



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

Implementación de modelos reducidos de cristalizadores batch en SIMULINK

Autor:

Mas Bobillo, Andrés

Tutor:

**Acebes Arconada, Luis Felipe
Departamento de Ingeniería de
Sistemas y Automática**

Valladolid, Julio 2019.



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**



RESUMEN

En este TFG se ha desarrollado un simulador de la primera etapa de la sección de cristalización de una factoría azucarera genérica. Para ello se ha desarrollado un modelo reducido de la unidad de proceso más importante en dicha sección: cristizador discontinuo o por lotes. El modelo de dicha unidad, y de todo el sistema, ha sido programado en SIMULINK, usando la librería STATE-FLOW para la implementación de la “receta” de fabricación de cada lote, y refleja de forma simplificada los caudales de demanda y salida de producto, así como las necesidades de vapor. El simulador se ha validado de forma cualitativa, garantizándose el cumplimiento de los balances de materia. Debe indicarse que el objetivo del simulador es disponer de un predictor que permita a un algoritmo de control determinar la planificación del funcionamiento del sistema completo seleccionando los tiempos de espera entre cada ciclo completo de cada cristizador.

(In this work a simulator of the first stage of the crystallization section of a generic sugar factory has been developed. To this end, a reduced model of the most important process unit has been developed: discontinuous or batch crystallizer. The model of this unit, and of the whole system, has been programmed in SIMULINK, using the STATE-FLOW library for the implementation of the manufacturing “recipe” for each batch, and it reflects in a simplified way the demand and output flows of product, as well as steam needs. The simulator has been validated qualitatively, guaranteeing compliance with the material balances. It should be noted that the object of the simulator is to have a predictor which allows a control algorithm to determine the planning of the operation of the waiting times between each complete cycle of each crystallizer)

PALABRAS CLAVE

Proceso de fabricación por lotes, Modelado, Simulación, SIMULINK.

(Batch manufacturing process, Modelling, Simulation, SIMULINK)





ÍNDICE

1.INTRODUCCIÓN	5
2.OBJETIVOS	5
3.MODELADO Y SIMULACIÓN DE SISTEMAS	7
4.MODELADO DEL SISTEMA	11
a)Conceptualización	11
1)Descripción del sistema a simular	11
2)Objetivos del modelo	17
3)Hipótesis de modelado.....	17
b)Formalización.....	18
c)Parametrización	21
d)Implementación	21
e)Pruebas y Validación	34
5.CONCLUSIONES	45
6.BIBLIOGRAFÍA	47





1. INTRODUCCIÓN

El proceso de producción de azúcar es muy complejo, combina procesos puramente continuos con otros procesos por lotes. La parte más compleja es la que se lleva a cabo en el cristalizador discontinuo o por lotes. Esta sección del proceso, junto con los depósitos conectados a ella será el caso de estudio en este proyecto. Para poder realizar cualquier acción de control es necesario simplificar el modelo. Para ello se utilizarán técnicas de modelado adecuadas y un lenguaje de simulación adecuado.

2. OBJETIVOS

El objetivo de este trabajo es realizar un modelo del sistema compuesto por las tres tachas y los depósitos que almacenan los productos de entrada y salida. El modelo debe ser sencillo y representar fielmente los caudales simplificados de las entradas y las salidas. Como objetivo final, este proyecto debe servir como base para el desarrollo de sistemas de gestión y planificación del funcionamiento del sistema completo modificando los tiempos de espera entre cada ciclo de cada cristalizador.



3. MODELADO Y SIMULACIÓN DE SISTEMAS

Modelado:

[1] El objetivo del modelado es obtener el modelo matemático dinámico de un sistema fijo. Para ello existen dos metodologías de trabajo distintas.

La primera es el **modelado**, que se caracteriza por generar conjuntos de ecuaciones diferenciales y algebraicas, normalmente no lineales, que se obtienen a partir de un estudio analítico del sistema basado en una serie de hipótesis sobre dicho sistema, el uso de leyes de comportamiento físico-químicas o bien expresiones obtenidas a partir de datos experimentales.

La metodología de trabajo del modelado se caracteriza por seguir una serie de pasos:

- Conceptualización
 - Conocer de forma general el proceso que se quiere modelar
 - Definir los objetos del modelo
 - Realizar un modelo conceptual basado en hipótesis sobre el sistema bajo estudio que debe ser tan simple como sea posible
 - Conocer las leyes que rigen los fenómenos de sistema y su causalidad física
 - Dividir el sistema en subsistemas interconectados
- Formalización
 - Formular el modelo en forma de ecuaciones diferenciales y/o algebraicas
- Parametrización
 - Determinación de los parámetros del modelo y condiciones iniciales
- Resolución del modelo en un ordenador
- Validar el modelo

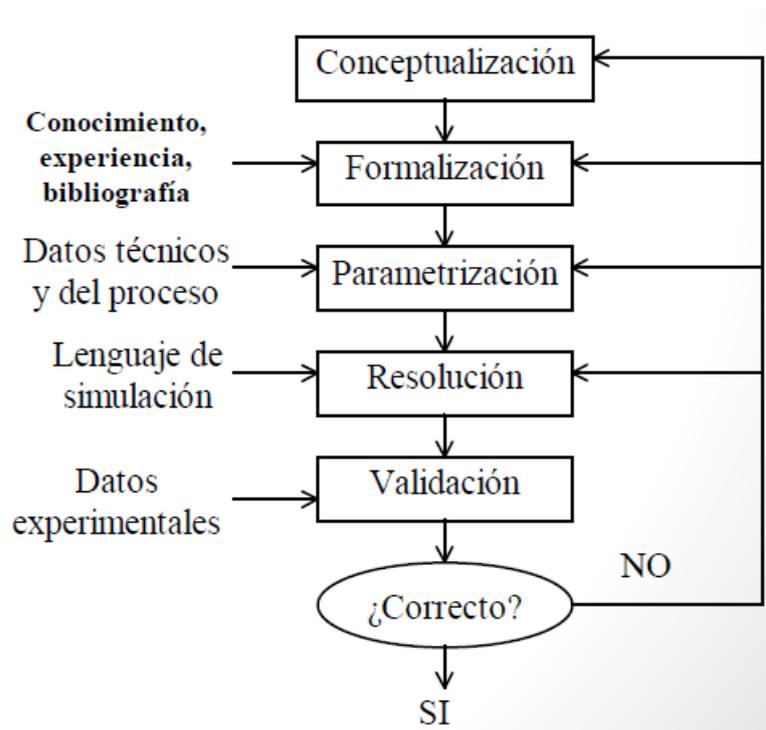


Ilustración 1 Esquema metodología modelado

La segunda metodología es la de **identificación**. Los pasos a seguir para esta metodología son los que siguen a continuación:

- Seleccionar una clase de modelos: Continuos o discretos, lineales o no.
- Obtener un conjunto de datos experimentales.
- Seleccionar, de acuerdo con algunas de las características de los datos experimentales y previo minucioso análisis de dichos datos, un modelo de entre los de la clase seleccionada.
- Tratamiento de los datos experimentales y estimación de los parámetros del modelo. Las técnicas de estimación del modelo dependen de la clase de modelo a identificar y de los datos de los modelos que se dispongan.
- Probar la validez del modelo.

Simulación

[2] La simulación se presenta como una herramienta idónea para ensayar, conocer el funcionamiento de determinados sistemas o anticiparse a problemas. Estos sistemas de simulación facilitan conocer qué tipo de respuestas se pueden ofrecer ante determinadas situaciones, sin ningún tipo de riesgo físico ni para los humanos ni para las máquinas y con un gran ahorro de tiempo y costes.

La simulación, utilizando sistemas informáticos, consiste en aplicar programas en los que podamos comprobar cómo funciona un determinado sistema. También es posible testar comportamientos a través de este tipo de simulaciones. Lo que se intenta a través de esta técnica es recrear sistemas reales e hipotéticos a través de los que se pueda trabajar antes de sacar un producto al mercado.

A nivel industrial encontramos que la simulación, en plena era de la Industria 4.0, tiene una función muy importante ya que puede facilitar la toma de decisiones en una empresa. A este respecto, la simulación industrial puede facilitar la predicción del funcionamiento de determinada maquinaria, de la elaboración de un producto y cómo reaccionar y solucionar la detección de errores en una planta de producción. Con los software específicos que se utilizan para la simulación industrial se puede recrear el entorno perfecto en una plan de producción y cómo se pueden distribuir, con seguridad, todos sus componentes.

Lenguajes de programación

[3] Un lenguaje de simulación es un software de simulación de naturaleza general y posee algunas características especiales para ciertas aplicaciones. El modelo es desarrollado usando las instrucciones adecuadas del lenguaje y permitiendo al analista un gran control para cualquier clase de sistema.

Una clasificación de los diversos lenguajes de programación [4]:

- Lenguajes de programación de propósito general
- Lenguajes de simulación de sistemas continuos
 - Orientados a PDEs
 - Orientados a ODEs
- Entornos de modelado
 - Orientados a bloques
 - Basados en lenguajes de simulación orientados a sentencias
 - Basados en lenguajes de simulación orientados a bloques:
Simulink
 - Orientados a objetos
 - Orientados a conocimiento físico



SIMULINK

[5][6] SIMULINK es una toolbox especial de MATLAB que sirve para simular el comportamiento de los sistemas dinámicos. Puede simular sistemas lineales y no lineales, modelos en tiempo continuo y tiempo discreto y sistemas híbridos de todos los anteriores. Los sistemas a modelar también pueden tener velocidades múltiples, es decir, tener diferentes partes que se manejen a cinéticas diferentes.

Para modelar, entrega una Interfaz Gráfica para el Usuario (GUI) para construir los modelos como diagramas de bloques, usando operaciones de clic-and-drag del mouse. Con la ayuda de esta interfaz, se pueden dibujar los modelos como si se realizaran con lápiz y papel. Incluye una extensa librería de bloques para fuentes, resultados, componentes lineales y no lineales y conectores, además de poder crear nuestros propios bloques.

Los modelos creados son jerárquicos, con lo cual se pueden crear modelos usando varias ventanas. Se puede ver el sistema desde el nivel más alto, para luego mediante un doble clic revisar los diversos subsistemas insertos en el modelo general. Esta forma de presentación presenta la ventaja de analizar cómo se encuentra organizado el modelo y cómo sus partes interactúan.

Una vez definido el modelo, se puede simular, usando una suerte de métodos matemáticos de integración. Las herramientas de análisis incluyen linealización y arreglo de los modelos.

4. MODELADO DEL SISTEMA

a) Conceptualización

1) Descripción del sistema a simular

[7] El sistema de estudio (*Ilustración 2*) contiene una serie de cristalizadores discontinuos o tachas que operan en paralelo. El crecimiento de los cristales de azúcar se lleva a cabo de acuerdo a una receta programada en el sistema de control (*Ilustración 3*).

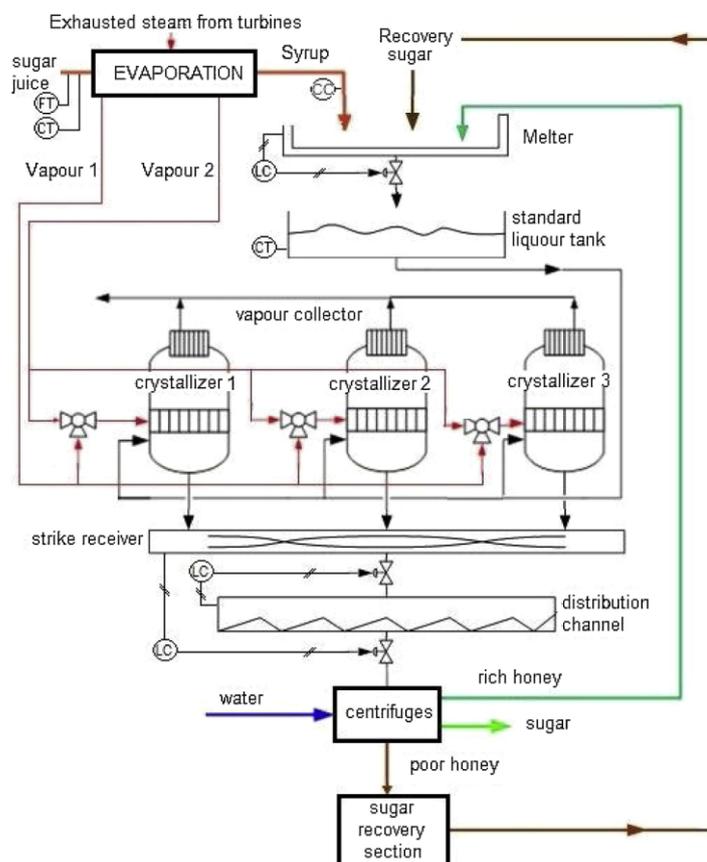


Ilustración 2 Diagrama del caso de estudio

El jarabe de alimentación de los cristalizadores, llamado licor estándar, se almacena en el tanque de licor estándar, cuyo nivel de producto no está controlado.

El licor madre, un producto obtenido de las tachas, se descarga en el tanque receptor, que es un depósito agitado y con aislamiento térmico.

