- Diferencia entre la salida de agua del reactor a la  
bomba y el desagua, unidades m.  
REAL Hreac= 0.12 UNITS "m" -- Altura de liquido que hay por encima de la  
salida a la bomba centrifuga, unidades m  
--Para la reaccion quimica hemos cogido la formacion de agua,  $\text{H}_2+\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$   
REAL E=4840 UNITS "J/mol" -- Parametro propio de la reaccion, unidades  $\text{KJ}$   
REAL Inal=20 UNITS "Kj/mol" -- Valor constante, lo que reacciona cada  
segundo en la reaccion, unidades  $\text{KJ/mol}$   
REAL Rr=8.31434 UNITS "J/mol*K" --Constante universal de los gases,  
unidades  $\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$   
-- $E/Rr=3000$   
REAL Cai= 0.8 UNITS "mol/l" -- Concentracion inicial de A en  $\text{mol/l}$ , la  
ponemos al 80%  
REAL K=1.380 UNITS "s^-1"-- unidades  $\text{s}^{-1}$   
--REAL Ap=0.5 -- Apertura de la valvula  
REAL k=1  
REAL Ti=10
```

REAL k2=-2  
 REAL Ti2=0.5  
 REAL Tt=2  
 REAL Tref=11.8  
 REAL Vbp1=1  
 REAL Vbp2=3  
 REAL Vc=1  
 DECLS  
 --REAL Ap -- Apertura de la valvula  
 REAL U  
 REAL mc UNITS "Kg"  
 REAL mr UNITS "Kg" -- Masa del reactor, unidades Kg.  
 REAL Wro UNITS "Kg/min" -- Flujo de Caudal que le entra a la camisa  
 REAL Wr UNITS "Kg/min" -- Flujo de caudal que le sale a la camisa  
 REAL Fr UNITS "l/min" -- Caudal que entra y sale de la camisa, ambos son iguales, unidades l/min  
 REAL T=15 UNITS "°C" -- Temperatura del reactor, unidades C°  
 REAL Tr=10 UNITS "°C" -- Temperatura de la camisa  
 REAL Wi UNITS "Kg/min" -- Flujo de caudal que entra al reactor de la calle, unidades Kg/min  
 REAL Fi UNITS "l/min" -- Caudal que entra al reactor de la calle, unidades l/min  
 REAL Wres UNITS "Kg/min" -- Flujo de caudal que entra desde la resistencia, unidades Kg/min  
 REAL Fres UNITS "l/min" -- Caudal que entra desde la resistencia, unidades l/min  
 REAL Tres UNITS "°C" -- Temperatura del caudal que entra desde la resistencia, unidades °C  
 REAL Hb UNITS "l/min" -- Altura que da la bomba dosificadora, esta la ponemos nosotros  
 REAL Qres UNITS "Kw" -- Calor producido por las resistencias  
 --REAL I -- Intensidad que enviamos a las resistencias  
 REAL Fo UNITS "l/min" -- Caudal de salida del reactor, unidades l/min.  
 REAL Wo UNITS "Kg/min" -- Flujo de caudal de salida del reactor, unidades Kg/min  
 REAL Tro UNITS "°C" -- Temperatura del flujo que entra a la camisa, unidades °C  
 REAL Q UNITS "Kw" -- Calor por conduccion o por conveccion  
 REAL Ca=0.05 UNITS "mol/l" -- Concentracion de a, hemos cogido que el producto a se tranforma en un producto b, unidades mol/l.  
 REAL P UNITS "Kw" -- Potencia que da la unidad de potencia, unidades en W.  
 REAL Vreac -- Velocidad de la reaccion  
 REAL Mat UNITS "Kj\*°C/min"  
 REAL Ment UNITS "Kj\*°C/min"  
 REAL Msal UNITS "Kj\*°C/min"  
 REAL Tk UNITS "K" --Temperatura del reactor en grados kelvin  
 --Primer controlador  
 REAL e  
 REAL v

REAL u  
 REAL ew  
 REAL L1  
 --Segundo Controlador  
 REAL e2  
 REAL v2  
 REAL u2  
 REAL ew2  
 REAL L2  
 --Tercer Controlador  
 --REAL e3  
 --REAL v3  
 --REAL u3  
 --REAL ew3  
 --REAL L3  
 DISCRETE  
 CONTINUOUS  
 --Ecuacion del coeficiente global de transferencia de calor  

$$U=0.074+1.982*Fr*10$$

$$Tro=10$$

$$Hb=75$$
 --"Fo y Fi tienen que ser iguales porque el volumen del reactor es constante"  

$$Fo=Fi$$
 -- Sacar de la tabla al 75 % sabes que es fijo  
 --Ecuaciones que relacionan el caudal con la altura de las bombas peristalticas  

$$Fi=Vbp1$$

$$Fres=Vbp2$$
 -- Formula de calculo de caudal cuando tenemos una valvula  

$$Fr=\frac{(1/1.16)*((Pir-Ro*G*Hcam-Ro*G*Hic)/(Ro*(Kl1+(1/((Ap**2)*(Cv**2))))))^{1/2}}{3.6}$$

$$mr=V*Ro$$
 -- Masa del reactor es volumen por densidad  

$$mc=Vc*Ro$$

$$Q=U*A*(T-Tr)$$
 -- Transferencia de calor por conduccion y conveccion, calor que perdemos en el encamisado  
 --Ecuacion para el calculo de Tres  

$$Fres*Ro*Cer*T + Q = Fres*Ro*Cer*Tres$$
 -- E=mr\*Cer\*T --Energia  

$$Qres=P - I^2*R$$
 --Calor producido en la resistencia -->  $P=V*I$ , La v es constante, y la I es la que tenemos que ver que no pase la maxima permitida por la unidad de potencia.  

