

**SIMULACIÓN Y MODELADO MATEMÁTICO DE EVAPORADORES DE  
MÚLTIPLE EFECTO**

**SERGIO ANDRÉS ARDILA PARRA  
MIGUEL ANGEL PADILLA TOLOZA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA**

**2014**

**SIMULACIÓN Y MODELADO MATEMÁTICO DE EVAPORADORES DE  
MÚLTIPLE EFECTO**

**SERGIO ANDRÉS ARDILA PARRA**

**MIGUEL ANGEL PADILLA TOLOZA**

**Trabajo de grado para optar el título de  
Ingeniero Mecánico**

**Director**

**JOSÉ IVÁN HURTADO HIDALGO**

**Ingeniero Mecánico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA**

**2014**

## CONTENIDO

	Pág.
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>15</b>
<b>1. EVAPORADORES .....</b>	<b>16</b>
1.1 TIPOS DE EVAPORADORES .....	16
1.1.1 Marmita abierta o artesa .....	17
1.1.2 Evaporador de tubos horizontales con circulación natural .....	17
1.1.3 Evaporador de tubos verticales con circulación natural .....	18
1.1.4 Evaporador de tubos verticales largos .....	19
1.2 EVAPORADOR DE MÚLTIPLE EFECTO.....	20
1.2.1 Componentes de un múltiple efecto.....	21
1.2.2 Circulación del jugo.....	23
<b>2. PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DEL JUGO DE CAÑA DE AZUCAR .....</b>	<b>27</b>
2.1 DENSIDAD DEL JUGO .....	27
2.2 CAPACIDAD CALORÍFICA.....	28
2.3 ELEVACIÓN DEL PUNTO DE EBULLICIÓN (EPE) .....	28
<b>3. MODELO MATEMÁTICO .....</b>	<b>29</b>
3.1 BALANCE DE ENERGÍA .....	29
3.2 BALANCE DE MASA .....	31
3.3 BALANCE DE CONCENTRACIÓN.....	32
3.4 ECUACIÓN DE ESTADO PARA EL VAPOR.....	33
3.5 SALIDA DE JUGO .....	33
<b>4. SIMULACIÓN EN <i>SIMULINK</i>.....</b>	<b>35</b>
4.1 DIAGRAMA DE BLOQUES.....	35

4.1.2 Evaporador .....	41
<b>5. INTERFAZ GUIDE.....</b>	<b>66</b>
5.1 MENÚ DE LA INTERFAZ.....	66
5.1.1 Archivo .....	67
5.1.2 Emergencia.....	68
5.2 PANELES .....	69
5.2.1 Panel de entradas.....	72
5.2.2 Panel de simulación.....	74
5.2.3 Panel de tiempo de simulación .....	76
5.2.4 Panel de estado .....	77
5.2.5 Panel de resultados .....	78
<b>6. CONTROL .....</b>	<b>87</b>
6.1 CONTROL <i>FUZZY</i> .....	87
6.2 IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROL <i>FUZZY</i> EN EL MODELO.....	88
<b>7. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>	<b>94</b>
7.1 RESULTADOS SIN PERTURBACIÓN .....	95
7.2 PERTURBACIÓN EN LA CONCENTRACIÓN INICIAL .....	98
7.3 PERTURBACIÓN EN LA TEMPERATURA INICIAL.....	103
7.4 PERTURBACIÓN EN LA MASA DE VAPOR DE CALEFACCIÓN .....	105
7.5 VERIFICACIÓN DE RESULTADOS .....	106
<b>8. CONCLUSIONES .....</b>	<b>109</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>111</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>112</b>

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Evaporador tipo calandria .....	16
Figura 2. Evaporador de marmita .....	17
Figura 3. Evaporador de tubos horizontales .....	18
Figura 4. Evaporador de tubos verticales .....	19
Figura 5. Evaporador de tubos verticales largos.....	19
Figura 6. Evaporador de múltiple efecto .....	20
Figura 7. Cuerpo del evaporador .....	21
Figura 8. Salida de condensados.....	22
Figura 9. Circulación de fondo a parte superior .....	23
Figura 10. Circulación de fondo a fondo .....	24
Figura 11. Regulador de nivel.....	25
Figura 12. Circulación Chapman.....	25
Figura 13. Variación de coeficiente de transmisión de calor en función de la altura del jugo en la calandria .....	26
Figura 14. Balance de energía en cada vaso .....	30
Figura 15. Diagrama de bloques global .....	35
Figura 16. Presiones en cada evaporador .....	36
Figura 17. Caída de presiones en múltiples efectos .....	37
Figura 18. Diagrama de bloques del subsistema presiones .....	38
Figura 19. Bloque del vapor saturado de calefacción .....	38
Figura 20. Diagrama de bloques del subsistema Entradas de vapor.....	39
Figura 21. Bloque de condiciones iniciales del jugo.....	40
Figura 22. Diagrama de bloques del subsistema Entradas de jugo.....	40
Figura 23. Primer efecto .....	41
Figura 24. Bloques dentro de cada efecto .....	42
Figura 25. Bloques de entrada.....	42
Figura 26. Bloque de propiedades físico-químicas de jugo y vapor.....	43
Figura 27. Subsistema temperatura del jugo dentro del evaporador .....	44
Figura 28. Sub-sistemas dentro del bloque que determina la temperatura.....	45
Figura 29. Subsistema temperatura del jugo dentro del evaporador .....	46
Figura 30. Diagrama de bloques del subsistema Coeficiente global de resistencia .....	46
Figura 31. Subsistema de aumento del punto de ebullición.....	47
Figura 32. Diagrama de bloques del subsistema Coeficiente Aumento del punto de ebullición global de resistencia .....	47

Figura 33. Subsistema de calor vsc (calor de vapor saturado de calefacción) .....	48
Figura 34. Diagrama de bloques del subsistema Calor vsc .....	48
Figura 35. Subsistema de Saturación .....	49
Figura 36. Diagrama de Saturación .....	49
Figura 37. Subsistema de intercambiador .....	50
Figura 38. Diagrama de bloques del subsistema de intercambiador .....	50
Figura 39. Masa de vapor y masa de jugo .....	51
Figura 40. Subsistema de masa de vapor y masa de jugo .....	51
Figura 41. Subsistema de volumen de calandria .....	52
Figura 42. Diagrama de bloques del subsistema Volumen calandria .....	53
Figura 43. Subsistema de Gas ideal .....	53
Figura 44. Diagrama de bloques del subsistema de Gas ideal .....	54
Figura 45. Subsistema de Masa de jugo inicial.....	54
Figura 46. Diagrama de bloques del subsistema de Masa de jugo inicial.....	55
Figura 47. Balance de energía.....	55
Figura 48. Balance de energía en bloques .....	56
Figura 49. Balances de masa y concentración .....	56
Figura 50. Balances de masa y concentración en bloques modelo sin control de concentración.....	57
Figura 51. Balances de masa y concentración en bloques modelo con control de concentración.....	57
Figura 52. Subsistema de balance de concentración .....	58
Figura 53. Diagrama de bloques del subsistema de Balance de concentración ....	58
Figura 54. Subsistema de balance de masa .....	59
Figura 55. Diagrama de bloques del subsistema de Balance de masa .....	59
Figura 56. Subsistema de Cálculo de h .....	60
Figura 57. Diagrama de bloques del subsistema de Cálculo de h .....	60
Figura 58. Subsistema de control masa de jugo de entrada.....	61
Figura 59. Diagrama de bloques del subsistema de control_mj1 .....	61
Figura 60. Subsistema de control masa de jugo de entrada.....	61
Figura 61. Diagrama de bloques del subsistema de control_mj1 .....	62
Figura 62. Subsistema de control masa de jugo de salida.....	62
Figura 63. Diagrama de bloques del subsistema de Control_mj2.....	63
Figura 64. Subsistema de control masa de jugo de salida.....	63
Figura 65. Diagrama de bloques del subsistema de Control_mj2.....	64
Figura 66. Subsistema de detener simulación .....	65
Figura 67. Diagrama de bloques del subsistema de detener simulación .....	65
Figura 68. Salidas del sistema .....	65
Figura 69. Evaporador tipo calandria .....	66

Figura 70. Menú de la interfaz .....	66
Figura 71. Menú Editor .....	67
Figura 72. Paneles .....	69
Figura 73. Caldera de vapor .....	70
Figura 74. Dimensiones .....	70
Figura 75. Manómetro.....	70
Figura 76. Jugo de caña .....	71
Figura 77. Simulación .....	71
Figura 78. Efectos.....	71
Figura 79. Panel entradas.....	72
Figura 80. Panel simulación.....	74
Figura 81. Cuadro de dialogo de error .....	76
Figura 82. Panel de tiempo de simulación .....	76
Figura 83. Panel de estado.....	77
Figura 84. Ejemplos de la barra de estados .....	78
Figura 85. Panel de resultados .....	79
Figura 86. Panel de valores de estabilidad del sistema .....	79
Figura 87. buttom group de “Gráficas” y “Solo un efecto” .....	80
Figura 88. buttom group “Salida de concentración” .....	81
Figura 89. Panel de control de concentración.....	83
Figura 90. Interfaz de regulación de válvulas .....	84
Figura 91. Panel de Gráfica de resultados.....	85
Figura 92. Ejemplo de lógica difusa .....	88
Figura 93. Subsistema de control de mj2.....	88
Figura 94. Control de mj2 .....	89
Figura 95. Ventana de parametrización del control <i>Fuzzy</i> .....	89
Figura 96. Ventana de parametrización del input(Error) .....	90
Figura 97. Ventana de reglas del control <i>Fuzzy</i> .....	91
Figura 98. Ventana de parametrización del output(Válvula) .....	92
Figura 99. Grafica del error del control <i>Fuzzy</i> .....	92
Figura 100. Grafica de nivel de masa en los evaporadores.....	93
Figura 101. Grafica de control <i>Fuzzy</i> .....	93
Figura 102. Perturbación en las condiciones iniciales .....	94
Figura 103. Condiciones iniciales .....	95
Figura 104. Concentración a la salida sin perturbar.....	95
Figura 105. Vapor producido sin perturbar .....	96
Figura 106. Temperatura sin perturbar .....	96
Figura 107. Salida de jugo sin perturbar .....	97
Figura 108. Masa dentro de la calandria sin perturbar.....	97