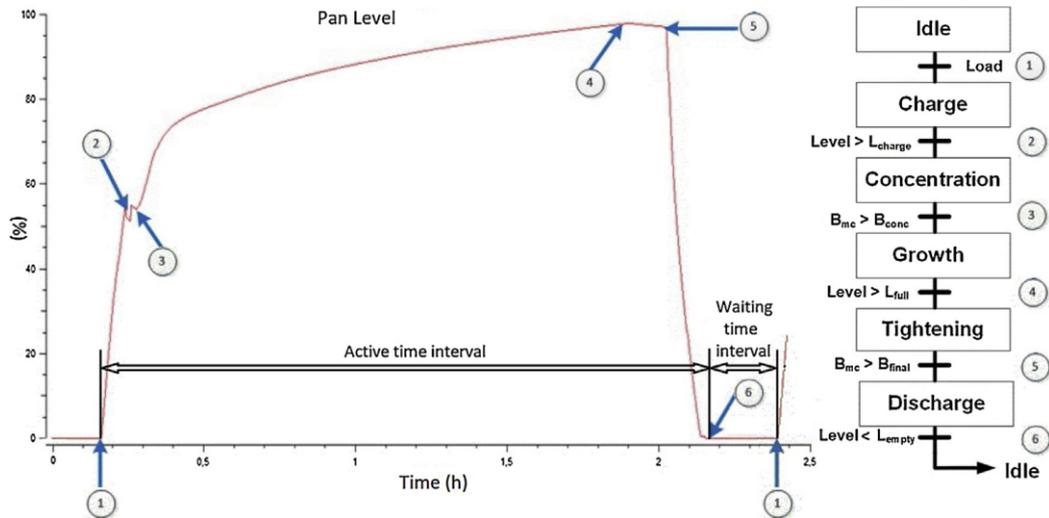


Ilustración 3 Volumen de licor madre contenido en un cristalizado de azúcar como resultado de la receta del control por lotes

[8] Las tachas están constituidas por un cilindro vertical de altura similar a su diámetro. En la parte inferior están provistas de un calefactor (o calandria) de vapor del tipo de tubos y carcasa, cuyo objetivo es el de transferir el calor latente de la condensación del vapor que fluye en la carcasa del intercambiador hacia la masa cocida que lo hace dentro de los tubos.

La presión de vapor proviene de los vahos producidos por el tercer o cuarto efecto de la sección de evaporación.

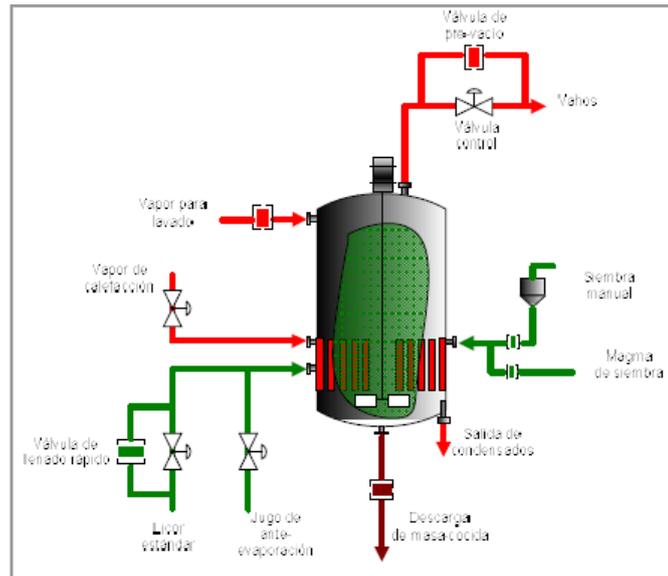


Ilustración 4 Esquema de Tacha

El licor estándar, tras un proceso de filtrado, se envía a las tachas de primera. Es importante que el Brix (contenido de sólidos) y la pureza del jarabe que sale de la refundidora se mantenga en un valor prefijado y constante pues la concentración del jarabe con que se alimentan las tachas de 1ª ha de mantenerse dentro de unos márgenes muy estrechos si se pretende obtener regularidad y azúcar de buena calidad. Todas las tachas operan bajo condiciones de vacío, con objeto de rebajar el punto de ebullición y así evitar la descomposición térmica de la sacarosa (pérdida de sacarosa). Cuando se alcanza la condición de sobresaturación en el jugo, se siembran pequeños cristales de azúcar y se les hace crecer añadiendo nuevo jarabe, manteniendo en todo momento las condiciones de sobresaturación. Cuando se ha conseguido un tamaño adecuado de los cristales y se ha llenado la tacha completamente se tiene en su interior un producto denominado masa cocida de primera, formado por sacarosa cristalizada (azúcar), sacarosa y no-azúcares disueltos en la solución llamada miel madre, es entonces cuando la tacha se descarga y se limpia.

Las tachas operan de manera semi-batch siguiendo una secuencia de trece etapas predefinidas que se describen a continuación:

- **Etapas de espera:** se espera hasta que se recibe la señal de carga.
- **Creación de vacío:** esto se logra mediante la regulación de la presión en la cámara.

- **Etapa de carga:** Se llena la cámara de la tacha con jarabe estándar hasta alcanzar un determinado nivel llamado pie de tacha que se corresponde aproximadamente con el 50% del nivel de la tacha y el 35% del volumen máximo del jarabe en ella (en esta zona se encuentra la calandria que ocupa un determinado volumen). Al mismo tiempo que entra jarabe estándar en la tacha se abre la válvula de suministro de vapor de calefacción aumentando la temperatura del jarabe. Al comenzar la evaporación de parte del agua del jarabe, la presión en la cámara aumenta. La válvula de entrada y la de suministro de vapor están totalmente abiertas, y se pone en marcha el agitador.
- **Etapa de concentración:** El objetivo es alcanzar una sobresaturación adecuada para la siembra. Para calentar el jugo y provocar la evaporación de parte del agua, las tachas constan de un elemento calefactor, por el que discurre vapor a presión y que al condensarse cede calor a la masa cocida en la tacha. Evidentemente la evaporación provoca una disminución del nivel de la tacha por lo que es necesario mantenerlo mediante un control on/off que introduce licor estándar. Cuando se llega al Brix adecuado, es decir se ha alcanzado la sobresaturación deseada, se introduce la siembra.
- **Etapa de siembra:** se abre la válvula de siembra un tiempo prefijado y se introducen cristales microscópicos de unas pocas micras de diámetro, que son los núcleos de cristalización sobre los que crecerán los cristales de azúcar.
- **Etapa de crecimiento:** se continúa concentrando hasta que la sobresaturación llegue a un valor prefijado.
- **Etapa de aclarado:** se debe eliminar el polvo de azúcar o falso grano que haya podido surgir durante la etapa anterior, para ello se disminuye la concentración para disolver estos cristales mediante la introducción de licor estándar y si no fuera suficiente, añadiendo también jugo de ante-evaporación.



- **Etapa de cocción:** es una de las etapas más importantes y consiste en hacer crecer los granos de azúcar hasta el tamaño apropiado manteniendo la uniformidad en su tamaño (no permitiendo el surgimiento de nuevos granos). Se logra manteniendo la sobresaturación entre límites bien definidos. En la medida en que la sacarosa en disolución va disminuyendo hay que reponerla añadiendo licor estándar. Se pretende que el tamaño deseado del grano se alcance cuando el nivel en la tacha llegue al máximo permitido (tacha llena). El principal problema de operación está ligado al hecho de que la sobresaturación no se mide directamente. En los sistemas modernos la sobresaturación se controla indirectamente a través del Brix. La referencia del controlador se escoge mediante una tabla que depende del nivel actual de la cocida.
- **Etapa de espera:** la tacha está llena y se espera hasta que se reciba la señal de descarga.
- **Compactación final.**
- **Etapa de descarga:** Se abre la válvula de ruptura de vacío y cuando la presión en la cámara alcance la presión atmosférica se abre la válvula de descarga, vaciándose completamente la unidad.
- **Etapa de lavado:** se introduce vapor de limpieza mediante la apertura durante un tiempo prefijado de la válvula de limpieza.
- **Descarga final:** se abre nuevamente la válvula de descarga y se vacía completamente la tacha, pasando a la primera etapa: espera antes de la carga, quedando así lista para comenzar un nuevo lote.

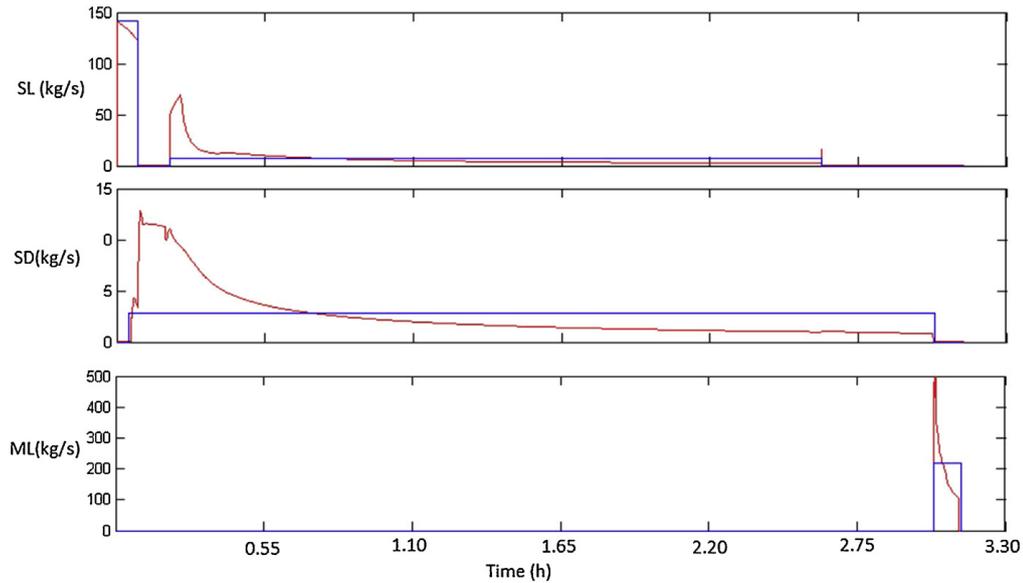


Ilustración 5 Flujo de Licor Estándar (SL) - Demanda de Vapor (SD) - Licor Madre (ML). En rojo se muestran los flujos de proceso real y en azul los flujos del modelo reducido

[7] El funcionamiento del caso de estudio es complejo ya que el flujo y el Brix del licor estándar están fuertemente perturbados por las cambiantes demandas de vapor de las tachas y la programación de la tacha depende del flujo y del Brix del licor estándar.

Como se muestra en la Ilustración 5, la variabilidad de los caudales de cada ciclo es tal que es necesario coordinar el inicio y la descarga de cada tacha, de modo que las demandas globales de vapor y licor estándar sean tan homogéneas como sea posible y que el tanque receptor pueda asumir las descargas de licor madre. Las cambiantes demandas de licor estándar pueden provocar el desbordamiento o el vaciado del tanque que almacena a este. Además aunque el nivel del tanque receptor de licor madre está controlado, las descargas de dicho licor cercanas entre sí pueden provocar una alimentación no homogénea a la siguiente etapa y fuertes fluctuaciones en los niveles de los tanques mencionados.

En una fábrica real, trabajadores especializados, los llamados “cocineros”, entre otras cosas, deciden los tiempos de inicio y descarga de cada lote. Estas decisiones dependen de la presión de vapor que viene de las turbinas, el flujo y el Brix del licor estándar y de las condiciones iniciales del proceso (los niveles iniciales del primer tanque y la etapa actual en la que se encuentran las tachas).

Teniendo en cuenta lo anterior, el objetivo de control principal es procesar todo el jugo. Esto quiere decir que las tachas deben programarse de modo que el nivel del tanque de licor estándar se debe mantener entre un valor mínimo y máximo, es decir, que no se desborde ni se vacíe.

Para considerar el problema en el marco del algoritmo de programación detallado anteriormente, las variables de decisión serán los intervalos de tiempo de espera del estado inactivo de cada tacha. La descarga ocurrirá automáticamente una vez finalice la etapa de compactación final, por lo que los intervalos de tiempo de espera para descargar no serán variables de decisión.

2) Objetivos del modelo

Los objetivos de este modelo son los siguientes:

- Que sea sencillo.
- Debe ser formalizado en base a las condiciones de entrada (Producto y presión de trabajo) y al producto de salida ideal.
- Globalmente debe representar los balances másicos del proceso
- reflejar la duración y las etapas del proceso.
- Debe reflejar los caudales de entrada, salida y la demanda de vapor según las gráficas de la Ilustración 5. (Representación simplificada, en azul).
- Debe tener, como parámetro fundamental el tiempo de espera para que pueda ser optimizado posteriormente por algún algoritmo de control.

3) Hipótesis de modelado

Para poder realizar el modelo debemos asumir una serie de hipótesis

- Las etapas de las que se compone el proceso son las siguientes: etapa de carga, concentración, crecimiento, descarga y espera.
- Las etapas de tratamiento tienen una duración fija
- La etapa de cocción tiene una duración variable que dependerá de la entrada del producto y de la presión
- Se cumplen los balances de materia
- Las etapas son homogéneas
- Al final de la etapa de crecimiento la tacha está completamente llena
- Los caudales son constantes durante toda una etapa

b) Formalización

Para la obtención del modelo matemático del sistema es necesario dividir este en dos subsistemas (tacha y tanques de almacenamiento) y obtener las ecuaciones que rigen cada uno de ellos.

TACHA

[7] El intervalo de tiempo durante el cual el proceso está activo es la suma de los tiempos de carga, concentración, crecimiento y descarga (t_{ca} , t_{co} , t_{cr} , t_d).