$$Wro=Fr*Ro$$
 -- Calculo del flujo máximo  

$$Wr=Wro$$

$$Wi=Fi*Ro$$

$$Wres=Fres*Ro$$

$$Wo=Fo*Ro$$

$$Mat=Wi*Cer*(Tin-T)$$

$$Ment=Wr*Cer*Tr$$

$$Msal=Wro*Cer*Tro$$
 --Balance de materia a la camisa

$mc \cdot C_{er} \cdot T_r' = M_{sal} - M_{ent} + Q$   
 --Balance de materia al reactor  
 $m_r \cdot C_{er} \cdot T' = M_{at} - Q + Q_{res}$   
 $T_k = T + 273$   
 --Ecuaciones que relacionan el calor de la resistencia con el de una reaccion  
 quimica  
 $V_{reac} = V \cdot K \cdot \exp(-E/(R_r \cdot T_k)) \cdot C_a$   
 $P = V_{reac} \cdot \Delta H_{al}$   
 $V \cdot C_a' = W_i \cdot C_{ai} - W_i \cdot C_a - V_{reac}$   
 --  $V \cdot K \cdot \exp(-E/(R_r \cdot T)) \cdot C_a$  --> Esta es la velocidad de reaccion  
 --Mi Controlador  
 --Control Temperatura Camisa  
 $e = T_{ref} - T$   
 $L1 = k \cdot e + v$   
 -- Tiene que dar un valor entre 10 y 45, porque es la consigna para la temeperatura  
 de la camisa  
 --Este controlador tiene ganancia positiva si queremos aumentar la temperatura la  
 salida tiene que ser mayor  
 $u = \text{ZONE} ( L1 < 45 \text{ AND } L1 > 10 ) L1$   
 $\text{ZONE} ( L1 \geq 45 ) 45$   
 $\text{OTHERS } 10$   
 --  $u = k \cdot e + v$   
 $v' = (k \cdot e / T_i) + e_w / T_t$   
 $e_w = u - L1$  -- Termino para evitar el Antiwindup  
 --Control Temperatura reactor  
 --Este controlador tiene ganancia negativa, si queremos incrementar la  
 temperatura tenemos que disminuir el caudal de referencia al segundo controlador  
 $e2 = u - T_r$  --  $T_r$  es la temperatura de salida del flujo de la camisa que suponemos que  
 sera igual al que hay en la camisa  
 $L2 = k2 \cdot e2 + v2$   
 -- No puede dar un valor mayor que 10 y menor que 0, porque es la consigna para  
 el caudal  
 $u2 = \text{ZONE} ( L2 < 9 \text{ AND } L2 > 0 ) L2$   
 $\text{ZONE} ( L2 \geq 9 ) 9$   
 $\text{OTHERS } 0$   
 --  $u2 = k2 \cdot e2 + v2$   
 $v2' = (k2 \cdot e2 / T_i2) + e_w2 / T_t$   
 $e_w2 = u2 - L2$   
 --Control de caudal valvula de entrada agua a la camisa  
 --Este controlador tiene ganancia positiva si queremos aumentar el caudal la salida  
 tiene que ser mas grande  
 $Fr = u2$   
 --  $e3 = u2 - Fr$   
 --  $L3 = k3 \cdot e3 + v3$   
 -- Tiene que dar un valor entre 0 y 1 puesto que su salida es la variable  
 manipulada  
 --  $u3 = \text{ZONE} ( L3 < 1 \text{ AND } L3 > 0 ) L3$   
 --  $\text{ZONE} ( L3 \geq 1 ) 1$

```
--OTHERS 0
--v3'=(k3*e3/Ti3)+ew3/Tt
--ew3=u3A-L3 -- Termino para evitar el Antiwindup
--Ap=u3
END COMPONENT
```





## Anexo 6: Código del control en cascada tipo 2

```
/*-----  
Estrategia de control en cascada tipo 2  
LIBRARY: DEFAULT_LIB  
FILE: Reactor  
CREATION DATE: 02/03/2016  
-----*/  
USE MATH  
USE CONTROL  
COMPONENT Reactor_Bueno_Control_Cascada_Segundo  
DATA --Poner las unidades como las tengo apuntadas en el folio.  
--REAL R -- El valor de la resistencia  
REAL A=0.3 UNITS "m^2" -- El area de intercambio de calor, unidades m^2  
REAL V=4.67 UNITS "l" -- Volumen del reactor, unidades en l  
REAL Cer=4.18 UNITS "Kj/Kg*K" -- Calor especifico, unidades en Kj/Kg  
REAL Tin=10 UNITS "°C" -- Temperatura del caudal que entra al reactor, es la  
ambiente, unidades °C  
REAL Pir=15 UNITS "Bar" -- Presion de entrada a la camisa en bar  
REAL Ro=1 UNITS "Kg/l" -- Densidad del agua, unidades Kg/l  
REAL G=9.8 UNITS "m/s^2" -- Gravedad, unidades m/s^2  
REAL KI1=0 -- Constante de perdidas en la tuberia, al no poder medirlo  
exactamente porque aun no esta montada la planta, al ser un tramo muy pequeño  
las ponemos despreciables  
--REAL KI2=221.22 "Las perdidas de esta tuberia nos dan igual, porque el caudal  
es fijo" -- Constante de perdidas en la tuberia, de la salida del reactor al desagüe,  
donde esta la bomba centrifuga.  
REAL Cv=3.57 -- Constante de la valvula  
REAL Hic=0.08 UNITS "m" -- Es la diferencia entre la altura de entrada y la  
salida del agua en esa linea, unidades m.  
REAL Hcam=0.33 UNITS "m" -- Altura de la camisa del reactor, unidades m  
REAL Hsr= 0.10 UNITS "m" -- Diferencia entre la salida de agua del reactor a la  
bomba y el desagüe, unidades m.  