Figura 109. Coeficiente global de transferencia de calor sin perturbar .....	98
Figura 110. Concentración a la salida con perturbación .....	99
Figura 111. Vapor producido con perturbación .....	100
Figura 112. Temperatura con perturbación (Efecto 1, Efecto 2, Efecto 3) .....	100
Figura 113. Salida de jugo con perturbación .....	102
Figura 114. Masa dentro de la calandria con perturbación .....	102
Figura 115. Coeficiente global de transferencia de calor con perturbación .....	103
Figura 116. Vapor producido con perturbación .....	104
Figura 117. Salida de jugo con perturbación .....	104
Figura 118. Masa de vapor producida. ....	105
Figura 119. Concentración final. ....	106
Figura 120. Extracción de condensado separada de cada vaso .....	107
Figura 121. Resultados programa.....	108
Figura 122. Grafica de concentración en los efectos .....	108
Figura 123. Cargar modelos .....	112
Figura 124. Menú Archivo .....	112
Figura 125. Ventana de comandos del control <i>Fuzzy</i> .....	113
Figura 126. Inicializar variables de condición .....	114
Figura 127. Colocar datos de entrada.....	114
Figura 128. Simular.....	115
Figura 129. Estados de espera .....	115
Figura 130. Resultados estado estable.....	116
Figura 131. Graficas de los resultados .....	116
Figura 132. Grafica de concentración segundo efecto.....	117
Figura 133. Modelos de simulación .....	117
Figura 134. Ejemplos de la barra de estados .....	118
Figura 135. Interfaz de Regulación de válvulas .....	118
Figura 136. Grafica de resultados.....	119
Figura 137. Grafica de concentración de los 3 efectos con concentración controlada .....	119
Figura 138. Resultados de los dos modelos .....	120
Figura 139. Grafica de concentración de los 3 efectos sin concentración controlada .....	120

## RESUMEN

### TÍTULO:

**SIMULACIÓN Y MODELADO MATEMÁTICO DE EVAPORADORES DE MÚLTIPLE EFECTO ♦**

### AUTORES:

MIGUEL ANGEL PADILLA TOLOZA ♦♦  
SERGIO ANDRÉS ARDILA PARRA ♦♦

**PALABRAS CLAVES:** SIMULACIÓN, MODELADO, EVAPORADORES, MÚLTIPLE EFECTO.

### DESCRIPCIÓN:

La simulación permite analizar ciertos factores que afectan diversos procesos industriales, predecir el alcance que puedan generar posibles errores y tener una noción del efecto que podrían producir futuras mejoras, con la ventaja de no tener que intervenir directamente en el proceso sino por el contrario anticipar cada acción y de este modo tener la posibilidad de efectuar un análisis que permita el mejor aprovechamiento de los recursos.

La simulación de evaporadores de múltiple efecto permite una predicción muy cercana al funcionamiento de este tipo de sistemas, los cuales cumplen una etapa muy importante en la producción de azúcar, éstos hacen posible la elevada concentración de sacarosa en el jugo final, sin la cual no sería posible transformar el jugo de caña de azúcar en azúcar cristalizada, alcohol o concentrado para animales.

La simulación se realizó en *Simulink*, herramienta de *Matlab*, consta de bloques que representan cada una de las ecuaciones que rigen el proceso de ebullición del jugo dentro de los evaporadores, como mejora del proceso se implementó un control *Fuzzy* que regula las válvulas para llegar a la concentración requerida de un modo más rápido y también mantiene el nivel del jugo constante dentro del evaporador. Se creó una interfaz con la herramienta *guide* de *Matlab*, la cual sirve para ingresar los datos del evaporador, ver los resultados en estado estacionario y las gráficas de todo el proceso incluyendo el segmento en estado transitorio.

---

♦ Proyecto de grado

♦♦ Facultad de ingenierías Físico-mecánicas, Escuela de ingeniería mecánica,  
Director Jose Iván Hurtado Hidalgo.

## ABSTRACT

### TITLE:

**SIMULATION AND MATHEMATICAL MODEL OF MULTIPLE EFFECT EVAPORATORS. ♦**

### AUTHOR:

MIGUEL ANGEL PADILLA TOLOZA  
SERGIO ANDRÉS ARDILA PARRA ♦♦

**KEYWORDS:** SIMULATION, MODELLING, EVAPORATORS, MULTIPLE EFFECT.

### DESCRIPTION:

Simulation allows the possibility of evaluate some factors who affect industrial processes, predict the significance that possible errors could generate and have a notion of the effect that could produce future improvements, with the advantage of not having to intervene directly in the process, but rather anticipate every action and thus be able to perform an analysis to better utilization of resources.

The simulation of multiple effect evaporators allows a prediction very close about the operation of this type of system, which plays a very important role in sugar production; these make possible the high concentration of sucrose in the final juice, without which it would not be possible to transform the sugarcane juice in granulated sugar, alcohol or animal food.

The simulation was developed in *Simulink*, tool of *Matlab*, consist of blocks that represent each of the equations that govern the processes of boiling of juice inside the evaporators, to improve the process it was implemented a *Fuzzy* control for regulating valves to get the concentration required faster and keeps a constant level of the juice inside of the evaporator. It was created an interface with Guide tool of *Matlab* which is used to enter data evaporator, see the results at steady state and the graphic of the whole process including the dynamic state.

---

♦ Graduation Project

♦♦ Faculty of Physic-mechanics Engineering, School of Mechanical Engineering,  
Director José Iván Hurtado Hidalgo.

## INTRODUCCIÓN

La conservación y aprovechamiento de los recursos es una constante en la transformación de materias primas, no sólo por el impacto que tienen sobre el medio ambiente, sino porque, también se benefician los agricultores y las empresas manufacturera. Obtener una relación favorable de costos beneficio evita, por una parte, el desperdicio de energía y, por otra parte, racionaliza el consumo de recursos naturales y la generación de subproductos que pueden usarse en otros procesos. De esta manera se generan ahorros y se obtienen mayores beneficios, efectos que, en conjunto, incrementan la competitividad industrial.

El conocimiento y desarrollo de modelos de simulación de procesos de separación de disoluciones azucaradas adaptados al contexto cultural y en el ámbito regional o nacional, permite profundizar en los conceptos básicos del proceso real y adoptar acciones para su mejor funcionamiento y control, con un porcentaje aceptable de efectividad.

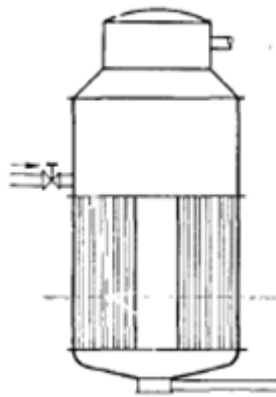
La implementación de un programa que modele y simule el proceso de concentración por evaporación, para un evaporador de triple efecto, permitirá que se puedan variar las condiciones de trabajo del sistema sin tener que actuar sobre el mismo directamente, lo que permitiría plantear una serie de situaciones diferentes para el mismo evaporador con sus respectivos resultados de beneficio y concentración final en un tiempo relativamente corto. Con estos resultados se podrá determinar cuál es la mejor configuración que genera mayor ganancia según las condiciones que se disponen para el evaporador.

## 1. EVAPORADORES

Los evaporadores hacen parte de los intercambiadores de calor, los cuales permiten una transferencia de calor de un fluido caliente a uno frío, en los cuales el fluido a calentar presenta un cambio de fase debido a que alcanza una temperatura correspondiente a su punto de ebullición pasando así a un estado gaseoso en su totalidad o en cierta proporción.

Para el calentamiento del fluido frío se hace uso, generalmente, de vapor saturado o sobrecalentado proveniente de una caldera, el cual por medio de la transferencia de calor por convección calienta los tubos por los cuales avanza el fluido frío, posteriormente se genera una conducción a través de la pared de los tubos y finalmente una convección debida a la resistencia que presenta el fluido frío; se debe considerar que también se logra la evaporación por medio de la aplicación de calor a fluidos estancados (ebullición en estanque).

Figura 1. Evaporador tipo calandria



Fuente: Hugot. Manual de ingenieros azucareros

### 1.1 TIPOS DE EVAPORADORES

Los evaporadores comprenden todo dispositivo que permita a un fluido tener un cambio de fase, el tipo de evaporador a usar depende principalmente de las características del fluido a evaporar, de cómo va a circular dentro del evaporador y

de cuánto calor requiere, así como de la fuente de calor y el área que permite la ebullición. A continuación se enuncian los principales tipos de evaporadores:

### 1.1.1 Marmita abierta o artesa

Consiste en una marmita abierta a la atmósfera por dentro de la cual pasan unos serpentines que llevan en su interior vapor saturado el cual transmite calor latente hasta condensarse y dando lugar a la ebullición del fluido en el interior de la marmita, en algunos casos traen agitadores para distribuir de manera uniforme la temperatura y la concentración, son evaporadores muy económicos pero generan grandes pérdidas de energía.

Figura 2. Evaporador de marmita



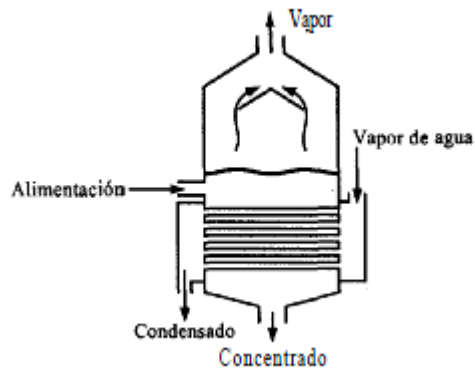
Fuente: <http://www.porticodemexico.com>

### 1.1.2 Evaporador de tubos horizontales con circulación natural

Es un evaporador muy similar a los intercambiadores de calor, el vapor pasa por tubos horizontales transfiriendo calor al fluido que se encuentra generalmente en una calandria del cual el vapor sale por la parte superior pasando primero por

unos deflectores para evitar arrastres, su uso se encuentra limitado por la circulación del fluido a evaporar el cual sale por la parte inferior generalmente por gravedad, por lo cual no se recomienda para fluidos muy viscosos.

Figura 3. Evaporador de tubos horizontales

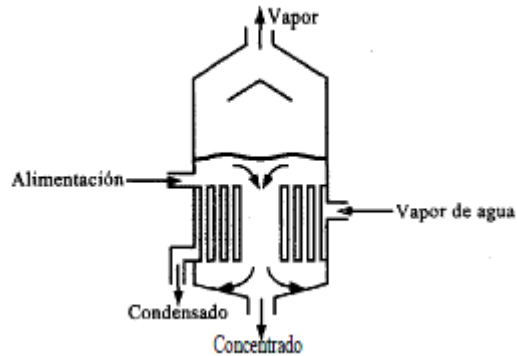


Fuente: C.J. Geankoplis, Procesos de transporte y operaciones unitarias.

### 1.1.3 Evaporador de tubos verticales con circulación natural

En este tipo de evaporadores el fluido va en el interior de los tubos y el vapor por fuera de ellos, el fluido sale de forma natural por un tubo central luego de pasar por los tubos donde se produce el vapor el cual sale por la parte superior del evaporador, esta circulación natural aumenta en gran medida el coeficiente global de transferencia de calor, este tipo de evaporadores se usa con frecuencia en las industrias del azúcar, la sal y la sosa cáustica. [1]

Figura 4. Evaporador de tubos verticales

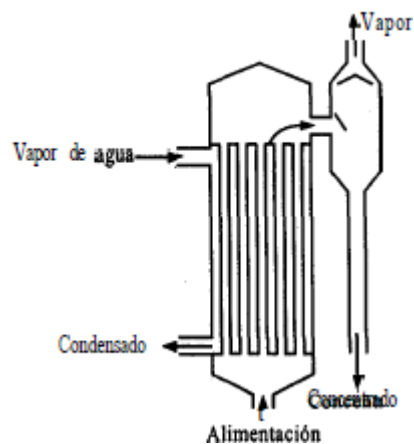


Fuente: C.J. Geankoplis. Procesos de transporte y operaciones unitarias.