La primera medida a calcular es el intervalo de tiempo de la etapa de crecimiento en relación al Brix (Bx_{SL}) y pureza (Pu_{SL}) del licor estándar y del set point de la presión de vapor durante la etapa de crecimiento (SP_p).

$$t_{cr} = 17.33 - 0.093 \cdot Bx_{SL} - 0.069 \cdot Pu_{SL} - 1.385 \cdot SP_p \quad (1)$$

La densidad del licor madre (d_{ML}) se calcula mediante una función conocida que depende del Brix del licor madre (Bx_{ML}), el cual es un parámetro tecnológico.

$$d_{ML} = 8.833 \cdot Bx_{ML} + 679.17 \quad (2)$$

Para calcular los caudales de cada intervalo se han usado balances de materia en la cámara de calentamiento y los intervalos de tiempo.

Para calcular el caudal de descarga (\tilde{W}_{ML}) se asume que al final de la etapa de crecimiento la tacha está completamente llena de licor madre con el Brix deseado. Como el volumen de la tacha es un parámetro conocido (V_{pan}) y la densidad del licor madre ha sido calculada previamente, el caudal durante la etapa de descarga será el siguiente:

$$\tilde{W}_{ML} = \frac{V_{pan} \cdot d_{ML}(Bx_{ML})}{t_d} \quad (3)$$

El caudal de entrada de licor alcanza tres valores a lo largo de la producción de un lote. El primero, durante la etapa de carga ($\tilde{W}_{SL\ ca}$), es un valor constante y es un parámetro tecnológico. A continuación, durante la etapa de concentración el caudal es cero. Por último, el valor del caudal durante la etapa de crecimiento ($\tilde{W}_{SL\ cr}$), es calculado usando un balance sin agua:

$$\tilde{W}_{SL\ cr} = \frac{\left(\frac{Bx_{ML}}{Bx_{SL}}\right) \cdot V_{pan} \cdot d_{ML}(Bx_{ML}) - W_{SL\ ca} \cdot t_{ca}}{t_{cr}} \quad (4)$$

Por último, el caudal de demanda de vapor (\tilde{W}_{SD}) se supone constante a lo largo de las etapas de concentración y crecimiento y cero durante el resto del ciclo de producción. Dicho caudal el resultado de la multiplicación del caudal de agua evaporada por un coeficiente empírico (K_{st}), el agua evaporada se calcula usando un balance de agua.

$$\tilde{W}_{SD} = K_{st} \cdot \left(\frac{B_{xML}}{B_{xSL}} - 1 \right) \cdot V_{pan} \cdot \frac{d_{ML}(B_{xML})}{t_{co} + t_{cr}} \quad (5)$$

Resumiendo, el modelo de una tacha durante un lote completo es:

$$W_{SL}(t) = \begin{cases} 0 & 0 \leq t < t_e \\ \tilde{W}_{SL\ ca} & t_e \leq t < t_e + t_{ca} \\ 0 & t_e + t_{ca} \leq t < t_e + t_{ca} + t_{co} \\ \tilde{W}_{SL\ cr} & t_e + t_{ca} + t_{co} \leq t < t_e + t_{ca} + t_{co} + t_{cr} \\ 0 & t_e + t_{ca} + t_{co} + t_{cr} \leq t < t_e + t_{ca} + t_{co} + t_{cr} + t_d \end{cases}$$

$$W_{ML}(t) = \begin{cases} 0 & 0 \leq t < t_e + t_{ca} + t_{co} + t_{cr} \\ \tilde{W}_{ML} & t_e + t_{ca} + t_{co} + t_{cr} \leq t < t_e + t_{ca} + t_{co} + t_{cr} + t_d \end{cases}$$

$$W_{SD}(t) = \begin{cases} 0 & 0 \leq t < t_e + t_{ca} \\ \tilde{W}_{SD} & t_e + t_{ca} \leq t < t_e + t_{ca} + t_{co} + t_{cr} \\ 0 & t_e + t_{ca} + t_{co} + t_{cr} \leq t < t_e + t_{ca} + t_{co} + t_{cr} + t_d \end{cases}$$

Tanques de almacenamiento

Este subsistema hace referencia a los dos depósitos donde se almacena el licor estándar antes de entrar en las tachas (depósito 1) y el depósito que recoge el licor madre que sale de las tachas na vez completado el proceso (depósito 2).

Balance de materia realizado al depósito 1:

$$\frac{dm(t)}{dt} = \sum W(t) = W_{SLT}(t) - W_{SL1}(t) - W_{SL2}(t) - W_{SL3}(t) \quad (6)$$

Donde W_{SLT} es el caudal de licor estándar que llega al depósito de almacenaje número 1, mientras que los caudales W_{SLi} son los caudales que alimentan a las tres tachas.

Balance de materia realizado al depósito 2:

$$\frac{dm(t)}{dt} = \sum W(t) = W_{ML1}(t) + W_{ML2}(t) + W_{ML3}(t) - W_{salida}(t) \quad (7)$$

Donde W_{salida} es el caudal de licor estándar que sale del depósito de almacenaje número 2, mientras que los caudales W_{MLi} son los caudales de salida de las tres tachas una vez finalizado el proceso y que alimentan al depósito 2.

Para el proceso de control es necesario conocer el volumen total de materia que contienen los dos depósitos de almacenaje (V_{Di}). Una vez realizado el balance de materia y conocida la densidad del licor estándar o el licor madre según se trate del depósito 1 o del depósito 2 respectivamente el volumen calculado será:

$$V_{D1}(t) = \frac{m(t)}{d_{SL}(Bx_{SL})} \quad (8)$$

$$V_{D2}(t) = \frac{m(t)}{d_{ML}(Bx_{ML})} \quad (9)$$

Por último para obtener el nivel al que se encuentra cada depósito basta con dividir el volumen obtenido previamente entre el nivel máximo del depósito correspondiente.

$$N(t) = \frac{V_D(t)}{V_{max}} \cdot 100 \quad (10)$$

c) Parametrización

Los parámetros necesarios para el correcto modelado del sistema de estudio son los siguientes:

- Los tiempos de espera (t_e), carga (t_{ca}), concentración (t_{co}), descarga (t_d) y desfase (t_a).
- El coeficiente empírico K_{st}
- El volumen de la tacha V_{pan}
- El Brix deseado de la miel madre B_{xML}
- El set point para los niveles de los depósitos.

Como condiciones iniciales será preciso definir la cantidad de materia inicial que contienen los depósitos

d) Implementación

Se van a explicar los distintos subsistemas que se han creado para la realización de este modelo de nivel superior a nivel inferior.

Modelo Completo del sistema

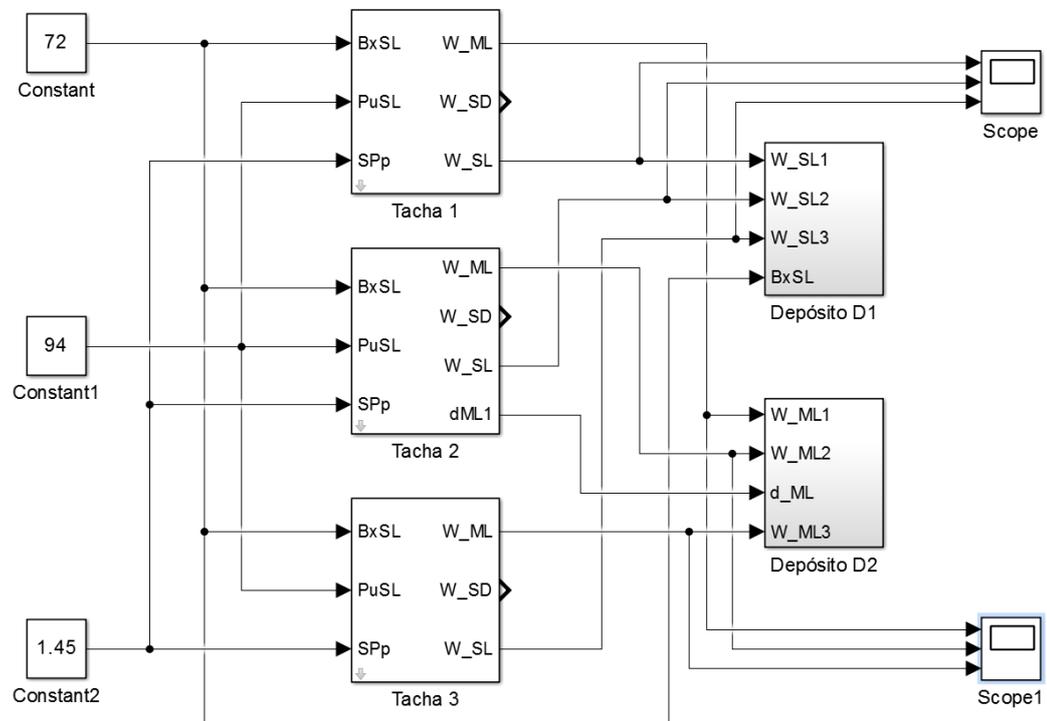


Ilustración 6 Modelo del sistema

En el nivel principal se encuentran los subsistemas correspondientes a las tres tachas de las que se compone el caso de estudio además de los dos depósitos.

Los tres bloques *Constant*, de la librería *Sources* permiten introducir las variables de entrada al sistema, el Brix y Pureza ($BxSL$, $PuSL$) del licor estándar y la presión de trabajo (SPp).

Tacha

El siguiente nivel a modelar es el que define el funcionamiento de la tacha. Para ello es necesario implementar las ecuaciones matemáticas, referidas a la tacha, expuestas en el capítulo anterior.

Como entradas al subsistema se tienen las condiciones a las que entra el licor estándar en la tacha: Brix y Pureza ($BxSL$, $PuSL$) y la presión de trabajo (SPp). Como salidas, el caudal de salida del licor madre (W_{ML}), el de entrada de licor estándar (W_{SL}) y el caudal de demanda de vapor (W_{SD}).

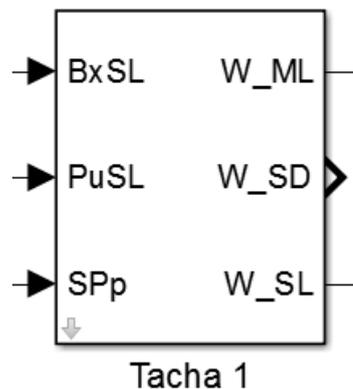


Ilustración 7 Subsistema de la tacha

Para la implementación serán usados los bloques *Gain*, *Product*, *Divide* y *Add* de la librería *Math Operations* y el bloque *Constant* de la librería *Sources*.

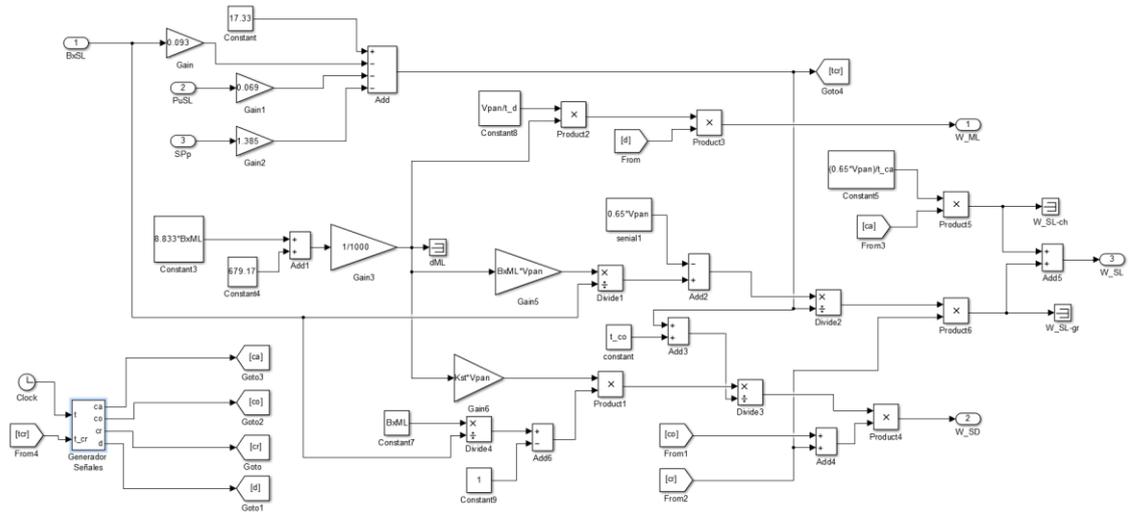


Ilustración 8 Algoritmo de la tacha

Para conseguir que el resultado de las ecuaciones esté presente solamente el tiempo en el que su etapa está activa se utilizan los bloques *From* y *Goto* de la librería *Signal Routing* para enviar la señal de activación a un bloque *Product* donde también se conectará la salida de la ecuación correspondiente.

Por último se ha creado una máscara donde se pueden modificar los tiempos de duración de las etapas, el Brix del licor madre deseado y el volumen de tacha.

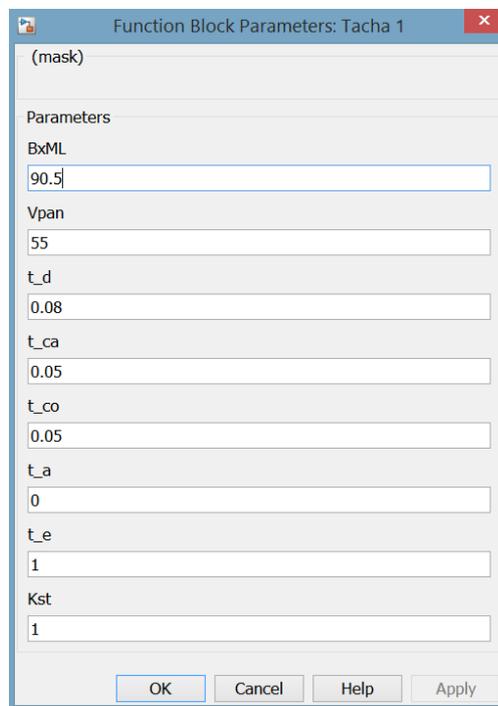


Ilustración 9 Máscara del subsistema Tacha

Generador de las señales de control

En el nivel inferior se encuentra un subsistema capaz de generar las señales de activación de las distintas etapas del proceso durante el periodo de tiempo deseado.