REAL Hreac= 0.12 UNITS "m" -- Altura de liquido que hay por encima de la  
salida a la bomba centrifuga, unidades m  
--Para la reaccion quimica hemos cogido la formacion de agua, H2+O2 -> H2O  
REAL E=2420 UNITS "J/mol" -- Parametro propio de la reaccion, unidades KJ  
REAL Inal=20 UNITS "Kj/mol" -- Valor constante, lo que reacciona cada  
segundo en la reaccion, unidades KJ/mol  
REAL Rr=8.31434 UNITS "J/mol*K" --Constante universal de los gases,  
unidades J/(mol*K)  
--E/Rr=3000  
REAL Cai= 0.8 UNITS "mol/l" -- Concentracion inicial de A en mol/l, la  
ponemos al 80%  
REAL K=1.380 UNITS "s^-1"-- unidades s^-1  
--REAL Ap=0.5 -- Apertura de la valvula  
REAL k=1
```

REAL Ti=5  
 REAL k2=-2  
 REAL Ti2=10  
 REAL Tt=2  
 REAL Tref=11.8  
 REAL Vbp1=1  
 REAL Vbp2=3  
 REAL Vc=1  
 DECLS  
 REAL Ap -- Apertura de la valvula  
 REAL U UNITS "KW/m^2\*°C" -- Valor del coeficiente de intercambio de calor,  
 unidades en KW/m^2°C  
 REAL mc UNITS "Kg"  
 REAL mr UNITS "Kg" -- Masa del reactor, unidades Kg.  
 REAL Wro UNITS "Kg/min" -- Flujo de Caudal que le entra a la camisa  
 REAL Wr UNITS "Kg/min" -- Flujo de caudal que le sale a la camisa  
 REAL Fr UNITS "l/min" -- Caudal que entra y sale de la camisa, ambos son  
 iguales, unidades l/min  
 REAL T=15 UNITS "°C" -- Temperatura del reactor, unidades C°  
 REAL Tr=10 UNITS "°C" -- Temperatura de la camisa  
 REAL Wi UNITS "Kg/min" -- Flujo de caudal que entra al reactor de la calle,  
 unidades Kg/min  
 REAL Fi UNITS "l/min" -- Caudal que entra al reactor de la calle, unidades l/min  
 REAL Wres UNITS "Kg/min" -- Flujo de caudal que entra desde la resistencia,  
 unidades Kg/min  
 REAL Fres UNITS "l/min" -- Caudal que entra desde la resistencia, unidades  
 l/min  
 REAL Tres UNITS "°C" -- Temperatura del caudal que entra desde la resistencia,  
 unidades °C  
 REAL Hb UNITS "l/min" -- Altura que da la bomba dosificadora, esta la  
 ponemos nosotros  
 REAL Qres UNITS "Kw" -- Calor producido por las resistencias  
 --REAL I -- Intensidad que enviamos a las resistencias  
 REAL Fo UNITS "l/min" -- Caudal de salida del reactor, unidades l/min.  
 REAL Wo UNITS "Kg/min" -- Flujo de caudal de salida del reactor, unidades  
 Kg/min  
 REAL Tro UNITS "°C" -- Temperatura del flujo que entra a la camisa, unidades  
 °C  
 REAL Q UNITS "Kw" -- Calor por conduccion o por conveccion  
 REAL Ca=0.05 UNITS "mol/l" -- Concentracion de a, hemos cogido que el  
 producto a se tranforma en un producto b, unidades mol/l.  
 REAL P UNITS "Kw" -- Potencia que da la unidad de potencia, unidades en W.  
 REAL Vreac -- Velocidad de la reaccion  
 REAL Mat UNITS "Kj\*°C/min"  
 REAL Ment UNITS "Kj\*°C/min"  
 REAL Msal UNITS "Kj\*°C/min"  
 REAL Tk UNITS "K" --Temperatura del reactor en grados kelvin  
 --Primer controlador

```

REAL e
REAL v
REAL u
REAL ew
REAL L1
--Segundo controlador
REAL e2
REAL u2
REAL v2
REAL L2
REAL ew2
DISCRETE
CONTINUOUS
--Ecuacion del coeficiente global de transferencia de calor
U=0.074+1.982*Fr*10
Tro=10
--Ap=0.5
--Vbp1=1
--Vbp2=3
Hb=75
--"Fo y Fi tienen que ser iguales porque el volumen del reactor es constante"
Fo=Fi
--Ecuaciones que relacionan el caudal con la altura de las bombas peristalticas
Fi=Vbp1
Fres=Vbp2
-- Formula de calculo de caudal cuando tenemos una valvula
Fr=((1/1.16)*((Pir-Ro*G*Hcam-
Ro*G*Hic)/(Ro*(Kl1+(1/((Ap**2)*(Cv**2))))))**((1/2)))/3.6
mr=V*Ro -- Masa del reactor es volumen por densidad
mc=Vc*Ro
Q=U*A*(T-Tr) -- Transferencia de calor por conduccion y conveccion, calor que
perdemos en el encamisado
--Ecuacion para el calculo de Tres
Fres*Ro*Cer*T + Q = Fres*Ro*Cer*Tres
-- E=mr*Cer*T --Energia
Qres=P --I**2*R--Calor producido en la resistencia --> P=V*I, La v es constante,
y la I es la que tenemos que ver que no pase la maxima permitida por la unidad de
potencia.