#### 1.1.4 Evaporador de tubos verticales largos

Los evaporadores con tubos verticales largos se caracterizan por ser de flujo ascendente, flujo descendente o circulación forzada, el líquido puede pasar varias veces por los tubos aunque generalmente son de un solo paso, permiten velocidades altas del líquido lo cual aumenta el coeficiente de transferencia de calor, no permiten sustancias que generen incrustaciones.

Figura 5. Evaporador de tubos verticales largos

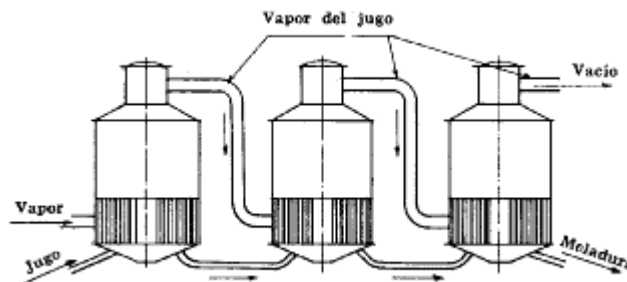


Fuente: C.J. Geankoplis. Procesos de transporte y operaciones unitarias.

## 1.2 EVAPORADOR DE MÚLTIPLE EFECTO

En 1830 en Luisiana Norbert Rillieux, americano de origen francés, descubrió que podía utilizar el vapor generado en un evaporador para calentar el líquido en un siguiente evaporador y así generar una segunda ebullición, sin embargo el principal inconveniente de este descubrimiento es que no es posible evaporar un líquido que tiene un punto de ebullición, por ejemplo, de 110°C con vapor a 110°C, ya que la temperatura del vapor es igual a la temperatura con la que hierve el líquido por equilibrio de fases, también como se retira agua del líquido en la primera evaporación su concentración aumenta y esto produce que su punto de ebullición también aumente, teniendo en cuenta todo esto es necesario tener una diferencia suficiente entre la temperatura del vapor y el punto de ebullición del líquido y Norbert Rillieux consiguió obtener esta diferencia poniendo el segundo evaporador a un vacío suficiente para hacer hervir el líquido.

Figura 6. Evaporador de múltiple efecto

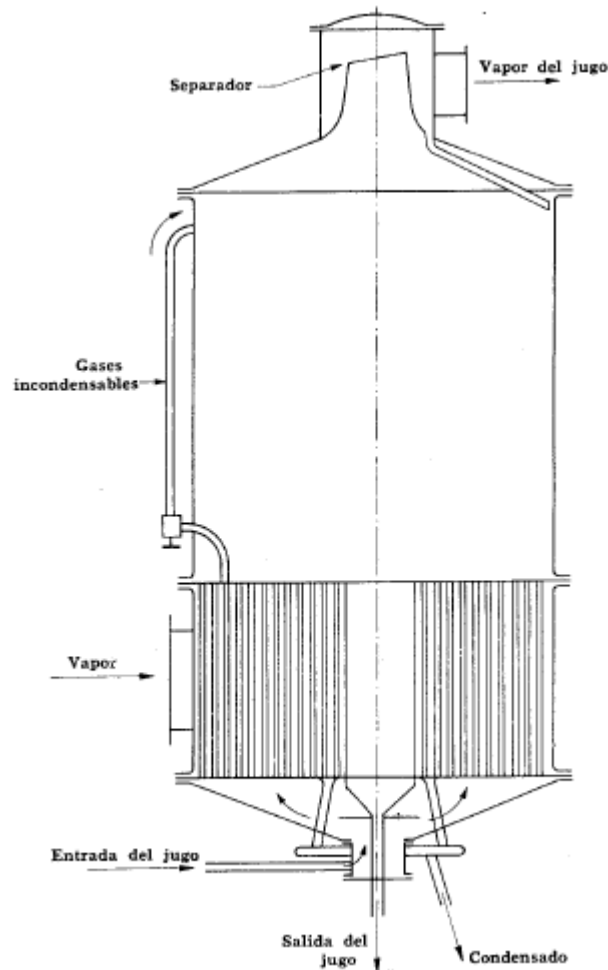


Fuente: Hugot. Manual de ingenieros azucareros

Tomando como base este principio la actual industria azucarera utiliza no únicamente 2 evaporadores en serie sino hasta 5 para lograr concentraciones en de hasta 60° o 70° en grados Brix, esto se debe a las grandes ventajas del proceso: se puede aumentar la diferencia entre las temperaturas del vapor y el punto de ebullición generando el vacío y producto de este vacío las temperaturas del proceso son considerablemente bajas, por el contrario el principal inconveniente para la implementación de múltiples efectos es la inversión necesaria en equipos para generar el vacío requerido.

## 1.2.1 Componentes de un múltiple efecto

Figura 7. Cuerpo del evaporador



Fuente: Hugot. Manual de ingenieros azucareros

### El cuerpo

El cuerpo está conformado por una parte cilíndrica generalmente de lámina de acero, antiguamente de fundición, la cual posee en su interior una calandria donde se produce la transferencia de calor entrando vapor a la calandria por el exterior de los tubos mientras pasa el jugo por el interior de los mismos, en la parte superior hay un separador que evita que el vapor que se produce lleve consigo gotas de jugo, este problema se conoce como arrastres, y finalmente la parte inferior el cilindro toma una forma cónica por donde sale el jugo concentrado.

### Altura del cuerpo

Como se puede observar en el esquema del evaporador la mayor parte de la altura esta hueca, ocupando una pequeña parte la calandria, esto se debe a que el espacio que se encuentra encima de la calandria sirve para evitar que el vapor lleve gotas de jugo y ayudar a aumentar la eficiencia del separador. En Estados Unidos este espacio se encuentra generalmente entre 1.5 a 2 veces la altura de la calandria mientras en Europa son de 3.5 a 4 metros.

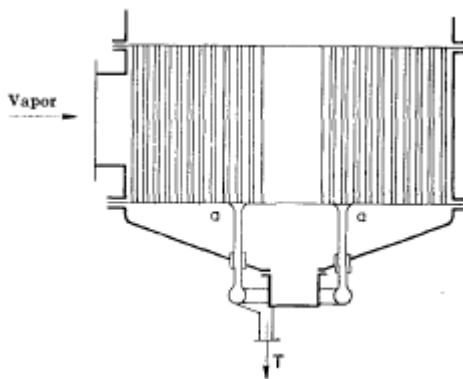
### Diámetro

El diámetro del evaporador está directamente relacionado con la cantidad de vapor que se va a generar en la ebullición, ya que permite controlar la velocidad del mismo, así si se desea un vapor seco la velocidad debe ser de 0.1 m/s, sin embargo esta regla no se respeta en la práctica debido al gran costo en los materiales de construcción, 1 m<sup>2</sup> por cada 400 m<sup>3</sup>/h de vapor producido, y por este motivo se incorporan separadores, las velocidades actuales alcanzan de 0.5 hasta 1 m/s.

### Calandria

Consiste en un haz de tubos verticales que se encuentran entre dos espejos los cuales van unidos al cilindro del cuerpo por medio de bridas, el diámetro de los tubos va desde 3 in de diámetro e incrementa en proporción a la concentración de los jugos, por otro lado el vapor fluye por fuera de los tubos hasta su condensación proporcionando así la mayor cantidad de calor latente, posteriormente estos condensados salen por un drenaje que se encuentra en la parte inferior del cuerpo generalmente.

Figura 8. Salida de condensados



Fuente: Hugot. Manual de ingenieros azucareros

### 1.2.2 Circulación del jugo

Existen varias maneras de hacer que el líquido concentrado circule de evaporador a evaporador a continuación se presentan los más relevantes.

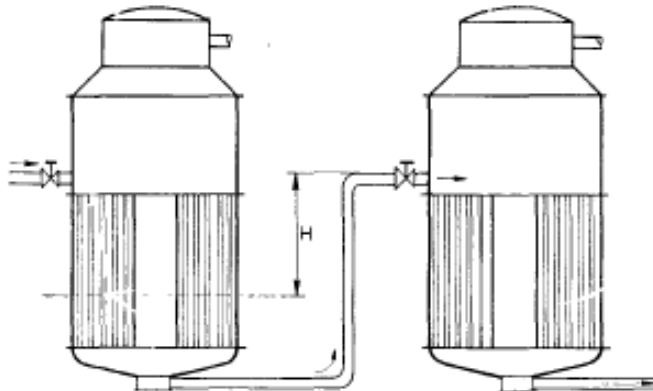
#### Del fondo de un cuerpo a la parte superior del siguiente

El jugo sale por la parte inferior del evaporador y entra al siguiente por la parte superior teniendo como principal inconveniente que no pase por el haz de tubos y en su lugar pase directamente por ese tubo central.

Las velocidades en el tubo comunicador no deben pasar las siguientes:

Triple efecto	1 m/s
Cuádruple efecto	0.75 m/s
Quíntuple efecto	0.60 m/s
Séxtuple efecto	0.50 m/s

Figura 9. Circulación de fondo a parte superior



Fuente: Hugot. Manual de ingenieros azucareros

#### De fondo a fondo

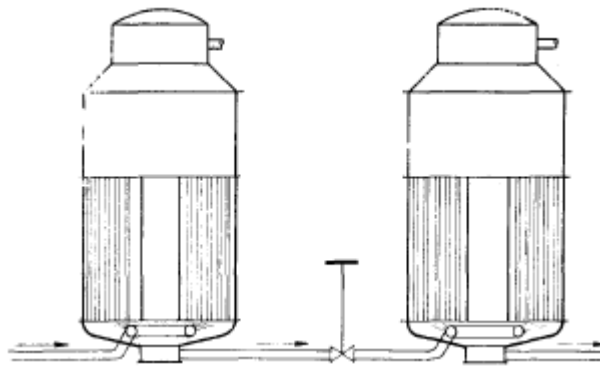
El jugo llega por la parte inferior del evaporador y por medio de un dispositivo que lo distribuye uniformemente asciende por el haz de tubos, lo que asegura su paso

por ellos, y posteriormente al llegar a la parte superior de la calandria desciende por el tubo central.

En este caso las velocidades recomendadas no deben exceder:

Triple efecto	1.5 m/s
Cuádruple efecto	1.20 m/s
Quíntuple efecto	1.00 m/s
Séxtuple efecto	0.75 m/s

**Figura 10. Circulación de fondo a fondo**



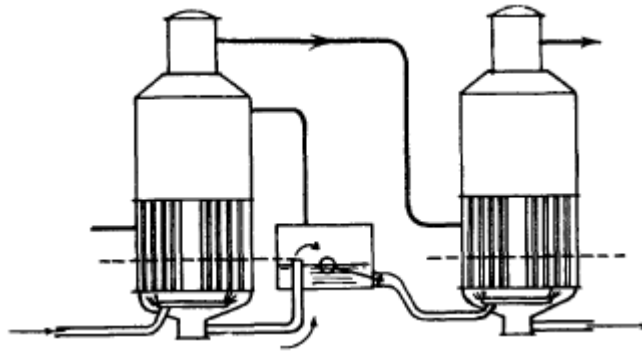
**Fuente: Hugot.** Manual de ingenieros azucareros

### **Por regulador de nivel**

La importancia de las válvulas de los tubos de comunicación entre evaporadores es la de mantener un nivel fijo u óptimo de operación, sin embargo generalmente estas válvulas son de accionamiento manual, el regulador de nivel suprime este inconveniente por medio de un flotador que conectado a una válvula de salida que controla el flujo para mantener un nivel óptimo en el evaporador.