Para ello se recurre al bloque *Chart*, de la librería *Stateflow*, el cual permite crear una serie de estados, donde se definen variables de salida e internas y lo que ocurre con estas cuando se encuentran en un estado concreto. También permite definir las condiciones de transición entre estados.

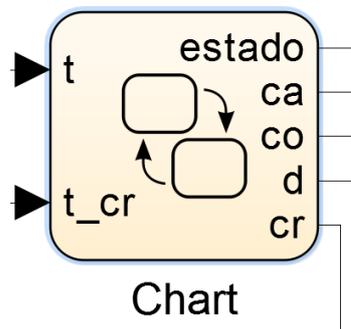


Ilustración 10 Bloque Chart

Para el sistema de estudio ha sido necesario definir dos entradas, tiempo actual de simulación (t) y tiempo de la etapa de crecimiento (t_{cr}), el cual se calcula en una etapa posterior. Las salidas corresponden a las señales de activación de las distintas etapas, su valor es 1 durante el periodo en el que la etapa está en estado activo y 0 el resto del ciclo. Como variables internas se ha creado una variable, denominada *tactual*, donde se almacena cada vez que se accede a un estado el tiempo actual de simulación. Las variables t_i corresponden a los distintos tiempos de activación de las etapas y al tiempo de desfase entre tachas (t_a).

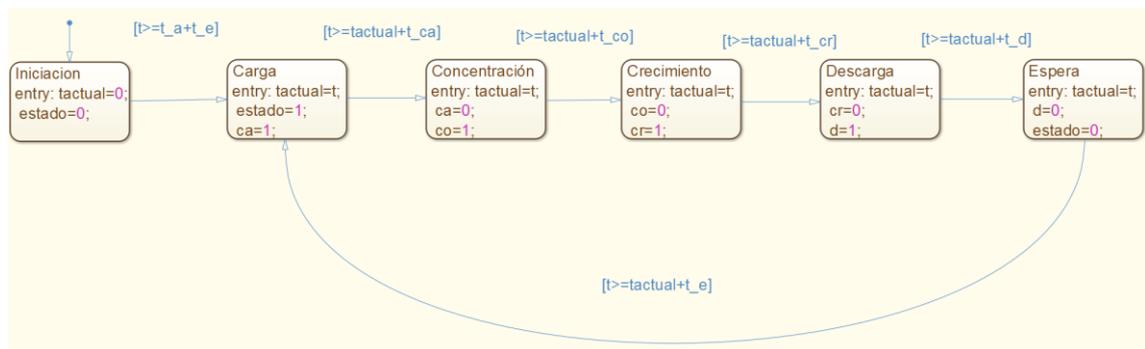


Ilustración 11 Algoritmo del generador de señales

Para el correcto funcionamiento de la simulación es necesario ajustar el parámetro *Sample time* que encontramos en la ventana de *Block Parameters*. De no ajustar este parámetro los cambios de estado no se producirán en los tiempos esperados y los resultados de la simulación no serán correctos.

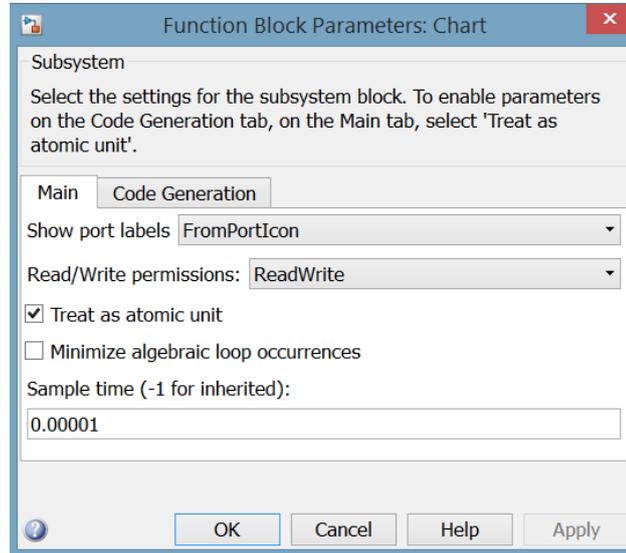


Ilustración 12 Block Parameters Chart

Depósitos

Una vez definido el modelo de la tacha hay que definir los modelos de los dos depósitos de almacenamiento. Igual que se ha procedido anteriormente se crea un nuevo subsistema el cual contiene las ecuaciones que rigen el funcionamiento de los depósitos además de un subsistema que contendrá todo el algoritmo de control del nivel del depósito.

Depósito 1:

Este depósito es el que alimenta a las tachas con el licor estándar, por lo tanto las entradas del subsistema serán los tres caudales de licor estándar (W_{SL}) y el brix de este ($BxSL$), que nos servirá para calcular el nivel del depósito.

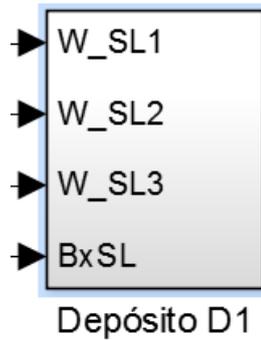


Ilustración 13: Subsistema del depósito 1

En este caso se calcula la densidad dentro del bloque ya que no ha sido calculada previamente.

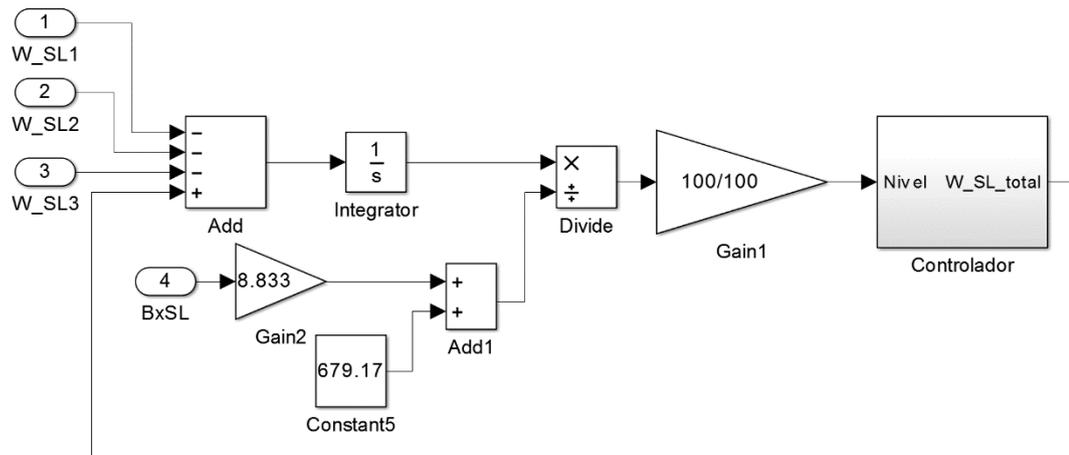


Ilustración 14: Algoritmo del depósito 1

Dentro de las especificaciones del bloque *Integrator* se debe considerar el volumen inicial de licor estándar que contiene el depósito y apuntarlo en el apartado *Initial Condition*.

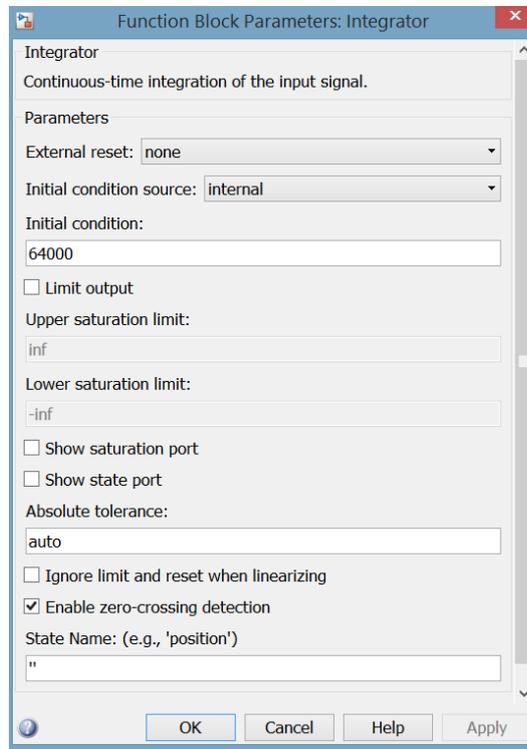


Ilustración 15: Block Parameters: Integrator

Depósito 2:

Depósito que almacena el licor madre producido por las tres tachas. Las entradas a este subsistema son los caudales de licor madre (W_{ML}) y la densidad de dicho licor (d_{ML}) que *proviene* de una de las tachas ya que la densidad no varía entre tachas.

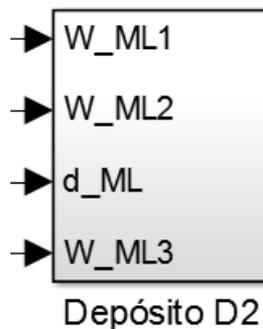


Ilustración 16: Subsistema del depósito 2

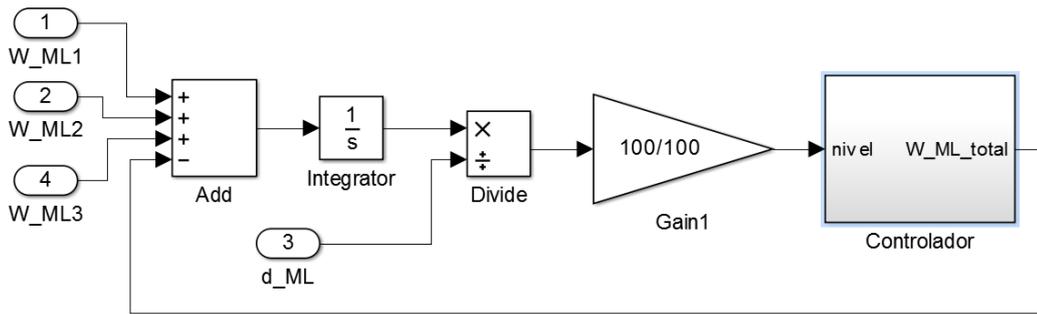


Ilustración 17: Algoritmo del depósito 2

Al igual que en el depósito 1, es necesario definir el volumen inicial de licor madre que contiene el depósito.

Controlador

El último bloque es el controlador del nivel de los depósitos. Su misión es mantener el nivel de los depósitos en uno preestablecido. Para ello, la única entrada que precisa es el nivel actual del depósito. La salida que genera es el caudal necesario para mantener el nivel, dicho caudal será de entrada en el caso del depósito 1 y de salida en el caso del 2.

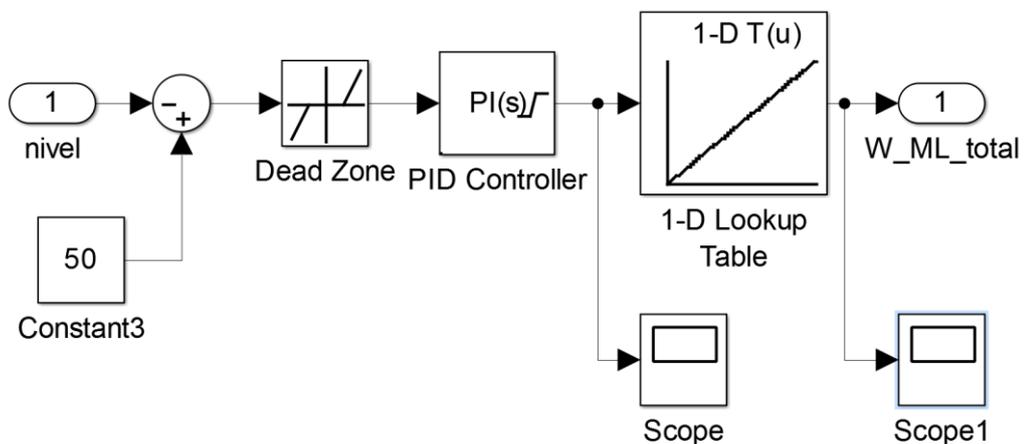


Ilustración 18 Controlador del nivel

El bloque más importante de este subsistema es el bloque *PID Controller* de la librería *Simulink-Continuous*. La función del PID es calcular el porcentaje de apertura de una válvula que controla el caudal que entra o sale de los depósitos.

El bloque *PID Controller* ofrece una gran variedad de posibilidades. Podemos seleccionar el tipo de controlador en el desplegable *Controller* (PID, PI, PD, P o I) y el algoritmo de implementación con el desplegable *Form* (Ideal o Paralelo). También se puede elegir el dominio del tiempo en el que queremos trabajar, continuo o discreto, en el apartado *Time domain*. En caso de elegir el dominio discreto debemos decidir el método de integración en *Integrator method* de la sección *Discrete-time settings*. Podemos elegir entre el método de adelanto, atraso o trapezoidal.