Wro=Fr*Ro -- Calculo del flujo máximo
Wr=Wro
Wi=Fi*Ro
Wres=Fres*Ro
Wo=Fo*Ro
Mat=Wi*Cer*(Tin-T)
Ment=Wr*Cer*Tr
Msal=Wro*Cer*Tro
--Balance de materia a la camisa
mc*Cer*Tr'=Msal-Ment+Q

```

```

--Balance de materia al reactor
mr*Cer*T'=Mat-Q+Qres
Tk=T+273
--Ecuaciones que relacionan el calor de la resistencia con el de una reaccion
quimica
Vreac=V*K*exp(-E/(Rr*Tk))*Ca
P=Vreac*Inal
V*Ca'=Wi*Cai- Wi*Ca-Vreac
--V*K*exp(-E/(Rr*T))*Ca --> Esta es la velocidad de reaccion
--Mi Controlador
--Control Temperatura Camisa
e=Tref-T
L1=k*e+v
-- Tiene que dar un valor entre 10 y 45, porque es la consigna para la temeperatura
de la camisa
--Este controlador tiene ganancia positiva si queremos aumentar la temperatura la
salida tiene que ser mayor
u= ZONE ( L1 < 45 AND L1 > 10 ) L1
ZONE ( L1 >= 45 ) 45
OTHERS 10
--u=k*e+v
v'=(k*e/Ti)+ew/Tt
ew=u-L1 -- Termino para evitar el Antiwindup
--Control Temperatura reactor
--Este controlador tiene ganancia negativa, si queremos incrementar la
temperatura tenemos que disminuir el caudal de referencia al segundo controlador
e2=u-Tr --Tr es la temperatura de salida del flujo de la camisa que suponemos que
sera igual al que hay en la camisa
L2=k2*e2+v2
-- No puede dar un valor mayor que 10 y menor que 0, porque es la consigna para
el caudal
u2= ZONE ( L2 < 1 AND L2 >0 ) L2
ZONE ( L2 >= 1 ) 1
OTHERS 0
--u2=k2*e2+v2
v2'=(k2*e2/Ti2)+ew2/Tt
ew2=u2-L2
--Control de caudal valvula de entrada agua a la camisa
--Este controlador tiene ganancia positiva si queremos aumentar el caudal la salida
tiene que ser mas grande
Ap=u2
END COMPONENT

```

## Anexo 7: Código del control en cascada tipo 3

```
/*-----  
Estructura de control de ccascada tipo 3  
LIBRARY: DEFAULT_LIB  
FILE: Reactor  
CREATION DATE: 02/03/2016  
-----*/  
USE MATH  
USE CONTROL  
COMPONENT Reactor_Bueno_Control_Cascada_Tercero  
DATA --Poner las unidades como las tengo apuntadas en el folio.  
--REAL R -- El valor de la resistencia  
REAL A=0.3 UNITS "m^2" -- El area de intercambio de calor, unidades m^2  
REAL V=4.67 UNITS "l" -- Volumen del reactor, unidades en l  
REAL Cer=4.18 UNITS "Kj/Kg*K" -- Calor especifico, unidades en Kj/Kg  
REAL Tin=10 UNITS "°C" -- Temperatura del caudal que entral al reactor, es la  
ambiente, unidades °C  
REAL Pir=15 UNITS "Bar" -- Presion de entrada a la camisa en bar  
REAL Ro=1 UNITS "Kg/l" -- Densidad del agua, unidades Kg/l  
REAL G=9.8 UNITS "m/s^2" -- Gravedad, unidades m/s^2  
REAL KI1=0 -- Constante de perdidas en la tuberia, al no poder medirlo  
exactamente porque aun no esta montada la planta, al ser un tramo muy pequeño  
las ponemos despreciables  
--REAL KI2=221.22 "Las perdidas de esta tuberia nos dan igual, porque el caudal  
es fijo" -- Constante de perdidas en la tuberia, de la salida del reactor al desague,  
donde esta la nomba centrifuga.  
REAL Cv=3.57 -- Constante de la valvula  
REAL Hic=0.08 UNITS "m" -- Es la diferencia entre la altura de entrada y la  
salida del agua en esa linea, unidades m.  
REAL Hcam=0.33 UNITS "m" -- Altura de la camisa del reactor, unidades m  
REAL Hsr= 0.10 UNITS "m" -- Diferencia entre la salida de agua del reactor a la  
bomba y el desa gue, unidades m.  
REAL Hreac= 0.12 UNITS "m" -- Altura de liquido que hay por encima de la  
salida a la bomba centrifuga, unidades m  
--Para la reaccion quimica hemos cogido la formacion de agua, H2+O2 -> H2O  
REAL E=2420 UNITS "J/mol" -- Parametro propio de la reaccion, unidades KJ  
REAL Inal=20 UNITS "Kj/mol" -- Valor constante, lo que reacciona cada  
segundo en la reaccion, unidades KJ/mol  
REAL Rr=8.31434 UNITS "J/mol*K" --Constante universal de los gases,  
unidades J/(mol*K)  
--E/Rr=3000  
REAL Cai= 0.8 UNITS "mol/l" -- Concentracion inicial de A en mol/l, la  
ponemos al 80%  
REAL K=1.380 UNITS "s^-1"-- unidades s^-1  
--REAL Ap=0.5 -- Apertura de la valvula  
REAL k=-2
```

REAL Ti=10  
 REAL Tt=2  
 REAL Tref=11.8  
 REAL Vbp1=1  
 REAL Vbp2=3  
 REAL Vc=1  
 DECLS  
 --REAL Ap -- Apertura de la valvula  
 REAL U UNITS "KW/m^2\*°C" -- Valor del coeficiente de intercambio de calor, unidades en KW/m^2°C.  
 REAL mc UNITS "Kg"  
 REAL mr UNITS "Kg" -- Masa del reactor, unidades Kg.  