Mantener un nivel óptimo en el evaporador ayuda en gran medida a la transferencia de calor por dentro del mismo además también aligera en gran medida el trabajo que debe realizar el operario encargado del evaporador.

Figura 11. Regulador de nivel

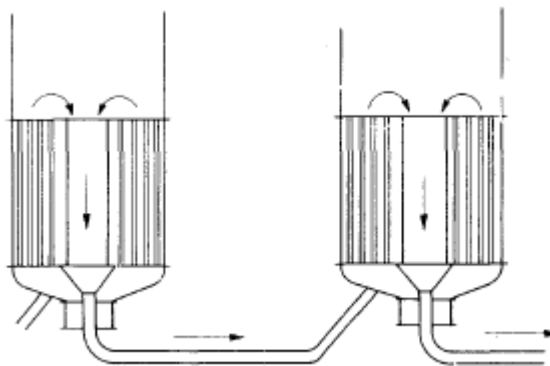


Fuente: Hugot. Manual de ingenieros azucareros

### Circulación Chapman

Es uno de los más recomendados y consiste en aislar el tubo central de la calandria hasta la salida del evaporador por medio de un embudo de tal manera que el jugo que entra por la parte inferior sólo pueda salir cuando llega a la parte superior y baja por el tubo central, también se pueden hacer unas modificaciones para que el jugo tenga más de un paso por el haz de tubos.

Figura 12. Circulación Chapman

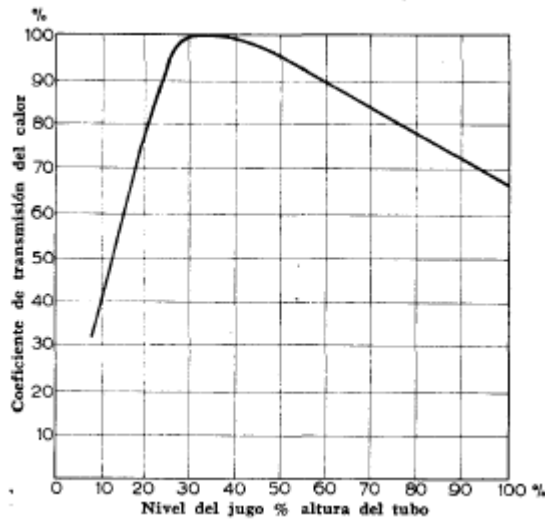


Fuente: Hugot. Manual de ingenieros azucareros

## Importancia del nivel del jugo

En los diferentes modos nombrados para la circulación del jugo se ha mencionado en reiteradas ocasiones la importancia de mantener un nivel óptimo del jugo dentro del vaso, si el nivel del jugo es demasiado alto se corre el riesgo que el jugo que entra no alcance a subir por los tubos debido a la presión que genera este en la parte inferior de la calandria, por el contrario si el nivel del jugo es muy bajo este no subirá sino hasta que se produzca la ebullición y en consecuencia no circulara dentro de la calandria. Estos problemas que trae elegir un nivel óptimo de jugo se traducen en la cantidad de calor que puede recibir el jugo y este calor está en función del coeficiente global de transferencia de calor, así el CGTC tiene una estrecha relación con la altura de jugo dentro de la calandria lo cual llevo a Kerr a realizar una curva que mostrara esta influencia, en ella se puede apreciar que los mejores CGTC se encuentran cuando los tubos están sumergidos en un 30 a 40% sin embargo estos datos son válidos únicamente para calandria de tubos cortos, cuando se trabaja con longitudes mayores estos valores decrecen hasta un 20%.

Figura 13. Variación de coeficiente de transmisión de calor en función de la altura del jugo en la calandria



Fuente: Hugot. Manual de ingenieros azucareros

## 2. PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DEL JUGO DE CAÑA DE AZUCAR

Las propiedades del jugo de caña de azúcar son indispensables para poder realizar un modelo matemático que pueda predecir el comportamiento de un múltiple efecto, para el caso de un modelado dinámico es necesario conocer cómo varían estas propiedades cuando se presentan cambios de temperatura, cambios de presión y cambios de concentración, para este modelo las unidades de concentración utilizadas son grados Brix. Para la obtención de estas propiedades se realizó un análisis bibliográfico dentro del cual se encontraron correlaciones que permiten unos resultados aceptables con un nivel de precisión lo suficientemente bueno.

### 2.1 DENSIDAD DEL JUGO

Para los balances de materia y energía es indispensable contar con la densidad del jugo, aunque usualmente estos balances son másicos y se obvia el valor de la densidad, en la práctica los dispositivos usados miden caudal y no flujo másico por lo tanto no se sabe cuánta materia en realidad pasa por los dispositivos. En este problema específico al tratarse de un aumento progresivo de los sólidos dentro de una solución azucarada la densidad es una propiedad fundamental para predecir el comportamiento del proceso.

La correlación utilizada para hallar la densidad del jugo se obtuvo de un proyecto realizado en Colombia por lo cual los resultados obtenidos se aproximarán en gran medida a los valores obtenidos localmente.

$$\rho = 0,956 + 0,005 \times SST \quad (1) \text{ Peña 2009}$$

$\rho$  = Densidad (g/cm<sup>3</sup>)

SST = Sólidos solubles totales (°Brix)

Para realizar las operaciones en sistema internacional se transformó la ecuación y se dejó la densidad en  $Kg/m^3$

$$\rho = 956 + 5 \times SST [kg/m^3] \quad (2)$$

La correlación sólo es función de la cantidad de sólidos dentro de la solución, sin embargo la densidad también depende de la temperatura pero ésta variación se

omite debido al limitado rango de esta variación (105°C – 55°C) lo cual simplifica un poco el modelo. También es de resaltar que la densidad del jugo es similar al del agua pero aumenta en medida que aumentan la cantidad de sólidos.

## 2.2 CAPACIDAD CALORÍFICA

La capacidad calorífica es fundamental en los balances energéticos, la correlación utilizada considera la variación de esta en función de la cantidad de sólidos presentes en el jugo de la caña de azúcar pero no considera su desviación cuando cambia la temperatura por las razones anteriormente mencionadas.

$$C = 1 - 0,006 \times Bx \quad (3) \text{ Hugot 1986}$$

c = Capacidad calorífica (Kcal/kg°C)

Bx = Concentración (°Brix)

Con el cambio de unidades para sistema internacional.

$$C = (1 - 0,006 \times Bx) \times 4,1868 \left[ \frac{Kj}{Kg^{\circ}C} \right] \quad (4)$$

## 2.3 ELEVACIÓN DEL PUNTO DE EBULLICIÓN (EPE)

En los evaporadores el objetivo principal es aumentar la concentración del jugo de caña de azúcar, sin embargo uno de los problemas energéticos consiste en el inevitable aumento del punto de ebullición que se genera, por este motivo es que es necesario mantener a una presión de vacío los evaporadores y así contrarrestar la EPE.

$$\Delta T = 0,2209e^{0,0557 \times X} \quad (5)$$

$\Delta T$  = elevación del punto de ebullición (°C)

X = Concentración (°Brix)

Este aumento solo depende de la concentración del jugo y posteriormente se sumará a la temperatura de saturación del agua a la presión a la que se encuentre el evaporador.

### 3. MODELO MATEMÁTICO

Para el modelo matemático se realizó un análisis en estado transitorio con unas condiciones iniciales tanto del jugo como del vapor proveniente de caldera y tomando referencias para el dimensionamiento de los vasos y de los tubos del evaporador, también se debieron tomar algunas aproximaciones que facilitaron los cálculos pero que no alejan en gran medida los resultados de un proceso real.

#### 3.1 BALANCE DE ENERGÍA

Para el balance de energía se toma un volumen de control que abarca todo el vaso y no sólo la calandria, por lo cual se tiene en cuenta el cambio de fase y en consecuencia la acumulación de vapor dentro del mismo.

$$m_{j1} * h_{j1} + mvsc * hg - mvsc * hf - m_{j2} * h_{j2} - m_{v1} * h_{v1} = \frac{d}{dt} (M_j * H_j + M_v * H_v) \quad (5)$$

Donde:

$m_{j1}$  = Masa de jugo que entra al evaporador.

$h_{j1}$  = Entalpía que trae el jugo que entra al evaporador.

$mv$  = Masa de vapor saturado de calefacción.

$hg$  = Entalpía del vapor de calefacción.

$hf$  = Entalpía del condensado.

$m_{j2}$  = Masa de jugo que sale del evaporador.

$h_{j2}$  = Energía que tiene el jugo saliendo del evaporador.

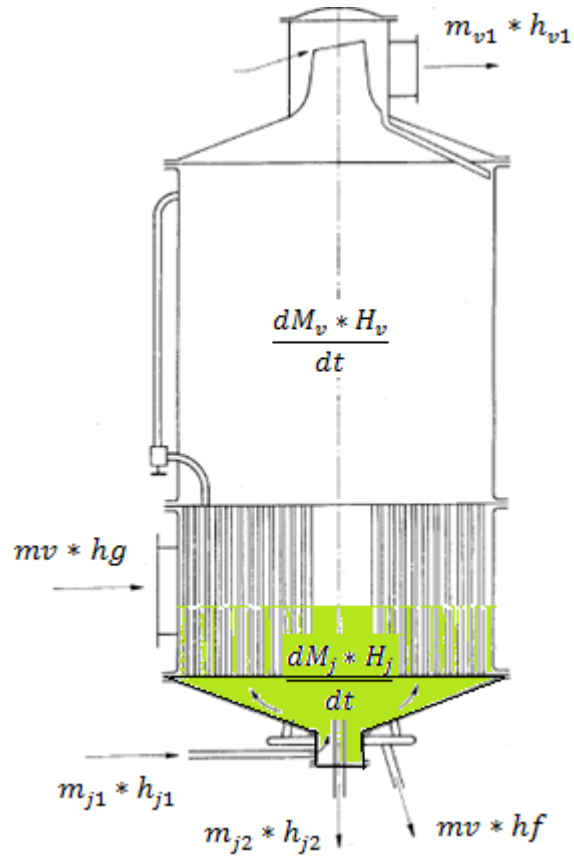
$m_{v1}$  = Masa de vapor producto de la ebullición que pasa al siguiente efecto.

$h_{v1}$  = Entalpía del vapor generado.

$M_j$  = Jugo dentro del evaporador.

$M_v$  = Masa de vapor dentro del evaporador.