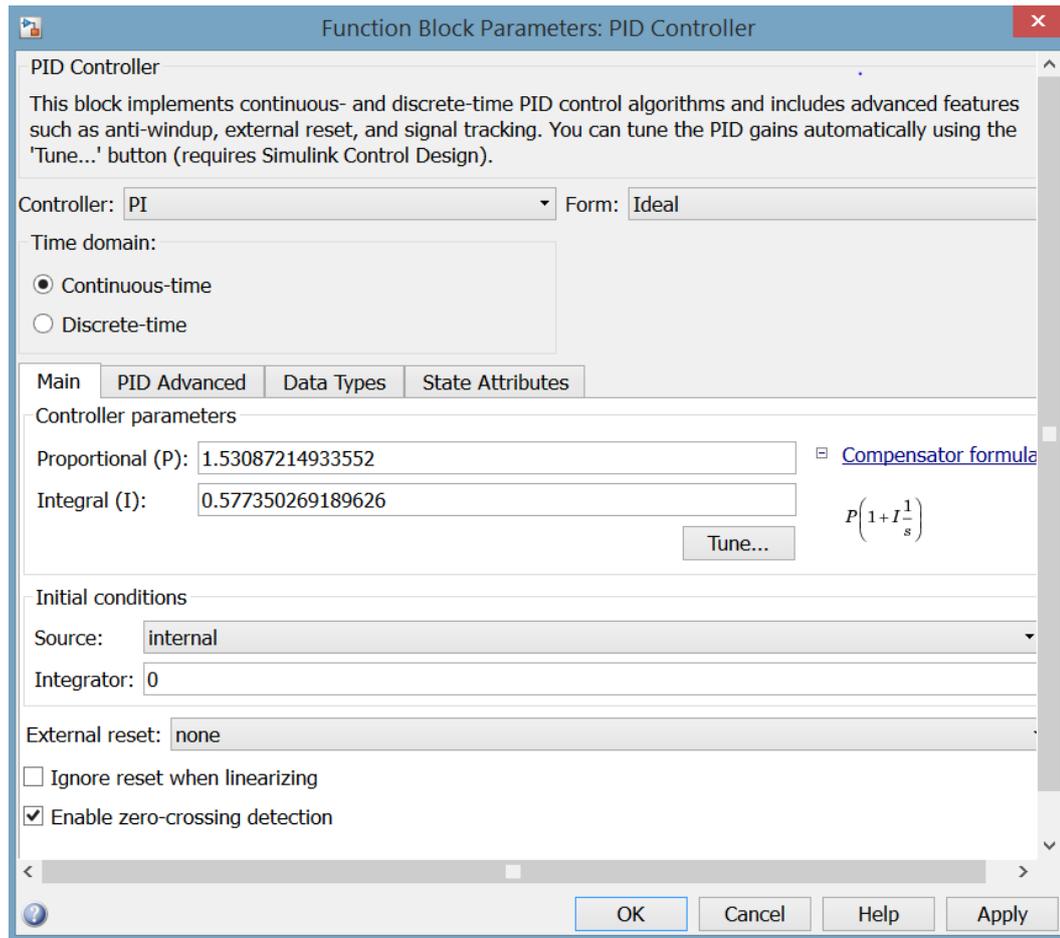


Ilustración 19 Parameters: PID Controller

Este bloque ofrece una herramienta muy útil para poder sintonizar nuestro PID de una forma sencilla e intuitiva. Con el botón *Tune* se accede a la ventana de la Ilustración 13. En ella se puede observar como aparecen dos gráficas que corresponden a la respuesta del PID actual (trazo discontinuo) y la respuesta que se conseguiría modificando alguno de los parámetros (trazo continuo). En la parte superior central se encuentran dos barras que permiten modificar el tiempo de respuesta y el transitorio. En la parte inferior derecha aparecen los valores que tendrían los parámetros del PID.

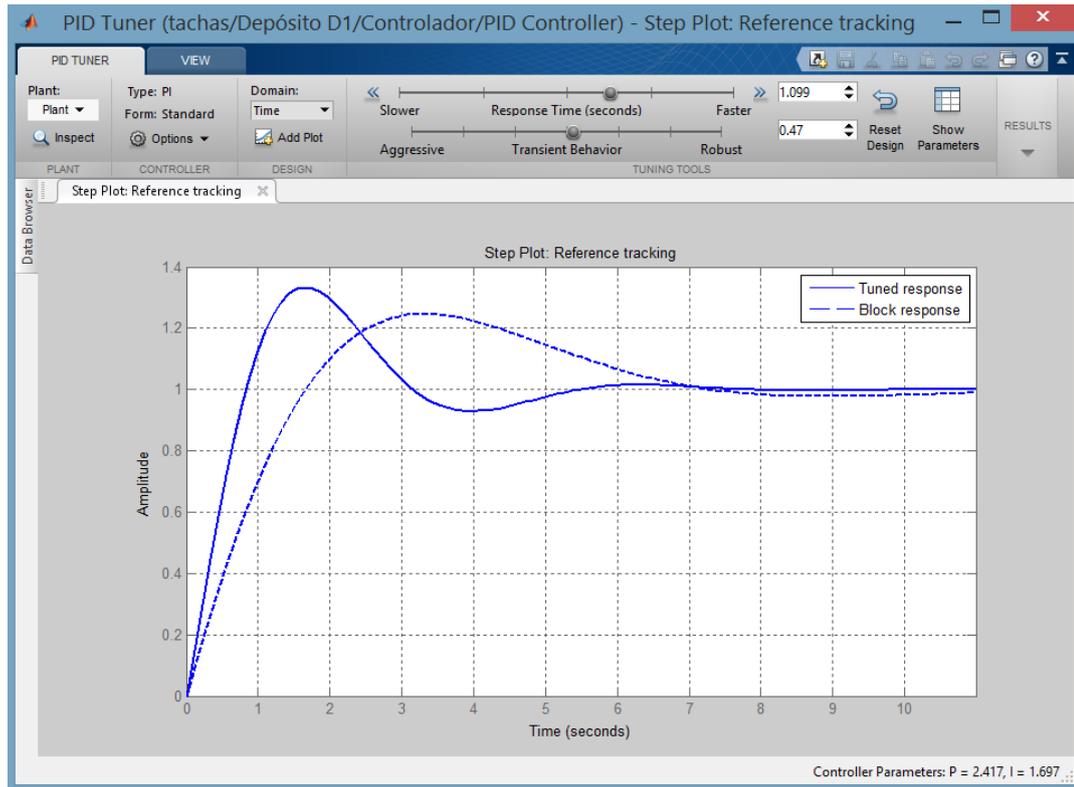


Ilustración 20 Sintonizador del PID

Cabe destacar la fórmula matemática que rige el comportamiento del controlador que se encuentra en la parte derecha de la ventana. Esta ecuación cambia según cambiamos alguno de los parámetros descritos anteriormente. Para entender estos cambios vamos a comparar la ecuación aprendida durante el transcurso del grado.

La ecuación que rige el funcionamiento de un PID en el dominio del tiempo es la siguiente:

$$u(t) = k_p \cdot e(t) + \frac{k_p}{T_i} \cdot \int e(t) \cdot dt + k_p \cdot T_d \cdot \frac{de(t)}{dt}$$

Transformando al dominio de Laplace:

$$U(S) = k_p \cdot E(S) + \frac{k_p}{T_i} \cdot \frac{E(S)}{S} + k_p \cdot T_d \cdot S \cdot E(S) \rightarrow$$

$$U(S) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_i} \cdot \frac{1}{S} + T_d \cdot S \right) \cdot E(S)$$

Ahora se elimina el término derivativo ya que en el caso de estudio nos encontramos ante un PI:

$$U(S) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_i} \cdot \frac{1}{S} \right) \cdot E(S)$$

Comparando con la ecuación que proporciona Simulink:

$$P \left(1 + I \cdot \frac{1}{S} \right)$$

Podemos observar que:

$$k_p = P$$

$$\frac{1}{T_i} = I$$

Cuando nos encontramos ante el tiempo discreto el programa utiliza las siguientes transformadas:

$$\text{Backward} \rightarrow S = \frac{z-1}{T_s z}$$

$$\text{Forward} \rightarrow S = \frac{z-1}{T_s}$$

Siguiendo con el análisis de *Block Parameters*, al acceder a la pestaña *PID Advanced* se observan tres apartados:

El primero es *Output saturation* que permite limitar la salida del controlador entre unos valores preestablecidos.

El segundo es *Anti-windup method* que permite seleccionar entre dos métodos para evitar la saturación integral.

La saturación integral (Integrator windup) es un problema que se presenta cuando disponemos de un controlador con acción integral y un actuador con saturación. Cuando la señal de control es tan grande que lleva al actuador a la saturación este permanecerá en dicho estado incluso si la señal de salida del proceso cambia. Esto provocará la ruptura del lazo de realimentación haciendo el sistema inestable. La integral adquirirá un valor muy grande, por este motivo, cuando el error cambie de signo, la integral tendrá un valor tan grande que tardará mucho tiempo en alcanzar valores normales.

El último apartado es *Tracking mode*, habilitando este campo se consigue el efecto llamado bumpless transfer (transferencia sin sacudidas). Con esto se evitan saltos en la señal de control cuando se cambia el modo de operación (manual o automático), cambian los parámetros del sistema o cambia el controlador.

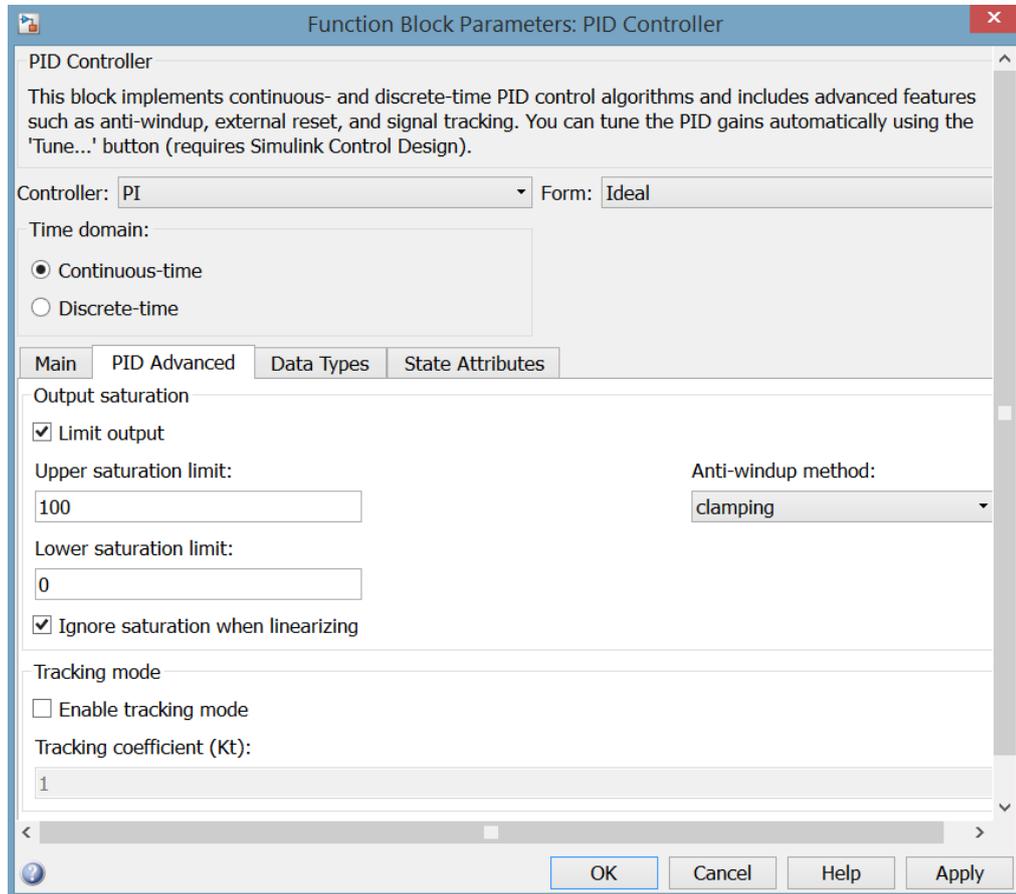


Ilustración 21 Block Parameters: PID Controller 2

Con el bloque *1-D Lookup Table* de la librería *Lookup Tables* se consigue relacionar el porcentaje de apertura de la válvula con el caudal que correspondiente a dicha apertura.