 REAL Wro UNITS "Kg/min" -- Flujo de Caudal que le entra a la camisa  
 REAL Wr UNITS "Kg/min" -- Flujo de caudal que le sale a la camisa  
 REAL Fr UNITS "l/min" -- Caudal que entra y sale de la camisa, ambos son iguales, unidades l/min  
 REAL T=15 UNITS "°C" -- Temperatura del reactor, unidades C°  
 REAL Tr=10 UNITS "°C" -- Temperatura de la camisa  
 REAL Wi UNITS "Kg/min" -- Flujo de caudal que entra al reactor de la calle, unidades Kg/min  
 REAL Fi UNITS "l/min" -- Caudal que entra al reactor de la calle, unidades l/min  
 REAL Wres UNITS "Kg/min" -- Flujo de caudal que entra desde la resistencia, unidades Kg/min  
 REAL Fres UNITS "l/min" -- Caudal que entra desde la resistencia, unidades l/min  
 REAL Tres UNITS "°C" -- Temperatura del caudal que entra desde la resistencia, unidades °C  
 REAL Hb UNITS "l/min" -- Altura que da la bomba dosificadora, esta la ponemos nosotros  
 REAL Qres UNITS "Kw" -- Calor producido por las resistencias  
 --REAL I -- Intensidad que enviamos a las resistencias  
 REAL Fo UNITS "l/min" -- Caudal de salida del reactor, unidades l/min.  
 REAL Wo UNITS "Kg/min" -- Flujo de caudal de salida del reactor, unidades Kg/min  
 REAL Tro UNITS "°C" -- Temperatura del flujo que entra a la camisa, unidades °C  
 REAL Q UNITS "Kw" -- Calor por conduccion o por conveccion  
 REAL Ca=0.05 UNITS "mol/l" -- Concentracion de a, hemos cogido que el producto a se tranforma en un producto b, unidades mol/l.  
 REAL P UNITS "Kw" -- Potencia que da la unidad de potencia, unidades en W.  
 REAL Vreac -- Velocidad de la reaccion  
 REAL Mat UNITS "Kj\*°C/min"  
 REAL Ment UNITS "Kj\*°C/min"  
 REAL Msal UNITS "Kj\*°C/min"  
 REAL Tk UNITS "K" --Temperatura del reactor en grados kelvin  
 --Primer controlador  
 REAL e  
 REAL v

REAL u  
 REAL ew  
 REAL L1  
 DISCRETE  
 CONTINUOUS  
 --Ecuacion del coeficiente global de transferencia de calor  
 $U=0.074+1.982*Fr*10$   
 $Tro=10$   
 $Hb=75$   
 --"Fo y Fi tienen que ser iguales porque el volumen del reactor es constante"  
 $Fo=Fi$  -- Sacar de la tabla al 75 % sabes que es fijo  
 --Ecuaciones que relacionan el caudal con la altura de las bombas peristalticas  
 $Fi=Vbp1$   
 $Fres=Vbp2$   
 -- Formula de calculo de caudal cuando tenemos una valvula  
 $Fr=((1/1.16)*((Pir-Ro*G*Hcam-Ro*G*Hic)/(Ro*(K11+(1/((Ap**2)*(Cv**2))))))**(1/2)))/3.6$   
 $mr=V*Ro$  -- Masa del reactor es volumen por densidad  
 $mc=Vc*Ro$   
 $Q=U*A*(T-Tr)$  -- Transferencia de calor por conduccion y conveccion, calor que perdemos en el encamisado  
 --Ecuacion para el calculo de Tres  
 $Fres*Ro*Cer*T + Q = Fres*Ro*Cer*Tres$   
 --  $E=mr*Cer*T$  --Energia  
 $Qres=P$  --  $I**2*R$  --Calor producido en la resistencia -->  $P=V*I$ , La v es constante, y la I es la que tenemos que ver que no pase la maxima permitida por la unidad de potencia.  
 $Wro=Fr*Ro$  -- Calculo del flujo máximo  
 $Wr=Wro$   
 $Wi=Fi*Ro$   
 $Wres=Fres*Ro$   
 $Wo=Fo*Ro$   
 $Mat=Wi*Cer*(Tin-T)$   
 $Ment=Wr*Cer*Tr$   
 $Msal=Wro*Cer*Tro$   
 --Balance de materia a la camisa  
 $mc*Cer*Tr'=Msal-Ment+Q$   
 --Balance de materia al reactor  
 $mr*Cer*T'=Mat-Q+Qres$   
 $Tk=T+273$   
 --Ecuaciones que relacionan el calor de la resistencia con el de una reaccion quimica  
 $Vreac=V*K*exp(-E/(Rr*Tk))*Ca$   
 $P=Vreac*Inal$   
 $V*Ca'=Wi*Ca- Wi*Ca-Vreac$   
 --  $V*K*exp(-E/(Rr*T))*Ca$  --> Esta es la velocidad de reaccion  
 --Mi Controlador  
 --Control Temperatura Camisa

```

e=Tref-T
L1=k*e+v
-- Tiene que dar un valor entre 10 y 45, porque es la consigna para la temperatura
de la camisa
--Este controlador tiene ganancia positiva si queremos aumentar la temperatura la
salida tiene que ser mayor
u= ZONE ( L1 < 9.4 AND L1 >0 ) L1
ZONE ( L1 >= 9.4) 9.4
OTHERS 0
--u=k*e+v
v'=(k*e/Ti)+ew/Tt
ew=u-L1 -- Termino para evitar el Antiwindup
--Control Temperatura reactor
--Este controlador tiene ganancia negativa, si queremos incrementar la
temperatura tenemos que disminuir el caudal de referencia al segundo controlador
Fr=u
END COMPONENT

```



## Anexo 8: Código del control Feedforward

```
/*-----  
Codigo de control Feedforward  
LIBRARY: DEFAULT_LIB  
FILE: Reactor  
CREATION DATE: 02/03/2016  
-----*/  
USE MATH  
USE CONTROL  
COMPONENT Reactor_Bueno_ControlFeedforward  
DATA --Poner las unidades como las tengo apuntadas en el folio.  