Figura 14. Balance de energía en cada vaso



Fuente: Hugot. Manual de ingenieros azucareros

Del balance de energía realizado se obtiene la cantidad de vapor producido por la ebullición del jugo, pero para ello primero se hace el siguiente cambio de variable:

$$\frac{dH}{dt} * \frac{dT}{dT} = \frac{dH}{dT} * \frac{dT}{dt} \quad (6)$$

De este modo se tienen las entalpías como función de la temperatura y no del tiempo. Despejando  $M_{v1}$ :

$$m_{v1} = \frac{m_{j1} * h_{j1} + Q - m_{j2} * h_{j2} - \frac{dM_j}{dt} * \overline{H_j} - M_j * \frac{dH_j}{dT} * \frac{dT}{dt} - \frac{dM_v}{dt} * \overline{H_v} - M_v * \frac{dH_v}{dT} * \frac{dT}{dt}}{h_{v1}} \quad (7)$$

Donde:

$$Q = m_v * (h_g - h_f) \quad (8)$$

$Q$  = Calor transmitido por el intercambiador.

En los evaporadores de calandria el vapor que entra se queda fuera de los tubos transmitiendo calor latente hasta llegar a la condensación, posteriormente el condensado cae por el efecto de gravedad y es evacuado, pasando antes por unas trampas de vapor.

Este calor es a su vez el transmitido por la calandria teniendo como resistencias térmicas el fluido caliente, vapor, el espesor de los tubos y el fluido frío, en este caso el jugo, lo cual deriva la siguiente ecuación:

$$Q = U * A * AMTD(9)$$

Como se observa en la ecuación 9, no se usa la temperatura media logarítmica sino una aritmética, esto se debe al gran gasto computacional que se ahorra, el cual se ve reflejado en el tiempo que tarda en producirse la simulación.

Para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor U se hizo uso de la siguiente correlación encontrada en la literatura:

$$U = 25.879 * \Delta T^{-0.32} * Tj^{0.53} * (100 - X)^{0.62}$$

Donde:

$\Delta T$  = Es la diferencia entre la temperatura del jugo y del vapor.

### 3.2 BALANCE DE MASA

Para el estado transitorio se debe tener en cuenta la acumulación de masa y energía dentro de cada uno de los cuerpos, en el caso de los evaporadores de múltiple efecto, como se ha mencionado reiteradamente, es de suma importancia mantener un nivel óptimo de jugo, en este balance se toma un valor inicial del tanque dentro del programa y se hace un balance teniendo en cuenta variables entradas y salidas de masa en el sistema así como la rata de cambio de estas.

$$m_{j1} - m_{j2} - m_{v1} = \frac{d}{dt}(M_j + M_v) (9)$$

Multiplicando la multiplicación:

$$m_{j1} - m_{j2} - m_{v1} = \frac{dM_j}{dt} + \frac{dM_v}{dt} \quad (10)$$

Y finalmente despejando la masa de jugo  $M_j$  dentro del cuerpo.

$$\frac{dM_j}{dt} = m_{j1} - m_{j2} - m_{v1} - \frac{dM_v}{dt} \quad (11)$$

Debido a que se debe mantener un nivel óptimo del jugo se controlará la salida del mismo para hacer esto posible, como sucede en la práctica.

### 3.3 BALANCE DE CONCENTRACIÓN

El balance de concentración sirve para determinar la cantidad de sólidos que lleva consigo el jugo a la salida del evaporador, esto se consigue porque la relación entre masa y concentración se conserva, es decir, si determinada masa de jugo entra al evaporador, parte de esta se volverá vapor en la ebullición, mientras otra parte saldrá como jugo concentrado, con menos masa pero mayor porcentaje de sólidos, en otras palabras la cantidad de masa de vapor pérdida por el jugo se convierte en concentración, por supuesto para el estado transitorio se debe tener en cuenta la concentración del jugo acumulado.

$$m_{j1} * X_1 - m_{j2} * X_2 = \frac{d}{dt} (M_j * X_j) \quad (12)$$

Una de las aproximaciones que se hacen dentro del modelo para disminuir el número de variables es asumir que el jugo está perfectamente agitado de lo cual resulta que la concentración del jugo dentro de la calandria sea la misma que la salida.

$$X_2 = X_j \quad (13)$$

Finalmente se despeja la rata de cambio de la concentración, la cual al integrarla en el programa se obtiene la concentración a la salida, usando como valor inicial la concentración a la entrada del evaporador.

$$\frac{dX_2}{dt} = \frac{m_{j1} * X_1 - m_{j2} * X_2 - \frac{dM_j}{dt} * \bar{X}_2}{\bar{M}_j} \quad (14)$$

### 3.4 ECUACIÓN DE ESTADO PARA EL VAPOR

Para determinar la cantidad de vapor que se puede acumular dentro del evaporador se usó la ecuación de gas ideal debido a las bajas presiones y temperaturas que se requieren.

$$P * V = m_v * R * T \quad (15)$$

Donde:

$P =$  Presión en el evaporador

$V =$  Volumen del evaporador

$R =$  Constante del gas

$T =$  Temperatura del gas

Finalmente despejando la masa de vapor.

$$m_v = \frac{P * V}{R * T} \quad (16)$$

### 3.5 SALIDA DE JUGO

La cantidad de jugo que puede salir depende de la altura de columna de jugo encima del tubo de salida, teniendo en cuenta las pérdidas en tubería que se generan en éste descenso, principalmente por el cambio de sección.

$$h = \frac{M_j * v_j}{\pi * \frac{D^2}{4}} \quad (17)$$

Donde:

$h =$  Altura del jugo en el evaporador

$v_j =$  Volumen específico del jugo

$D = \text{Diámetro del evaporador}$

Luego se determina la velocidad de salida del jugo:

$$v = \sqrt{\frac{2 * g * h}{k + 1}} \quad (18)$$

Donde:

$v = \text{Velocidad del jugo}$

$g = \text{Gravedad}$

$K = \text{Pérdidas en tubería}$

Finalmente se calcula la masa de jugo a la salida como:

$$mj2 = \frac{v * A}{vj} \quad (19)$$

Sin embargo este flujo másico es controlado con válvulas de regulación de caudal, en el modelo se hace un control *Fuzzy* que mantiene el nivel del jugo en cada evaporador a una altura de 1/3 de la altura total de los tubos.

## 4. SIMULACIÓN EN SIMULINK

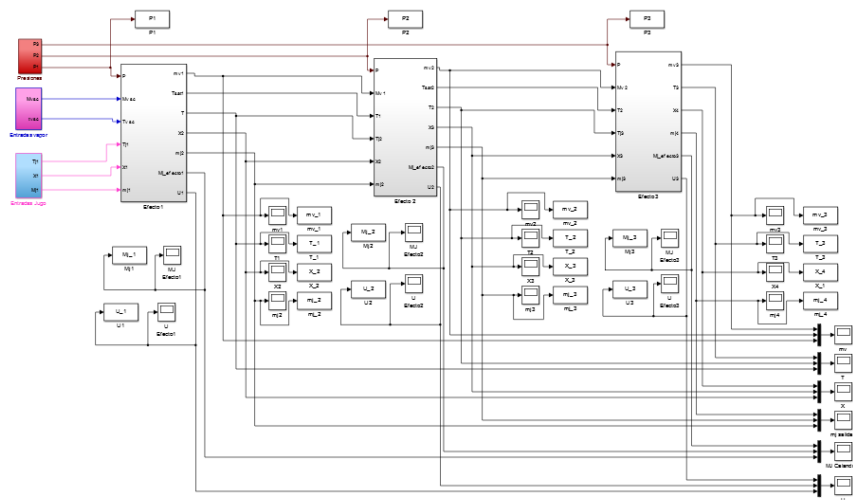
Para el desarrollo del proyecto se elaboraron tres modelos en *Simulink*, dos para el modelamiento del sistema de evaporación de triple efecto y otro para obtener el valor del flujo másico del jugo de caña.

En la simulación se usaron bloques comunes que representan operaciones matemáticas básicas, integrales y derivadas, también se hizo uso de funciones embebidas de *Matlab* para correlaciones muy largas, para algunos operadores lógicos y en general para las propiedades del jugo y el vapor. A continuación se muestra la distribución de los bloques y la función que llevan a cabo:

### 4.1 DIAGRAMA DE BLOQUES

El modelo utilizado para desarrollar la simulación del evaporador de triple efecto en serie fue el mostrado a continuación, este modelo tiene dos versiones, una en la cual se permite el control de la salida de concentración de cada efecto y otro con un modelamiento normal del sistema (sin este control de concentración), los dos modelos son similares en elaboración, solo difieren en un subsistema en su interior (Balance de  $m$  y  $X$ ), y se elaboró un control basado en el método *Fuzzy* para cada modelo.

Figura 15. Diagrama de bloques global



Fuente: Autores.

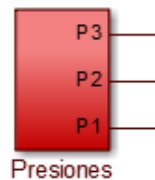
El sistema es un diagrama de bloques con un conjunto de subsistemas destinados a valores de entradas (Presiones, Entradas de vapor de calefacción, Entradas de jugo), los subsistemas de cada efecto (Efecto 1, Efecto 2, Efecto 3) y las salidas de scope y bloques de “to workspace” necesarios para los resultados.

El otro modelo de *Simulink* usado fue el mismo en que se basa el subsistema de “Entradas de jugo para calcular” el flujo másico de jugo de caña y enviarlo a la interfaz GUIDE, Este sistema se hizo independiente debido a la necesidad de conocer previamente el valor del flujo másico antes de correr la simulación y que el tiempo en que toma simular este subsistema solo es mucho menor que el de simulación de todo el sistema.

#### 4.1.1 Condiciones de entrada del modelo

- Presiones en cada evaporador

Figura 16. Presiones en cada evaporador



Fuente: Autores.

Este bloque representa las presiones en cada uno de los efectos, las distribuciones recomendadas siguen una tabla tomada del libro de ingenieros azucareros de Hugot, el cual dada una presión en el último efecto sugiere que las pérdidas en cada uno de los efectos siguientes debe casi la misma.

Figura 17. Caída de presiones en múltiples efectos

Triple efecto	$\frac{11}{30} + \frac{10}{30} + \frac{9}{30}$
Cuádruple efecto	$\frac{11}{40} + \frac{10.5}{40} + \frac{9.5}{40} + \frac{9}{40}$
Quíntuple efecto	$\frac{11}{50} + \frac{10.5}{50} + \frac{10}{50} + \frac{9.5}{50} + \frac{9}{50}$

Fuente: Hugot. Manual de ingenieros azucareros

En la figura 16 el último valor equivale al factor que aumenta la presión entre el último y el penúltimo efecto tomando como referencias la presión que genera en el último efecto el evaporador y la presión con la que entra el vapor saturado de calefacción.