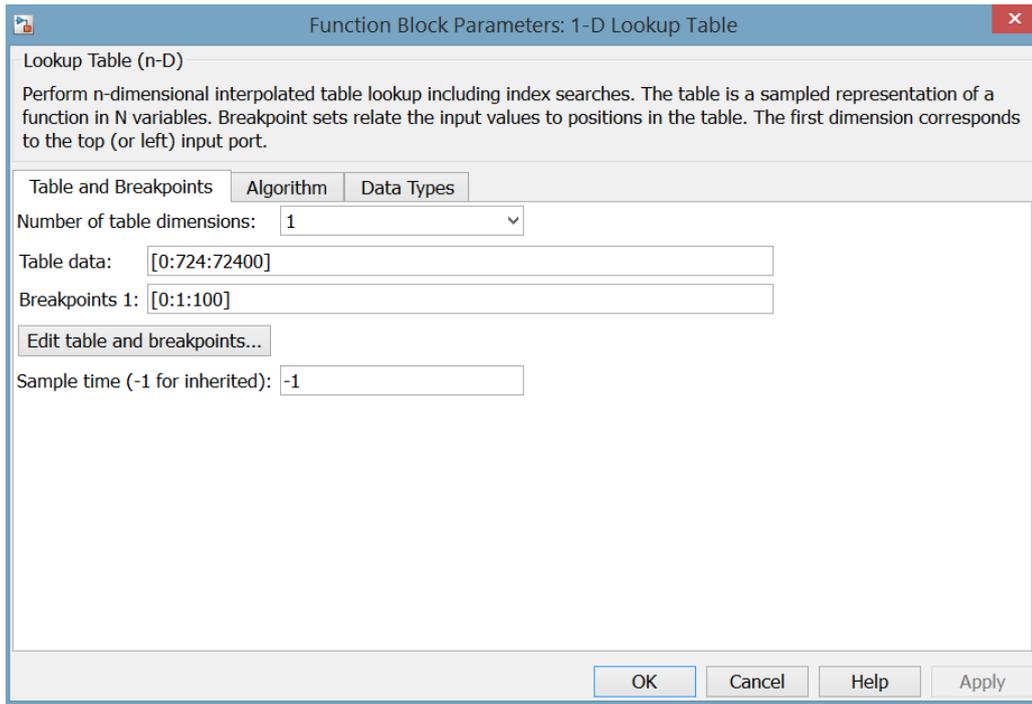


Ilustración 22 Block Parameters: 1-D Lookup Table

Por último, el bloque *Dead Zone*, de la librería *Discontinuities*, permite crear una banda muerta, lo que permite limitar acción del controlador.

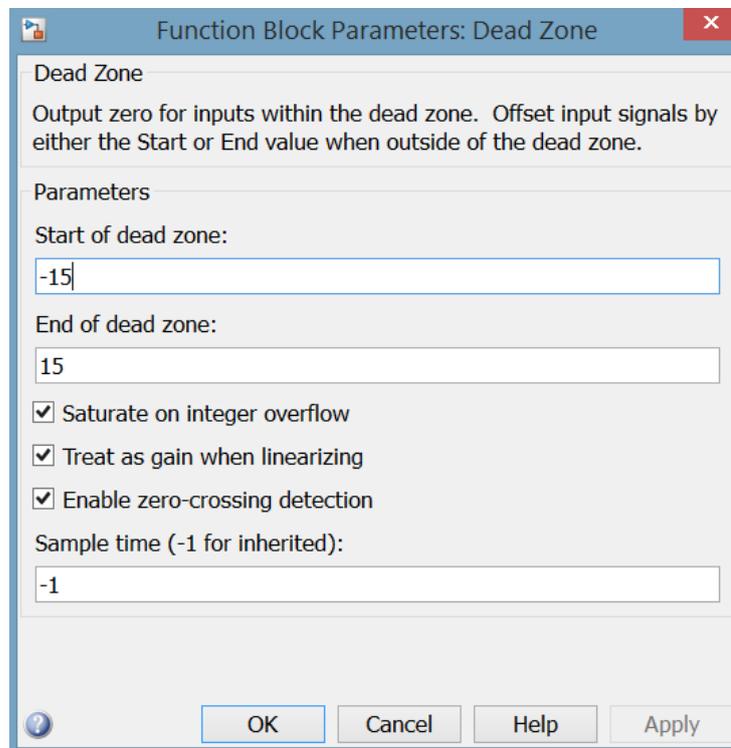


Ilustración 23 Block Parameters: Dead Zone

e) Pruebas y Validación

El primer paso para validar nuestro modelo es comprobar los perfiles de los caudales de demanda y salida de producto, así como el de las necesidades de vapor. Para ello las primeras pruebas se realizarán únicamente sobre el modelo de una única tacha.

Para ello vamos a recurrir al modelo de la tacha. Las validaciones se han obtenido con los siguientes parámetros: $Bx_{SL}=72$; $Pu_{SL}=94$; $SPp=1.45$

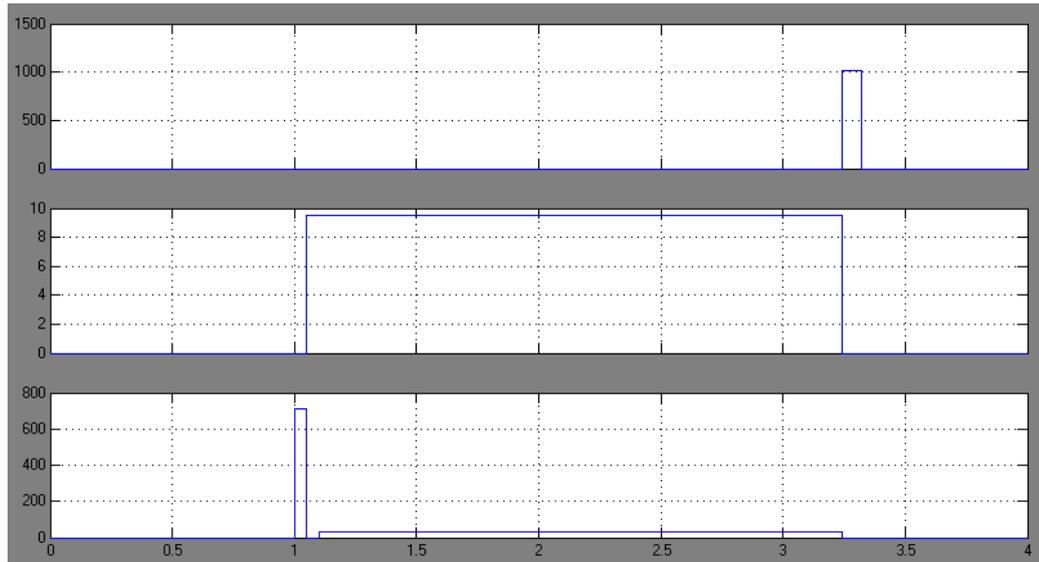


Ilustración 24 W_{ML} ; W_{SD} ; W_{SL}

Al compararlos con los perfiles simplificados mostrados en la *Ilustración 5* aseguramos el correcto funcionamiento de esta parte del cristalizador.

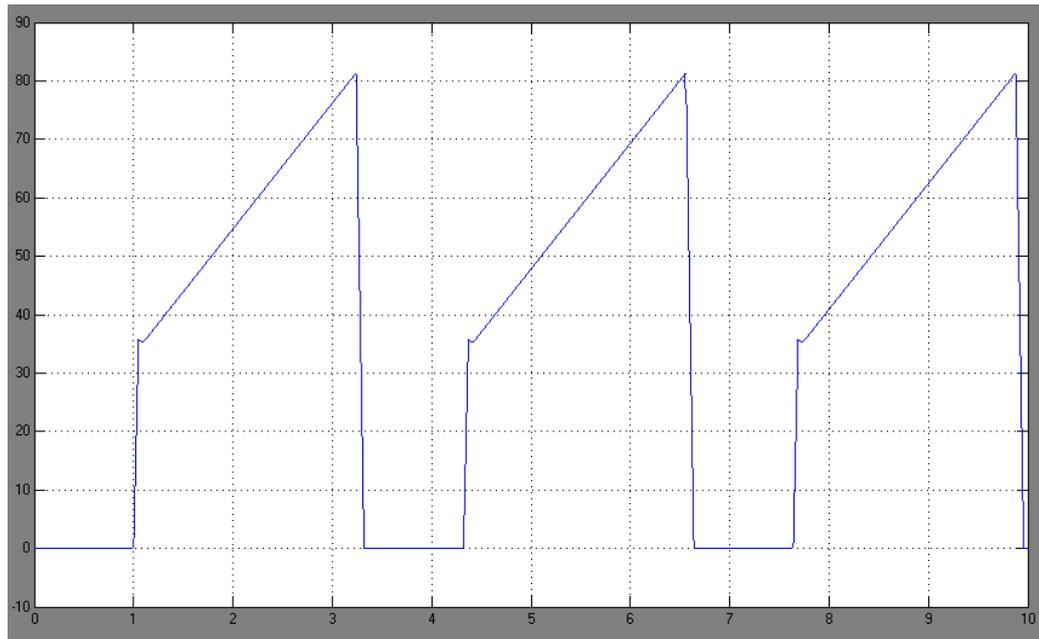


Ilustración 25 Balance másico de la tacha

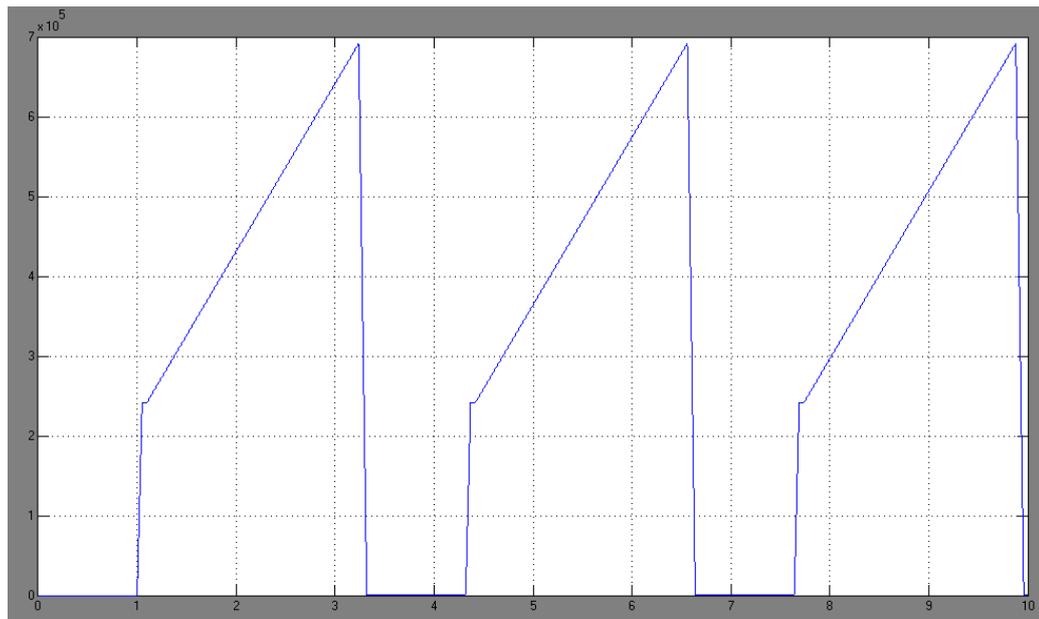


Ilustración 26 Azúcar total dentro de la tacha

En la *Ilustración 25* se observa el balance másico que se realiza a la tacha, muestra la cantidad de materia que se encuentra dentro de la tacha a lo largo del tiempo. En un ciclo de trabajo, durante la primera etapa, se llena hasta cierto nivel, luego, la materia dentro de la tacha aumenta progresivamente hasta su llenado total y una vez llena se vacía completamente. Al final de cada ciclo se puede ver como efectivamente no queda materia acumulada que indicase un mal funcionamiento.

La *Ilustración 26* muestra la cantidad de azúcar dentro del sistema y la su evolución evoluciona de igual forma que el balance de materia.

Resultados

A continuación se realizan una serie de comprobaciones donde irán variando los parámetros de entrada y se observará la variación del tiempo que el proceso está activo. Para comprobar dicha variación basta con observar el tiempo de crecimiento ya que los demás tiempos son fijos.

La primera de las comprobaciones es variar la presión de vapor $\pm 10\%$. Es de esperar que al aumentar la presión las condiciones de trabajo son más favorables y por la tanto se conseguirá una reducción del tiempo de ciclo.

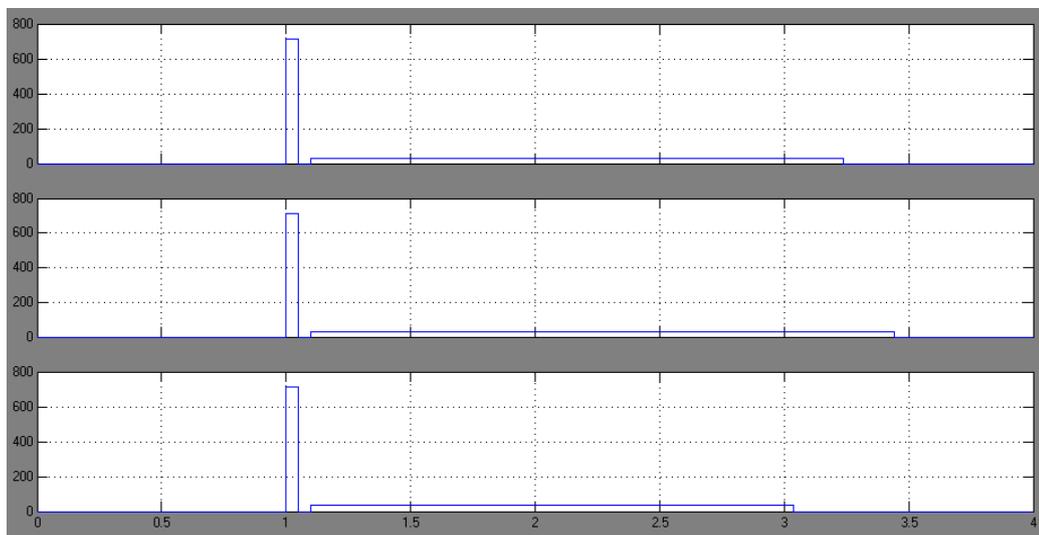


Ilustración 27 Variación de la presión (Normal; -10%; +10%)

En la *Ilustración 27* se observan los caudales de entrada de licor estándar que se obtienen con distintas presiones de trabajo. Al trabajar con más presión el proceso se acelera como muestra la gráfica inferior, que es la obtenida a una presión mayor.