--REAL R -- El valor de la resistencia  
REAL A=0.3 UNITS "m^2" -- El area de intercambio de calor, unidades m^2  
REAL V=4.67 UNITS "l" -- Volumen del reactor, unidades en l  
REAL Vc=1 UNITS "l"  
REAL Cer=4.18 UNITS "Kj/Kg" -- Calor especifico, unidades en Kj/Kg  
REAL Tin=10 UNITS "°C" -- Temperatura del caudal que entra al reactor, es la  
ambiente, unidades °C  
REAL Pir=15 UNITS "Bar" -- Presion de entrada a la camisa en bar  
REAL Ro=1 UNITS "Kg/l" -- Densidad del agua, unidades Kg/l  
REAL G=9.8 UNITS "m/s^2" -- Gravedad, unidades m/s^2  
REAL K11=0 -- Constante de perdidas en la tuberia, al no poder medirlo  
exactamente porque aun no esta montada la planta, al ser un tramo muy pequeño  
las ponemos despreciables  
--REAL K12=221.22 "Las perdidas de esta tuberia nos dan igual, porque el caudal  
es fijo" -- Constante de perdidas en la tuberia, de la salida del reactor al desagüe,  
donde esta la nomba centrifuga.  
REAL Cv=3.57 -- Constante de la valvula  
REAL Hic=0.08 UNITS "m" -- Es la diferencia entre la altura de entrada y la  
salida del agua en esa linea, unidades m.  
REAL Hcam=0.33 UNITS "m" -- Altura de la camisa del reactor, unidades m  
REAL Hsr= 0.10 UNITS "m" -- Diferencia entre la salida de agua del reactor a la  
bomba y el desa gue, unidades m.  
REAL Hreac= 0.12 UNITS "m" -- Altura de liquido que hay por encima de la  
salida a la bomba centrifuga, unidades m  
--Para la reaccion quimica hemos cogido la formacion de agua, H2+O2 -> H2O  
REAL E=2420 UNITS "Kj" -- Parametro propio de la reaccion, unidades KJ  
REAL Inal= 20 UNITS "Kj/mol" -- Valor constante, lo que reacciona cada  
segundo en la reaccion, unidades KJ/mol  
REAL Rr=8.31434 UNITS "J/mol*K" --Constante universal de los gases,  
unidades J/(mol*K)  
--E/Rr=3000  
REAL Cai= 0.8 UNITS "mol/l" -- Concentracion inicial de A en mol/l  
REAL K=1.380 UNITS "s^-1"-- Constante de velocidad de reaccion, en nuestro  
caso es de orden 0.  
--REAL Ap=0.5 -- Apertura de la valvula
```

REAL k=-1  
 REAL Ti=10  
 REAL Tt=2  
 REAL Tref=11.5  
 DECLS  
 REAL U  
 --REAL Ap=0.5 -- Apertura de la valvula  
 REAL mr UNITS "Kg" -- Masa del reactor, unidades Kg.  
 REAL mc  
 REAL Wro UNITS "Kg/min" -- Flujo de Caudal que le entra a la camisa  
 REAL Wr UNITS "Kg/min" -- Flujo de caudal que le sale a la camisa  
 REAL Fr UNITS "l/min" -- Caudal que entra y sale de la camisa, ambos son iguales, unidades l/min  
 REAL T=15 UNITS "°C" -- Temperatura del reactor, unidades C°  
 REAL Tr=10 UNITS "°C" -- Temperatura de la camisa  
 REAL Wi UNITS "Kg/min" -- Flujo de caudal que entra al reactor de la calle, unidades Kg/min  
 REAL Fi UNITS "l/min" -- Caudal que entra al reactor de la calle, unidades l/min  
 REAL Wres UNITS "Kg/min" -- Flujo de caudal que entra desde la resistencia, unidades Kg/min  
 REAL Fres UNITS "l/min" -- Caudal que entra desde la resistencia, unidades l/min  
 REAL Tres UNITS "°C" -- Temperatura del caudal que entra desde la resistencia, unidades °C  
 REAL Vbp1 UNITS "l/min" -- Velocidad de giro de la bomba peristaltica 1  
 REAL Vbp2 UNITS "l/min" -- Velocidad de giro de la bomba peristaltica 2  
 REAL Hb UNITS "l/min" -- Altura que da la bomba dosificadora, esta la ponemos nosotros  
 REAL Qres UNITS "Kw" -- Calor producido por las resistencias  
 --REAL I -- Intensidad que enviamos a las resistencias  
 REAL Fo UNITS "l/min" -- Caudal de salida del reactor, unidades l/min.  
 REAL Wo UNITS "Kg/min" -- Flujo de caudal de salida del reactor, unidades Kg/min  
 REAL Tro UNITS "°C" -- Temperatura del flujo que sale de la camisa, unidades °C  
 REAL Q UNITS "Kw" -- Calor por conduccion o por conveccion  
 REAL Ca=0.05 UNITS "mol/l" -- Concentracion de a, hemos cogido que el producto a se tranforma en un producto b, unidades mol/l.  
 REAL P UNITS "Kw" -- Potencia que da la unidad de potencia, unidades en W.  
 REAL Vreac -- Velocidad de la reaccion  
 REAL Mat UNITS "Kj\*°C/min"  
 REAL Ment UNITS "Kj\*°C/min"  
 REAL Msal UNITS "Kj\*°C/min"  
 REAL e  
 REAL v  
 REAL u  
 REAL ew  
 REAL L

REAL Tk UNITS "K" --Temperaturas en grados Kelvin  
 REAL z  
 REAL p  
 DISCRETE  
 CONTINUOUS  
 --Ecuacion del coeficiente global de transferencia de calor ¿Preguntar si es necesaria usar?  