### Ejemplo

Para un evaporador de triple efecto con vacío generado en el condensador de 50 kpa y presión de vapor saturado de calefacción de 115 kpa, las presiones en los efectos primero y segundo corresponden a las siguientes:

Segundo efecto

$$\Delta P = 115 - 50 = 65 \text{Kpa}$$

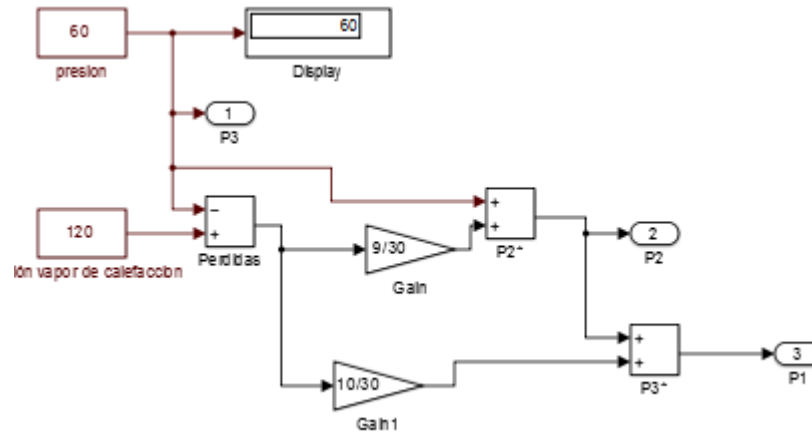
$$P_2 = P_3 + \Delta P * K = 50 + 65 * \frac{9}{30} = 69,5 \text{Kpa}$$

Primer efecto

$$P_1 = P_2 + \Delta P * K = 69,5 + 65 * \frac{10}{30} = 91,2 \text{Kpa}$$

El diagrama de bloques dentro del subsistema “Presiones” es el siguiente:

Figura 18. Diagrama de bloques del subsistema presiones



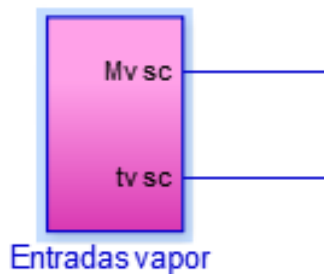
Fuente: Autores

Los valores de los bloques de constantes “presión” y “presión de vapor de calefacción” varían según los datos suministrados en el GUIDE del programa.

- **Vapor saturado de calefacción**

Este bloque representa las condiciones de entrada del vapor saturado de calefacción, su temperatura, presión y flujo másico, es de interés estudiar cómo afectan el proceso perturbaciones en estas variables de entrada, por lo tanto se construyen señales con pequeñas variaciones para verificar las diferentes respuestas que se generan en las variables más relevantes de salida como lo son la concentración y la masa de jugo que sale de cada evaporador

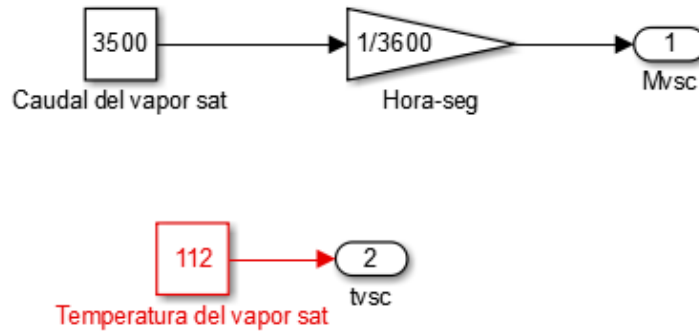
Figura 19. Bloque del vapor saturado de calefacción



Fuente: Autores.

El diagrama de bloques dentro del subsistema “Entradas de vapor” es el siguiente:

Figura 20. Diagrama de bloques del subsistema Entradas de vapor



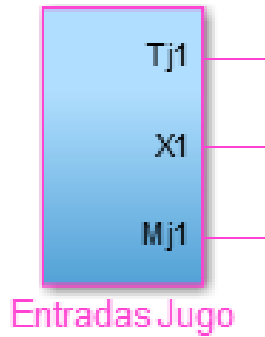
Fuente: Autores

Los valores de los bloques de constantes “caudal del vapor saturado” y “temperatura del vapor saturado” varían según los datos suministrados en el GUIDE del programa.

- **Condiciones iniciales de jugo**

Dentro de éste bloque se encuentran la temperatura inicial del jugo, la concentración en grados Brix y el flujo másico, también se analiza el comportamiento del sistema cuando se introducen perturbaciones a estas condiciones, en la realidad, por ejemplo, la concentración de un jugo no es constante, tiene pequeñas variaciones, las cuales afectan directamente la concentración final del jugo, la temperatura de entrada del jugo también juega un papel importante en la transferencia de calor, requiriendo más o menos calor para poder llegar a la ebullición del jugo.

Figura 21. Bloque de condiciones iniciales del jugo.

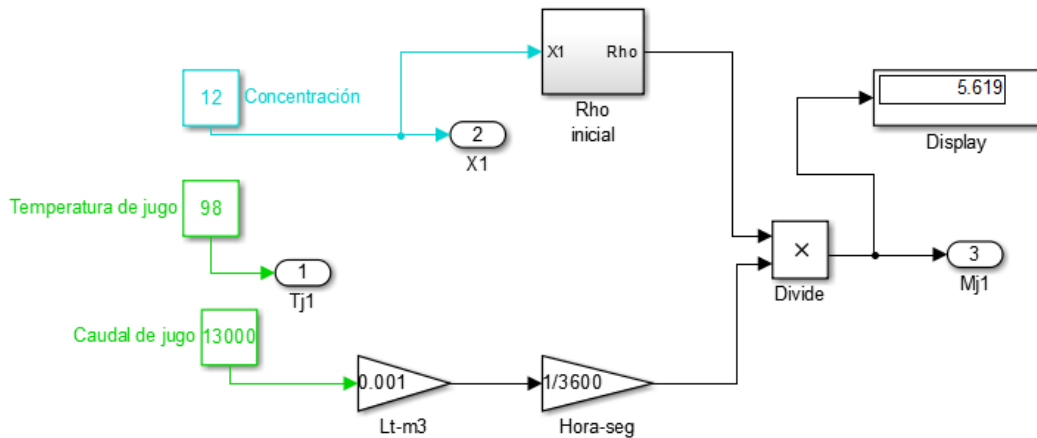


Fuente: Autores.

Este bloque es el mismo subsistema usado independientemente para el cálculo del flujo másico de jugo de caña para enviarlo a la interfaz GUIDE en otro *Simulink*.

El diagrama de bloques dentro del subsistema “Entradas de jugo” es el siguiente:

Figura 22. Diagrama de bloques del subsistema Entradas de jugo



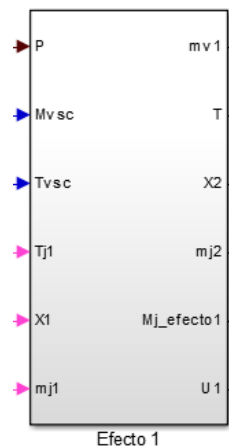
Fuente: Autores

Los valores de los bloques de constantes “Concentración”, “Temperatura de jugo” y “Caudal de jugo” varían según los datos suministrados en el GUIDE del programa.

#### 4.1.2 Evaporador

Este bloque es el más extenso y más importante de la simulación, en él se encuentran consignadas todas las ecuaciones que rigen el evaporador así como las propiedades termo-físicas del jugo y del vapor de agua, sus entradas son casi sus mismas salidas debido a que el siguiente efecto requerirá los mismos datos de entrada, los cuales estarán condicionados por el efecto anterior

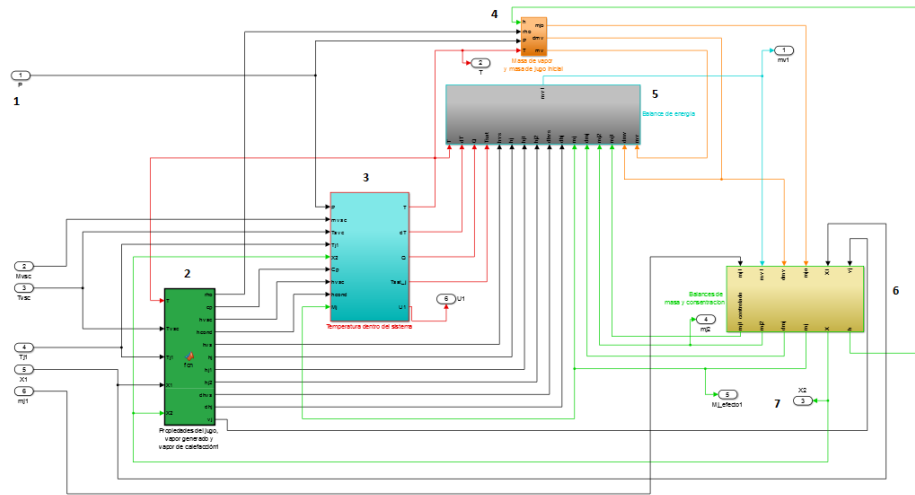
**Figura 23. Primer efecto**



**Fuente: Autores.**

Las entradas del primer efecto son las entradas anteriormente mencionadas que dependen únicamente de las propiedades iniciales del jugo y del vapor proveniente de caldera y la presión que depende del condensador en el último efecto como ya se ha mencionado, mientras tanto las salidas dependen de las ecuaciones que rigen el problema y de las características del evaporador como lo son el número de tubos o el área total de transferencia de calor. Estas ecuaciones y condiciones están también simuladas por medio de bloques de *Simulink*, a continuación se presenta este modelo implementado en la simulación.

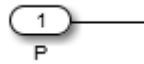
Figura 24. Bloques dentro de cada efecto



Fuente: Autores.

## 1. Entradas

Figura 25. Bloques de entrada



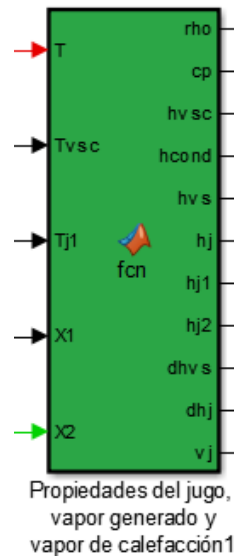
Fuente: Autores.

Estos bloques llevan los datos dentro de cada uno de los sub-sistemas del modelo, no sólo se usan para los datos iniciales sino también datos que calcula el modelo y son requeridos en determinado por momento por otras ecuaciones.

## 2. Subsistema para las propiedades del jugo, vapor de calefacción y vapor producido

Este bloque es el único que en el que se usaron funciones embebidas de *Matlab* y no bloques de funciones matemáticas, se optó esta medida debido a la complejidad de las correlaciones que permiten tener un valor muy aproximado de las propiedades del vapor y el jugo de caña de azúcar. En el caso del jugo de caña de azúcar se hizo uso de correlaciones encontradas en la bibliografía en gran parte local, mientras que para el vapor por medio de tablas de algunos libros de termodinámica se hicieron regresiones de tercer y cuarto orden teniendo en cuenta el rango de temperaturas de trabajo.

Figura 26. Bloque de propiedades físico-químicas de jugo y vapor



Fuente: Autores.

Los valores de entrada a estas propiedades son la concentración y la temperatura, las cuales definen todas las propiedades de salida, estas son:

$\rho$  = Densidad del jugo

$C_p$  = Capacidad calorífica del jugo

$h_{vsc}$  = Entalpía del vapor saturado de calefacción

$h_{cond}$  = Entalpía del condensado

$h_{vs}$  = Entalpía del vapor saturado (producto de la ebullición)

$h_j$  = Entalpía del jugo

$dh$  = Cambio de entalpía respecto a la temperatura

$v_j$  = Volumen específico del jugo

### 3. Subsistema para la temperatura del jugo dentro del evaporador

La temperatura del jugo está limitada por la ecuación del intercambiador de calor.

$$Q = U * A * \Delta T \quad (17)$$

Donde:

$U =$  Coeficiente global de transferencia de calor

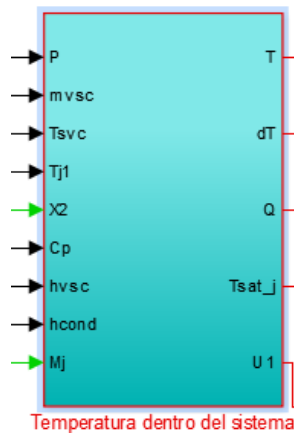
$A =$  Área de transferencia de calor

$\Delta T =$  Diferencia entre temperatura de vapor y jugo.