La siguiente comprobación es variar el Brix del licor estándar. Cuanto mayor es el Brix, más partículas de sólido tenemos en la disolución por lo tanto se tardará menos tiempo en llegar al Brix deseado. Lo mismo pasa con la pureza.

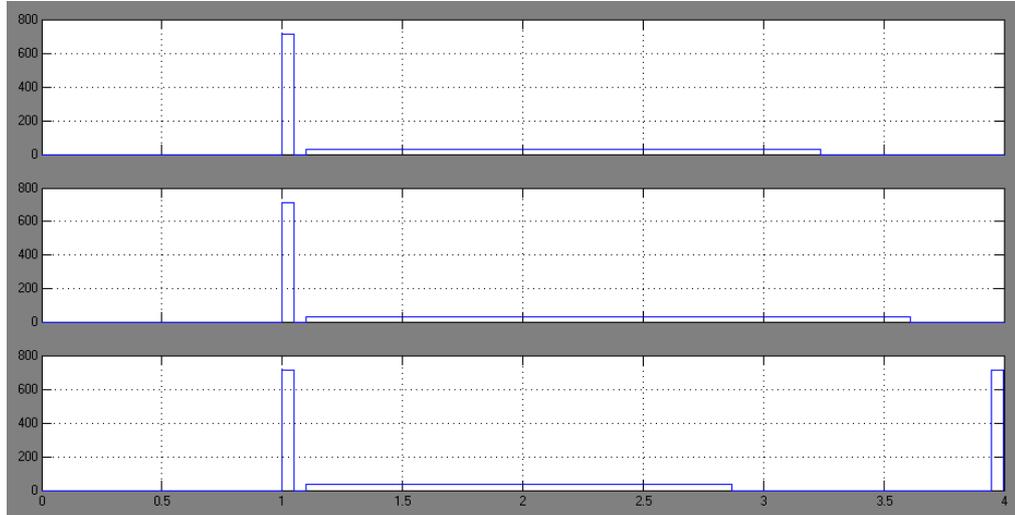


Ilustración 28 Variación del Brix (Normal, 68, 76)

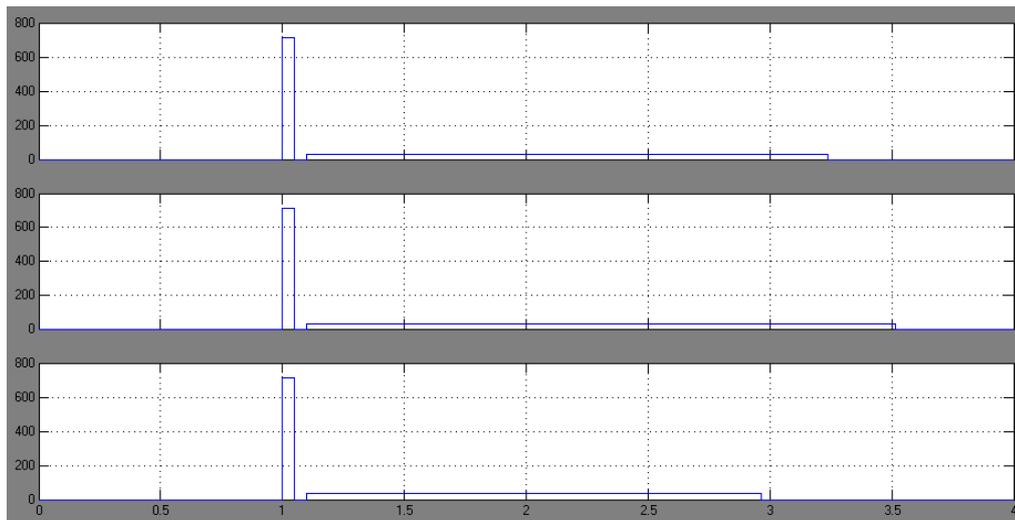


Ilustración 29 Variación de la pureza (Normal, 90, 98)

El próximo paso es realizar las pruebas sobre el modelo completo y comprobar los niveles de los depósitos.

Lo más importante es conseguir un perfecto desfase las tres tachas. Para conseguirlo las tachas dos y tres empezaran sus ciclos de trabaja a $1/3$ y $2/3$ del tiempo total de un ciclo respectivamente.

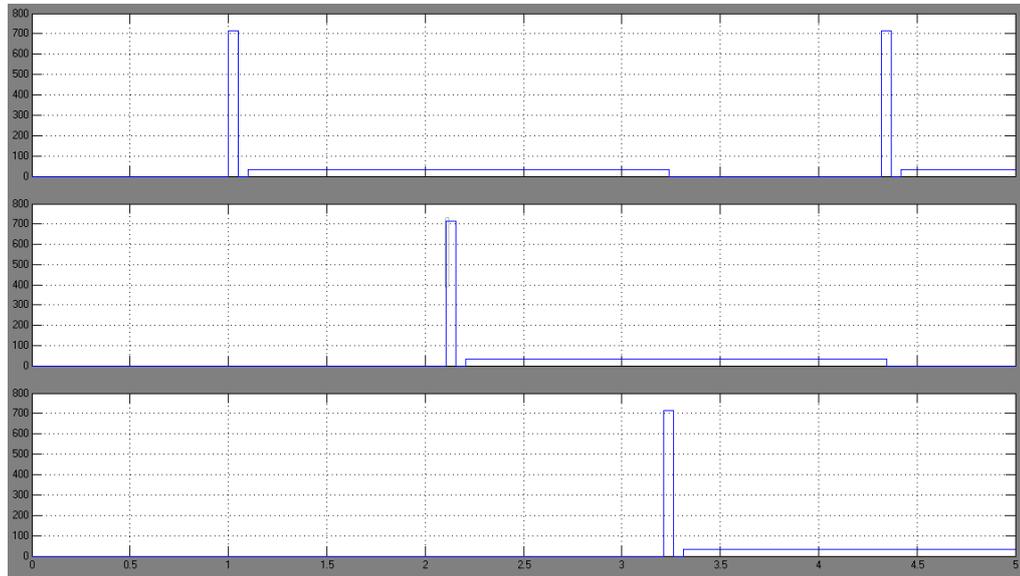


Ilustración 30 Tachas espaciadas correctamente

En la *Ilustración 30* se muestran los caudales de salida de miel madre de las tres tachas y como la distancia entre ciclos es siempre la misma.

La *Ilustración 31* muestra como el nivel del depósito se mantiene muy estable a lo largo del tiempo. En cambio en el depósito 2 (*Ilustración 32*) se observa una caída constante del nivel hasta que se produce la primera descarga de licor madre produciendo un pico importante pero que se mantiene dentro de los márgenes permitidos, no desborda. En el estado estacionario vemos como se repite continuamente un patrón homogéneo, definido que coincide con las descargas de materia que se producen al finalizar un ciclo.

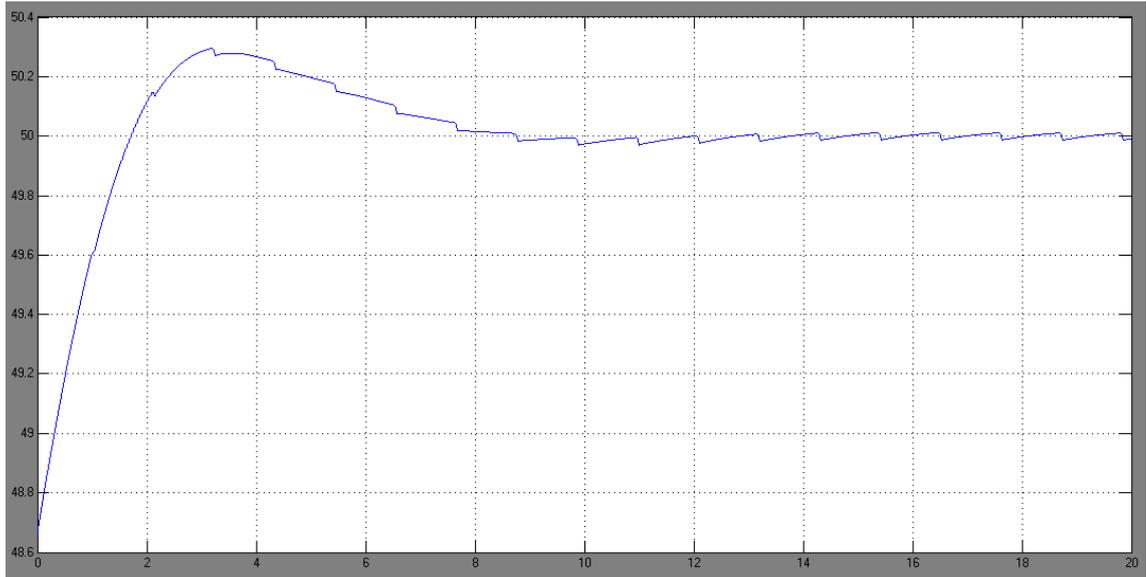


Ilustración 31 Nivel del depósito 1

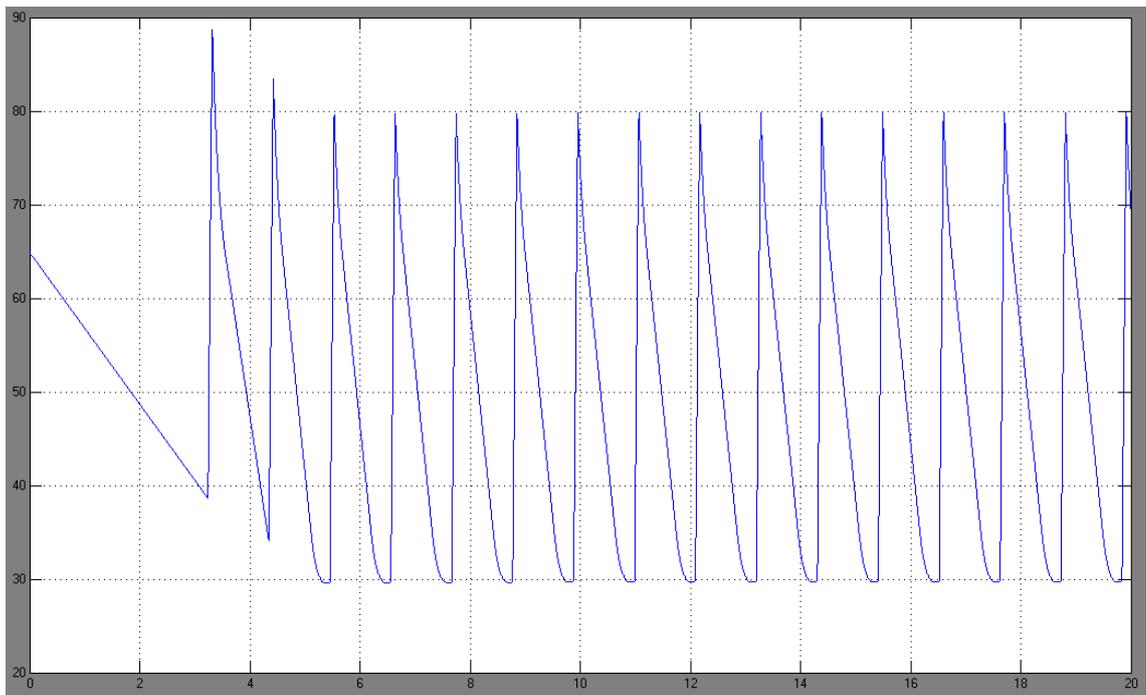


Ilustración 32 Nivel de depósito 2

Sabiendo cómo se comporta el sistema ante una sincronización perfecta, es momento de observar lo que ocurre cuando dicha sincronización se altera.

En primer lugar la tacha número 2 estará desfasada $1/5$ del tiempo total y número 3 $4/5$.



Ilustración 33 Desfase de las tachas

El depósito que almacena el licor estándar (*Ilustración 34*) no ha sufrido gran variación respecto al caso anterior. En cambio el depósito que recibe la miel madre (*Ilustración 35*), nos encontramos con un pico mayor tras la primera descarga, la variación del nivel ya no es homogénea. Aunque sigue existiendo un patrón este presenta un desarrollo mucho más brusco que en el caso anterior. Atendiendo a la señal de control (*Ilustración 36*) sería deseable que esta fuese más continua, que se estabilizase alrededor de un valor y evitase el cierre completo de la válvula.