 $U=0.074+1.982*Fr*10$   
 $Tro=10$   
 --Ap=0.5  
 $Vbp1=1$   
 $Vbp2=7$   
 $Hb=75$   
 $p=Ti-10$   
 --Fo y Fi tienen que ser iguales porque el volumen del reactor es constante  
 --Ecuaciones que relacionan el caudal con la altura de las bombas peristalticas  
 $Fi=Vbp1$   
 $Fo=Fi$   
 $Fres=Vbp2$   
 -- Formula de calculo de caudal cuando tenemos una valvula  
 $Fr=((1/1.16)*((Pir-Ro*G*Hcam-Ro*G*Hic)/(Ro*(Kl1+(1/((Ap**2)*(Cv**2))))))**(1/2)))/3.6$   
 $mr=V*Ro$  -- Masa del reactor es volumen por densidad  
 $mc=Vc*Ro$   
 $Q=U*A*(T-Tr)$  -- Transferencia de calor por conduccion y conveccion, calor que perdemos en el encamisado  
 --Esta Q es pequeña mirarlo.  
 --Ecuacion para el calculo de Tres  
 $Fres*Ro*Cer*T + Q = Fres*Ro*Cer*Tres$   
 --  $E=mr*Cer*T$  --Energia  
 $Qres=P$  --  $I**2*R$  --Calor producido en la resistencia -->  $P=V*I$ , La v es constante, y la I es la que tenemos que ver que no pase la maxima permitida por la unidad de potencia.  
 $Wro=Fr*Ro$  -- Calculo del flujo máximo  
 $Wr=Wro$   
 $Wi=Fi*Ro$   
 $Wres=Fres*Ro$   
 $Wo=Fo*Ro$   
 $Mat=Wi*Cer*(Tin-T)$   
 $Ment=Wr*Cer*Tr$   
 $Msal=Wro*Cer*Tro$   
 --Balance de materia a la camisa  
 $mc*Cer*Tr'=Msal-Ment+Q$   
 --Balance de materia al reactor  
 $mr*Cer*T'=Mat-Q+Qres$   
 $Tk=T+273$   
 --Ecuaciones que relacionan el calor de la resistencia con el de una reaccion quimica

```

Vreac=V*K*exp(-E/(Rr*Tk))*Ca
P=Vreac*Inal
V*Ca'=Wi*Cai- Wi*Ca-Vreac
--V*K*exp(-E/(Rr*Tk))*Ca --> Esta es la velocidad de reaccion
--Feedforward
3*z'+z=20.2825*p'+3.325*p
--Mi Controlador
e=Tref-T
--u=k*e+v
L=k*e+v+z
u= ZONE ( L < 9.4 AND L >0 ) L
ZONE ( L >= 9.4) 9.4
OTHERS 0
ew=u-v -- Termino para evitar el Antiwindup
v'=(k*e/Ti)+ew/Tt
--Aqui sumar el control feedforward
Fr=u
END COMPONENT

```

## Anexo 9: Código del control de concentración

```
/*-----  
Codigo del control en cascada para la concentración  
LIBRARY: DEFAULT_LIB  
FILE: Reactor  
CREATION DATE: 02/03/2016  
-----*/  
USE MATH  
USE CONTROL  
COMPONENT Reactor_Bueno_ControlPID_Concentracion  
DATA --Poner las unidades como las tengo apuntadas en el folio.  
--REAL R -- El valor de la resistencia  
REAL A=0.3 UNITS "m^2" -- El area de intercambio de calor, unidades m^2  
REAL V=4.67 UNITS "l" -- Volumen del reactor, unidades en l  
REAL Vc=1 UNITS "l"  
REAL Cer=4.18 UNITS "Kj/Kg" -- Calor especifico, unidades en Kj/Kg  
REAL Tin=10 UNITS "°C" -- Temperatura del caudal que entra al reactor, es la  
ambiente, unidades °C  
REAL Pir=15 UNITS "Bar" -- Presion de entrada a la camisa en bar  
REAL Ro=1 UNITS "Kg/l" -- Densidad del agua, unidades Kg/l  
REAL G=9.8 UNITS "m/s^2" -- Gravedad, unidades m/s^2  
REAL K11=0 -- Constante de perdidas en la tuberia, al no poder medirlo  
exactamente porque aun no esta montada la planta, al ser un tramo muy pequeño  
las ponemos despreciables  
--REAL K12=221.22 "Las perdidas de esta tuberia nos dan igual, porque el caudal  
es fijo" -- Constante de perdidas en la tuberia, de la salida del reactor al desagüe,  
donde esta la bomba centrifuga.  
REAL Cv=3.57 -- Constante de la valvula  
REAL Hic=0.08 UNITS "m" -- Es la diferencia entre la altura de entrada y la  
salida del agua en esa linea, unidades m.  
REAL Hcam=0.33 UNITS "m" -- Altura de la camisa del reactor, unidades m  
REAL Hsr= 0.10 UNITS "m" -- Diferencia entre la salida de agua del reactor a la  
bomba y el desagüe, unidades m.  
REAL Hreac= 0.12 UNITS "m" -- Altura de liquido que hay por encima de la  
salida a la bomba centrifuga, unidades m  
--Para la reaccion quimica hemos cogido la formacion de agua, H2+O2 -> H2O  
REAL E=2420 UNITS "Kj" -- Parametro propio de la reaccion, unidades KJ  
REAL Inal= 20 UNITS "Kj/mol" -- Valor constante, lo que reacciona cada  
segundo en la reaccion, unidades KJ/mol  
REAL Rr=8.31434 UNITS "J/mol*K" --Constante universal de los gases,  
unidades J/(mol*K)  
--E/Rr=3000  
REAL Cai= 0.8 UNITS "mol/l" -- Concentracion inicial de A en mol/l  
REAL K=1.380 UNITS "s^-1"-- Constante de velocidad de reaccion, en nuestro  
caso es de orden 0.  