Sin embargo la ecuación 17 sólo se puede usar para estado estable, por lo que será usada para limitar la máxima temperatura del sistema, para la variación de la temperatura se usa la siguiente expresión.

$$Q = M_j * C_p * \frac{dT}{dt} \quad (18)$$

Figura 27. Subsistema temperatura del jugo dentro del evaporador

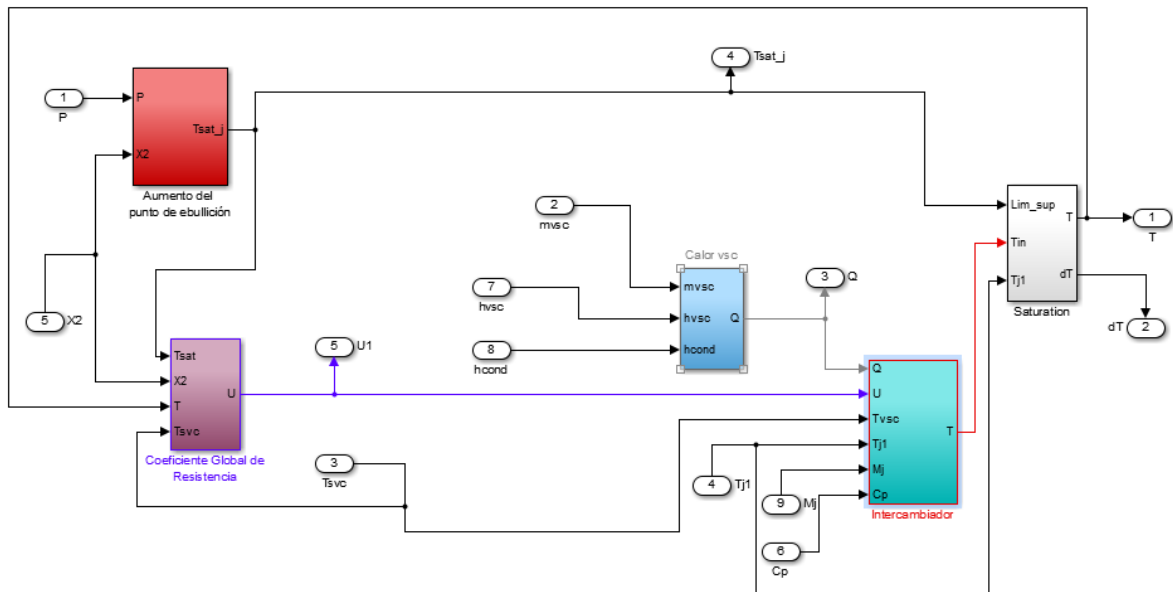


Fuente: Autores.

Este subsistema incluye las ecuaciones y correlaciones necesarias para la obtener el calor, temperatura, cambio de temperatura, temperatura de saturación y coeficiente de transferencia de calor dentro de cada uno de los efectos del evaporador.

El diagrama de bloques del subsistema de “temperatura dentro del sistema” es el siguiente:

**Figura 28. Sub-sistemas dentro del bloque que determina la temperatura**



Fuente: Autores

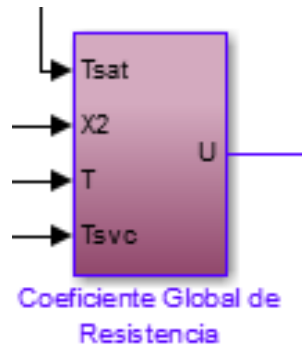
El sistema o diagrama de bloques se centra en el cálculo del aumento del punto de ebullición del jugo para determinar la temperatura de saturación de salida del jugo y el cambio de la misma con el tiempo en cada efecto, sin embargo también calcula el calor latente que viene del vapor de calefacción.

La función de cada uno de los subsistemas dentro de este diagrama es:

- **Subsistema de coeficiente global de transferencia de calor**

El coeficiente global de transferencia de calor  $U_1$ , a pesar que no se necesita en ninguna otra ecuación, la salida se usa para graficar el comportamiento de esta variable y verificar su validez.

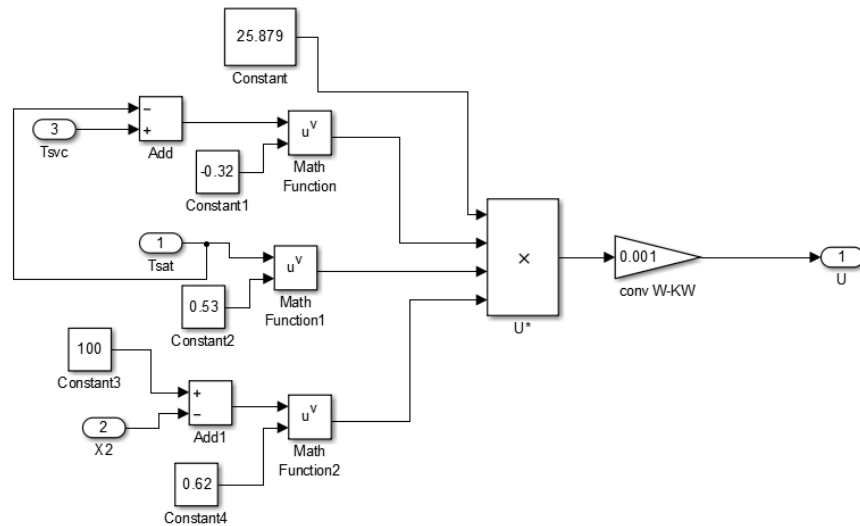
Figura 29. Subsistema temperatura del jugo dentro del evaporador



Fuente: Autores.

El diagrama de bloques dentro del subsistema “Coeficiente global de resistencia” es el siguiente:

Figura 30. Diagrama de bloques del subsistema Coeficiente global de resistencia



Fuente: Autores

Este es el desarrollo de la correlación que se sita en el capítulo de propiedades fisicoquímicas para el coeficiente global de trasferencia de calor.

- **Subsistema para el aumento del punto de ebullición**

Este subsistema calcula la temperatura de saturación del jugo de caña de azúcar en función de la presión y la concentración instantánea que se presentan dentro de cada una de las calandrias del evaporador de triple efecto en serie.

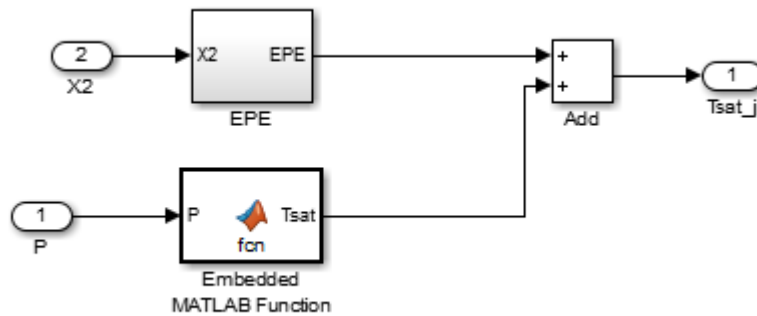
Figura 31. Subsistema de aumento del punto de ebullición



Fuente: Autores.

El diagrama de bloques dentro del subsistema “Coeficiente global de resistencia” es el siguiente:

Figura 32. Diagrama de bloques del subsistema Coeficiente Aumento del punto de ebullición global de resistencia



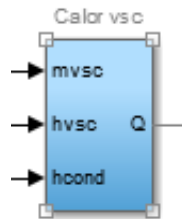
Fuente: Autores

La ecuación dentro del bloque EPE fue citada en el capítulo de propiedades fisicoquímicas, aumento del punto de ebullición. la función embebida de *Matlab* es una regresión para la temperatura de saturación del vapor de agua en función de la presión.

- Subsistema **para el calor vsc (calor de vapor saturado de calefacción)**

Este subsistema calcula el calor latente producido por el cambio de fase del vapor saturado de calefacción asumiendo que toda la masa de vapor que entra a la calandria se condensa completamente.

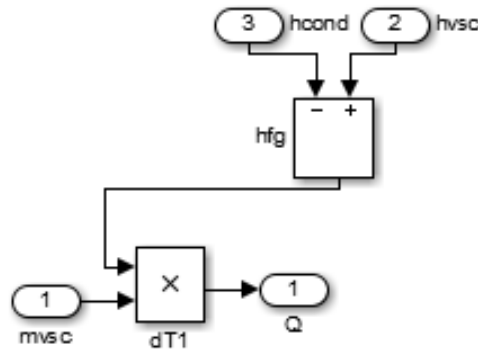
Figura 33. Subsistema de calor vsc (calor de vapor saturado de calefacción)



Fuente: Autores.

El diagrama de bloques dentro del subsistema “Calor vsc” es el siguiente:

Figura 34. Diagrama de bloques del subsistema Calor vsc



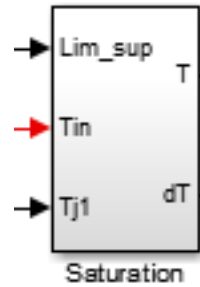
Fuente: Autores

Basado en la ecuación de calor transmitido por el intercambiador (8)

- Subsistema para la saturación

Este subsistema condiciona la temperatura de saturación del fluido, para que no sea superior a la calculada por el subsistema de aumento del punto de ebullición, ni inferior a la temperatura de entrada de jugo de caña a la calandria.

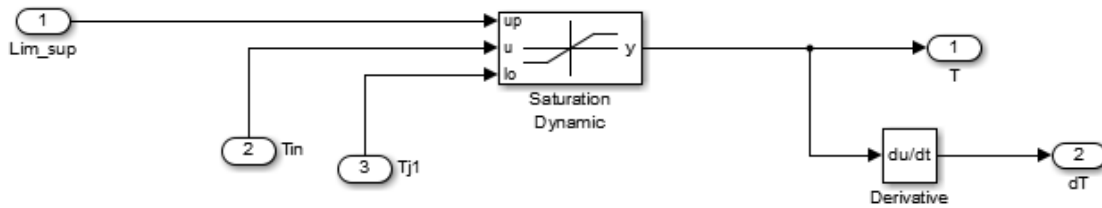
Figura 35. Subsistema de Saturación



Fuente: Autores.