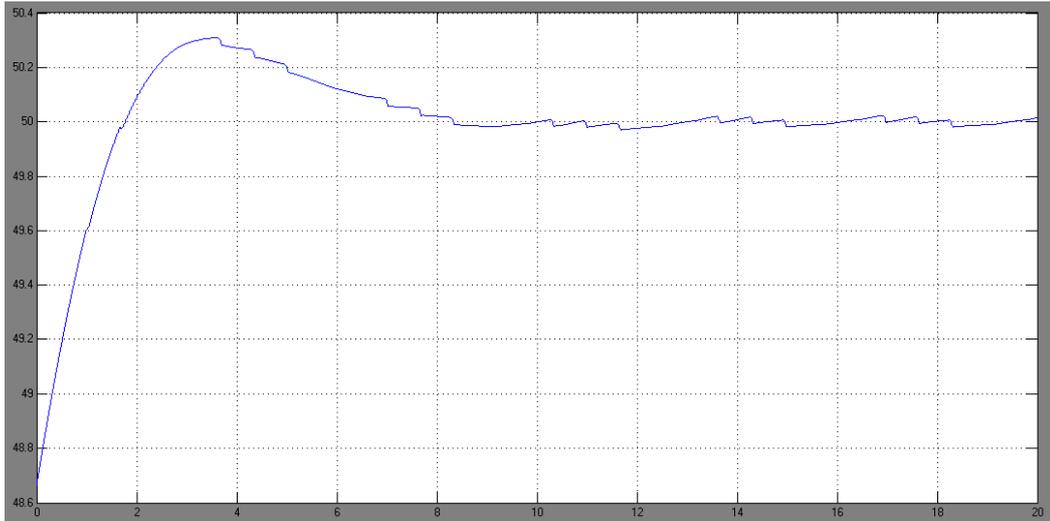


Ilustración 34 Nivel del depósito 1

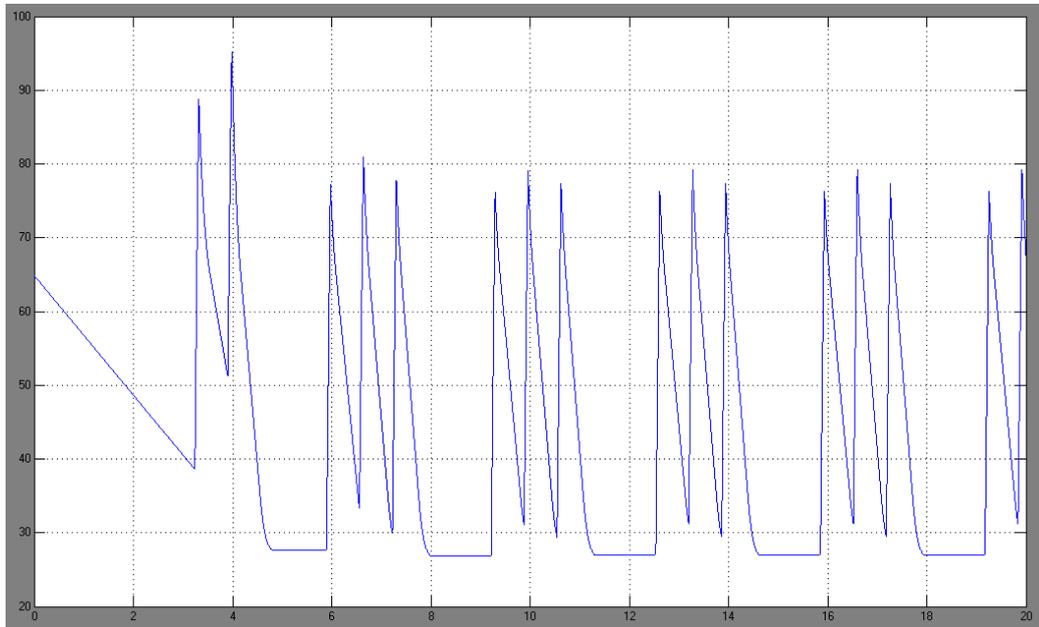


Ilustración 35 Nivel del depósito 2

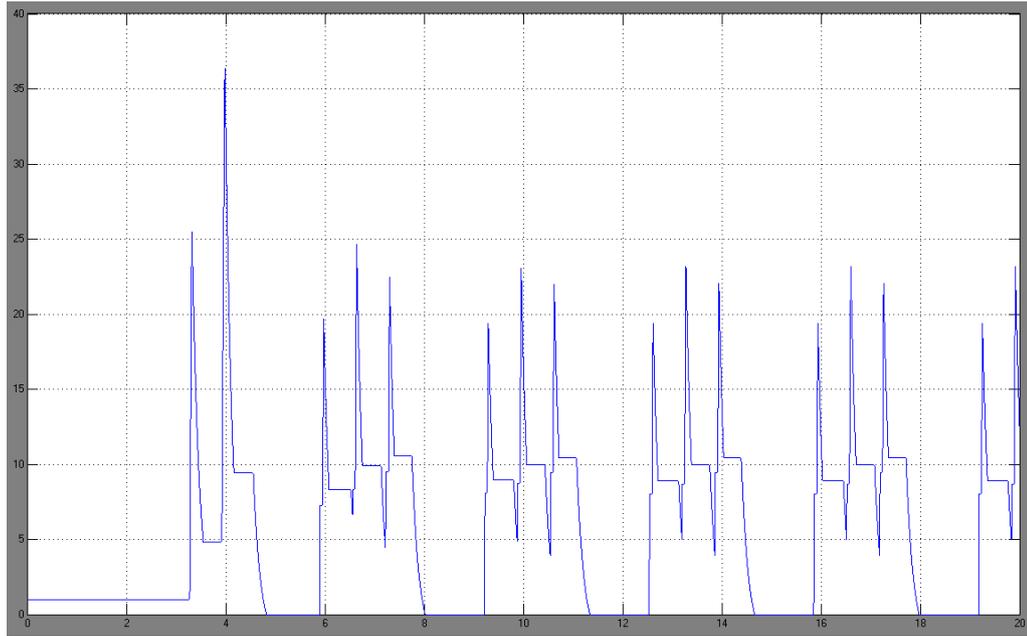


Ilustración 36 Señal de control del depósito 2

Para finalizar las tachas estarán desfasadas $1/4$ y $3/4$ del tiempo total.



Ilustración 37 Desfase de las tachas

La variación de los niveles de los depósitos es muy parecida al caso anterior, en el caso del depósito 2 observamos un sobrepico inferior. La señal de control sigue son contar con las características deseadas a pesar de que el sistema de control consigue hacer frente a las descargas de materia.

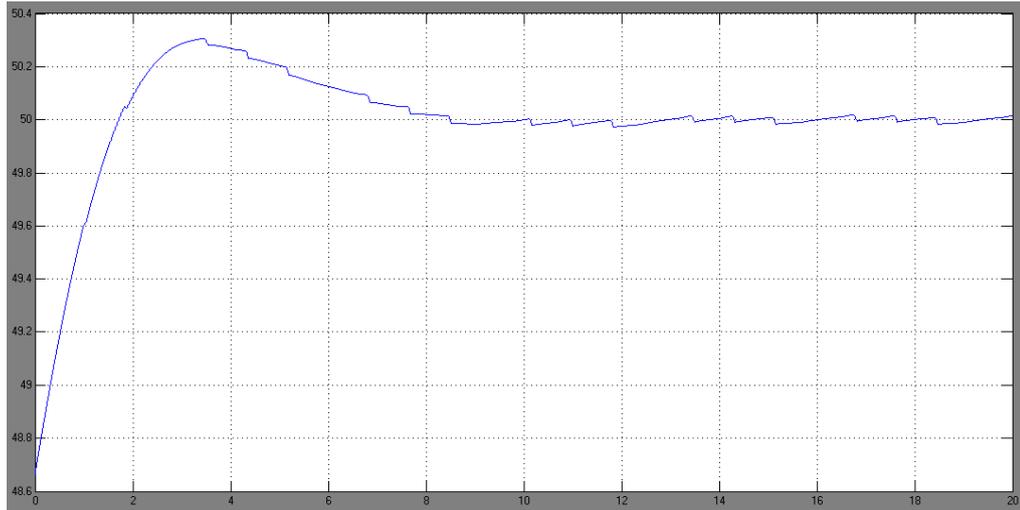


Ilustración 38 Nivel de depósito 1

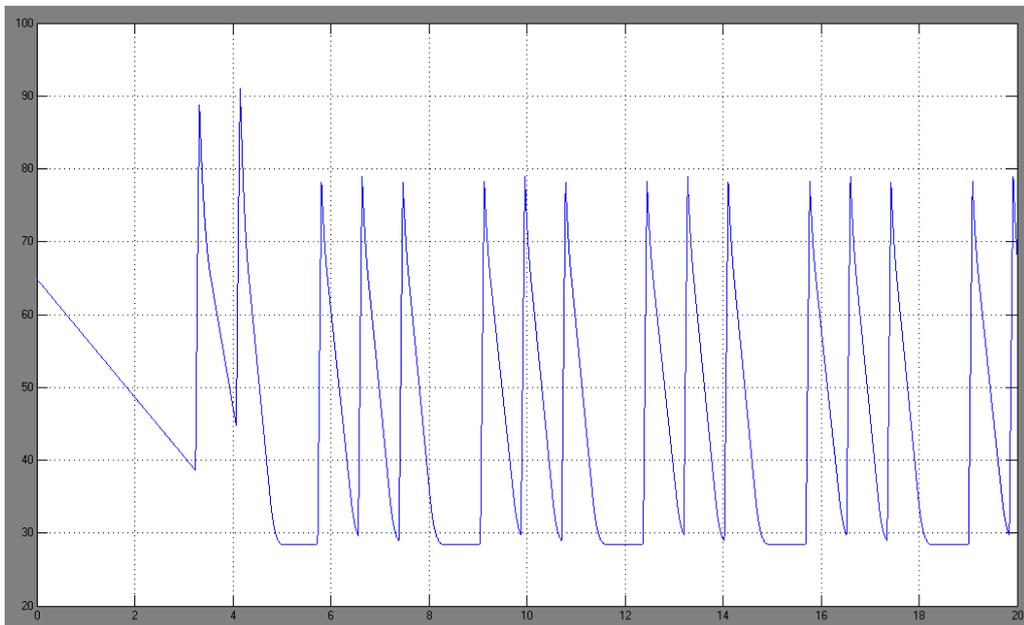


Ilustración 39 Nivel del depósito 2

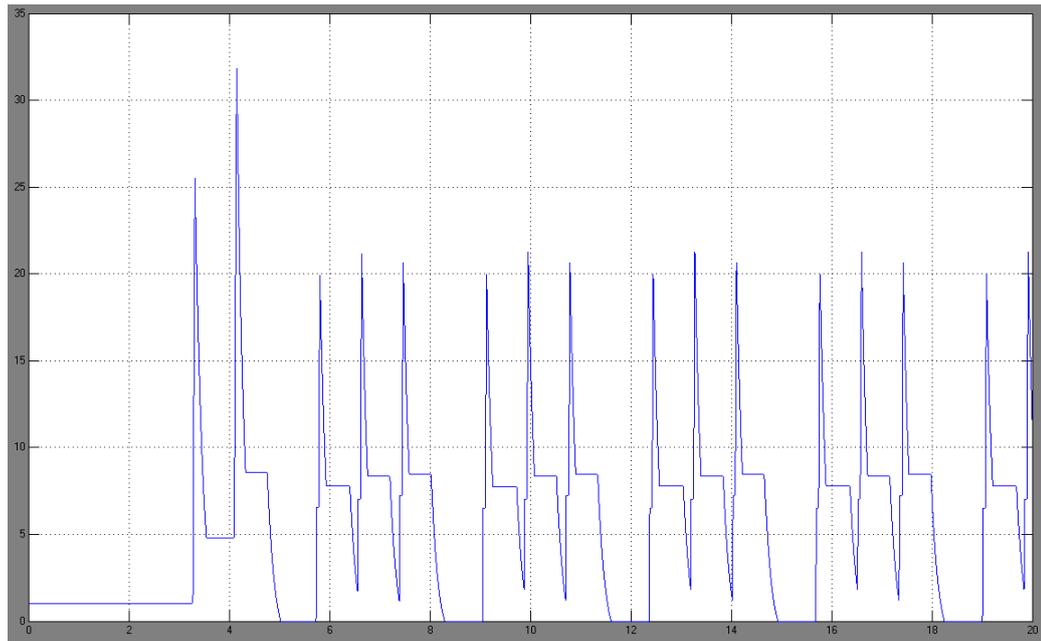


Ilustración 40 Señal de control de depósito 2



5. CONCLUSIONES

- Se ha implementado en SIMULINK un modelo reducido de un cristalizador discontinuo o por lotes para la producción de azúcar. Dicha implementación ha requerido el estudio previo de dicha unidad de proceso y del modelo matemático desarrollado a tal efecto. El modelo centra su atención en los caudales de producto y en las demandas de vapor y permite la parametrización sencilla de los tiempos de cada etapa del ciclo.
- Para la implementación del modelo del cristalizador se ha estudiado y usado la librería STATE-FLOW de SIMULINK.
- El modelo del cristalizador se ha usado para construir el modelo completo de la primera etapa de la sección de cristalización de una factoría azucarera genérica. Los modelos han sido validados de forma cualitativa, pero garantizando de forma cuantitativa el cumplimiento de los balances de materia.
- El simulador del proceso completo está disponible para ser usado como predictor de un algoritmo de control para determinar la planificación del funcionamiento del sistema completo seleccionando los tiempos de espera entre cada ciclo completo de cada cristalizador.





6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] L.F. Acebes, Apuntes de la asignatura Modelado y Simulación de Sistemas, Universidad de Valladolid
- [2] <https://itcl.es/blog/para-que-sirven-los-sistemas-de-simulacion/>
- [3] <https://studylib.es/doc/899376/4.1-lenguajes-de-simulacion>
- [4] <http://www.isa.cie.uva.es/~felipe/docencia/so4inf/tema4.pdf>
- [5] file:///D:/Descargas/Apuntes_de_Simulink.pdf
- [6] https://ocw.upc.edu/sites/all/modules/ocw/estadistiques/download.php?file=51427/2011/1/54513/tema_5_simulink-5156.pdf
- [7] L.F. Acebes, Model based online scheduling of concurrent and equal batch process units: Sugar End industrial case study, Journal of Process Control 80 (2019)
- [8] A. Rodríguez, L.F. Acebes, C. de Prada, Modelado y simulación de la unidad de cristalización de la industria azucarera con EcoSimPro.