--REAL Ap=0.5 -- Apertura de la valvula
```

REAL k=5  
 REAL Ti=10  
 REAL Tt=2  
 REAL Cref=0.5  
 DECLS  
 REAL U  
 REAL Ap=0.5 -- Apertura de la valvula  
 REAL mr UNITS "Kg" -- Masa del reactor, unidades Kg.  
 REAL mc  
 REAL Wro UNITS "Kg/min" -- Flujo de Caudal que le entra a la camisa  
 REAL Wr UNITS "Kg/min" -- Flujo de caudal que le sale a la camisa  
 REAL Fr UNITS "l/min" -- Caudal que entra y sale de la camisa, ambos son iguales, unidades l/min  
 REAL T=15 UNITS "°C" -- Temperatura del reactor, unidades C°  
 REAL Tr=10 UNITS "°C" -- Temperatura de la camisa  
 REAL Wi UNITS "Kg/min" -- Flujo de caudal que entra al reactor de la calle, unidades Kg/min  
 REAL Fi UNITS "l/min" -- Caudal que entra al reactor de la calle, unidades l/min  
 REAL Wres UNITS "Kg/min" -- Flujo de caudal que entra desde la resistencia, unidades Kg/min  
 REAL Fres UNITS "l/min" -- Caudal que entra desde la resistencia, unidades l/min  
 REAL Tres UNITS "°C" -- Temperatura del caudal que entra desde la resistencia, unidades °C  
 REAL Vbp1=1 UNITS "l/min" -- Velocidad de giro de la bomba peristaltica 1  
 REAL Vbp2 UNITS "l/min" -- Velocidad de giro de la bomba peristaltica 2  
 REAL Hb UNITS "l/min" -- Altura que da la bomba dosificadora, esta la ponemos nosotros  
 REAL Qres UNITS "Kw" -- Calor producido por las resistencias  
 --REAL I -- Intensidad que enviamos a las resistencias  
 REAL Fo UNITS "l/min" -- Caudal de salida del reactor, unidades l/min.  
 REAL Wo UNITS "Kg/min" -- Flujo de caudal de salida del reactor, unidades Kg/min  
 REAL Tro UNITS "°C" -- Temperatura del flujo que sale de la camisa, unidades °C  
 REAL Q UNITS "Kw" -- Calor por conduccion o por conveccion  
 REAL Ca=0.05 UNITS "mol/l" -- Concentracion de a, hemos cogido que el producto a se tranforma en un producto b, unidades mol/l.  
 REAL P UNITS "Kw" -- Potencia que da la unidad de potencia, unidades en W.  
 REAL Vreac -- Velocidad de la reaccion  
 REAL Mat UNITS "Kj\*°C/min"  
 REAL Ment UNITS "Kj\*°C/min"  
 REAL Msal UNITS "Kj\*°C/min"  
 REAL e  
 REAL v  
 REAL u  
 REAL ew  
 REAL L

REAL Tk UNITS "K" --Temperaturas en grados Kelvin

DISCRETE

CONTINUOUS

--Ecuacion del coeficiente global de transferencia de calor

$$U=0.074+1.982*Fr^{10}$$

$$Tro=10$$

$$Ap=0.5$$

$$Vbp2=7$$

$$Hb=75$$

--Ecuaciones que relacionan el caudal con la altura de las bombas peristalticas

$$Fi=Vbp1$$

$$Fo=Fi$$

$$Fres=Vbp2$$

-- Formula de calculo de caudal cuando tenemos una valvula

$$Fr=\left(\frac{1}{1.16}\right)\left(\frac{Pir-Ro*G*Hcam-Ro*G*Hic}{Ro*(Kl1+(1/((Ap^{**2})*(Cv^{**2}))))}\right)^{**}(1/2))/3.6$$

$mr=V*Ro$  -- Masa del reactor es volumen por densidad

$$mc=Vc*Ro$$

$Q=U*A*(T-Tr)$  -- Transferencia de calor por conduccion y conveccion, calor que perdemos en el encamisado

--Ecuacion para el calculo de Tres

$$Fres*Ro*Cer*T + Q = Fres*Ro*Cer*Tres$$

--  $E=mr*Cer*T$  --Energia

$Qres=P$  --  $I^{**2}*R$  --Calor producido en la resistencia -->  $P=V*I$ , La v es constante, y la I es la que tenemos que ver que no pase la maxima permitida por la unidad de potencia.

$Wro=Fr*Ro$  -- Calculo del flujo máximo

$$Wr=Wro$$

$$Wi=Fi*Ro$$

$$Wres=Fres*Ro$$

$$Wo=Fo*Ro$$

$$Mat=Wi*Cer*(Tin-T)$$

$$Ment=Wr*Cer*Tr$$

$$Msal=Wro*Cer*Tro$$

--Balance de materia a la camisa

$$mc*Cer*Tr'=Msal-Ment+Q$$

--Balance de materia al reactor

$$mr*Cer*T'=Mat-Q+Qres$$

$$Tk=T+273$$

--Ecuaciones que relacionan el calor de la resistencia con el de una reaccion quimica

$$Vreac=V*K*\exp(-E/(Rr*Tk))*Ca$$

$$P=Vreac*Inal$$

$$V*Ca'=Wi*Ca_i - Wi*Ca - Vreac$$

--  $V*K*\exp(-E/(Rr*Tk))*Ca$  --> Esta es la velocidad de reaccion

--Mi Controlador

$$e=Cref-Ca$$

$$-u=k*e+v$$

```
L=k*e+v
u= ZONE ( L < 9.4 AND L >0 ) L
ZONE ( L >= 9.4) 9.4
OTHERS 0
ew=u-v -- Termino para evitar el Antiwindup
v'=(k*e/Ti)+ew/Tt
Vbp1=u
END COMPONENT
```