El diagrama de bloques dentro del subsistema “Saturación” es el siguiente:

Figura 36. Diagrama de Saturación



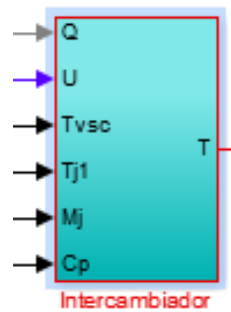
Fuente: Autores

Este bloque se desarrolló con el uso del bloque de saturación dinámica de *Simulink*, el cual permite limitar una señal por medio de otras dos señales que pueden ser constantes o variables en el tiempo, resultando como señal de salida la señal de entrada mientras no sea mayor que la señal up ni menor que la señal low, cuando lo contrario ocurra la señal se transformará en una de las señales de acotamiento según sea el caso (up o low). En este caso la señal up es la temperatura de ebullición del jugo, la cual es la temperatura máxima que se puede alcanzar a determinada presión y la señal low es una constante, y corresponde a la temperatura inicial del jugo, suponiendo de este modo que el jugo nunca se va a enfriar.

- **Subsistema de intercambiador**

Este subsistema calcula el aumento de temperatura dentro del sistema por medio de la ecuación (18), condicionada como temperatura máxima la temperatura del fluido caliente de intercambio de calor y temperatura mínima la entrada la temperatura de entrada de jugo de caña a la calandria.

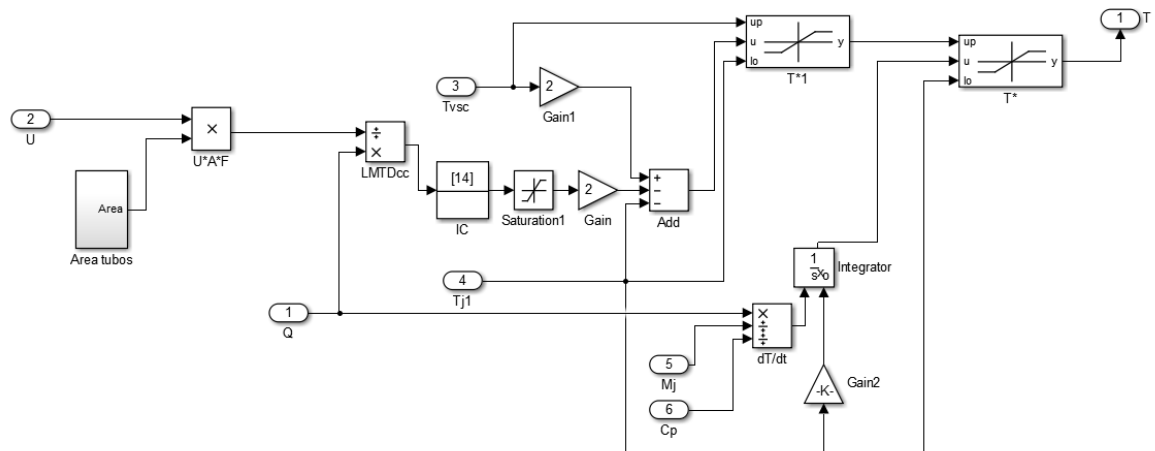
**Figura 37. Subsistema de intercambiador**



Fuente: Autores.

El diagrama de bloques dentro del subsistema “Subsistema de intercambiador” es el siguiente:

**Figura 38. Diagrama de bloques del subsistema de intercambiador**



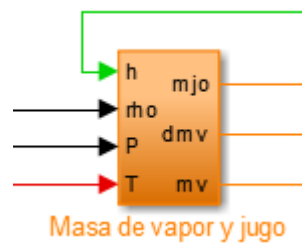
Fuente: Autores

Este diagrama de bloques también calcula el área del transferencia de los tubos al jugo de caña de azúcar.

#### 4. Masa de vapor y masa de jugo inicial

Las masas de jugo y de vapor en el evaporador están determinadas por la geometría del evaporador, para el vapor se utiliza la ecuación de estado que define los gases ideales, mientras que para el jugo por ser un líquido incompresible simplemente será el volumen por la densidad.

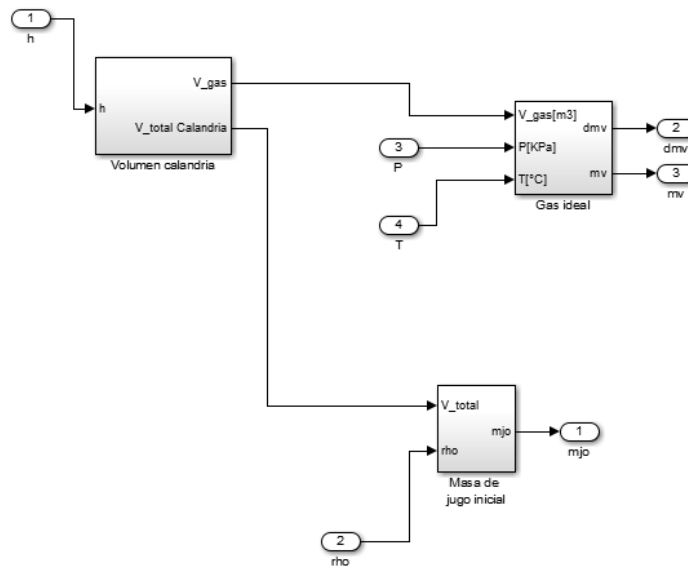
Figura 39. Masa de vapor y masa de jugo



Fuente: Autores

Para el balance de energía se requiere también la variación del vapor dentro del evaporador, por lo cual será también una señal de salida del bloque.

Figura 40. Subsistema de masa de vapor y masa de jugo



Fuente: Autores

Dentro del subsistema de masa de vapor y masa de jugo tenemos el subsistema para determinar el volumen total de la calandria, este es el que alimenta los subsistemas de “Gas ideal” y “masa de jugo inicial”, el primero usa la ecuación de gas ideal para determinar el cambio de volumen en la calandria, dato necesario para el balance de energía en estado transitorio y el segundo da el valor inicial de la masa de jugo dentro de la calandria basándose en que la altura optima de jugo dentro de la misma debe ser el 30% de su altura total.

- **Subsistema de volumen de calandria**

Este subsistema calcula el volumen total de la calandria en función de los datos de dimensiones introducidos en la interfaz GUIDE, también calcula el volumen ocupado por el vapor de agua en la calandria en función del nivel de jugo de caña instantáneo durante el modelamiento.

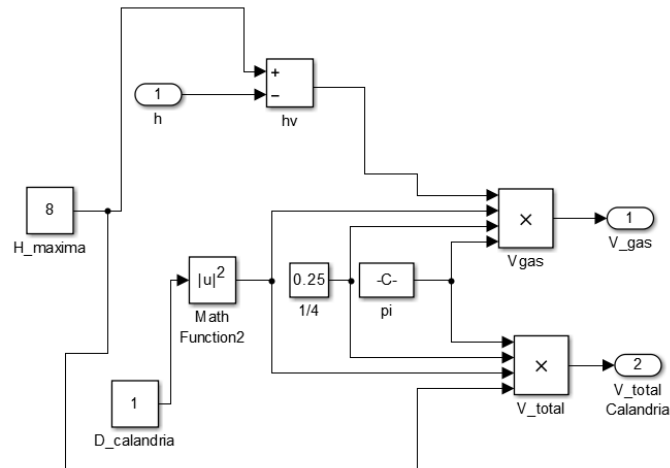
**Figura 41. Subsistema de volumen de calandria**



**Fuente: Autores**

El diagrama de bloques dentro del subsistema “Volumen calandria” es el siguiente:

Figura 42. Diagrama de bloques del subsistema Volumen calandria

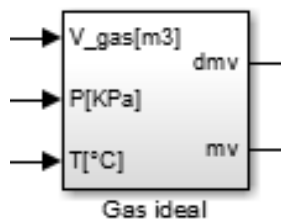


Fuente: Autores

- **Subsistema de gas ideal**

El uso de la ecuación de gas ideal (ecuación 16) es válido en este modelamiento debido a que las presiones que se presentan usualmente en las calandrias son en su mayoría menores a la presión atmosférica, luego el vapor de agua puede ser considerado gas ideal.

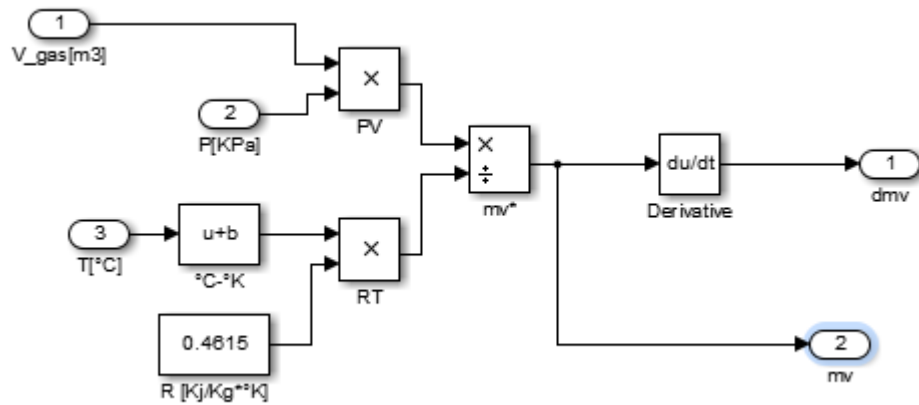
Figura 43. Subsistema de Gas ideal



Fuente: Autores

El diagrama de bloques dentro del subsistema “Gas ideal” es el siguiente:

Figura 44. Diagrama de bloques del subsistema de Gas ideal



Fuente: Autores

- **Subsistema de masa de jugo inicial**

Este subsistema calcula por medio de la consideración experimental de que la altura que se debe conservar el nivel del jugo es el 30% de la altura total de la calandria.

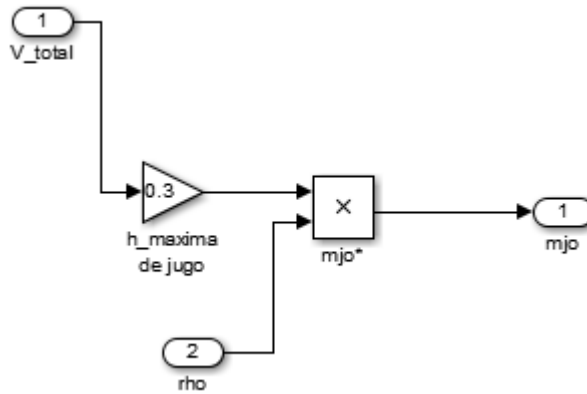
Figura 45. Subsistema de Masa de jugo inicial



Fuente: Autores

El diagrama de bloques dentro del subsistema “Masa de jugo inicial” es el siguiente:

Figura 46. Diagrama de bloques del subsistema de Masa de jugo inicial

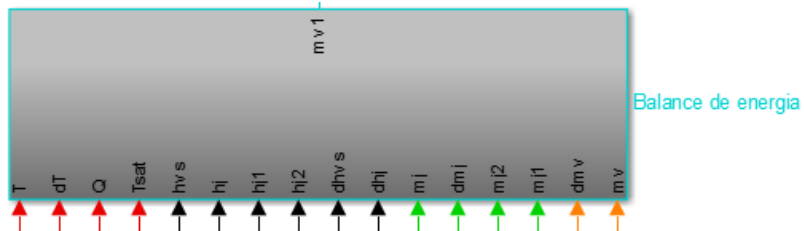


Fuente: Autores

## 5. Balance de energía

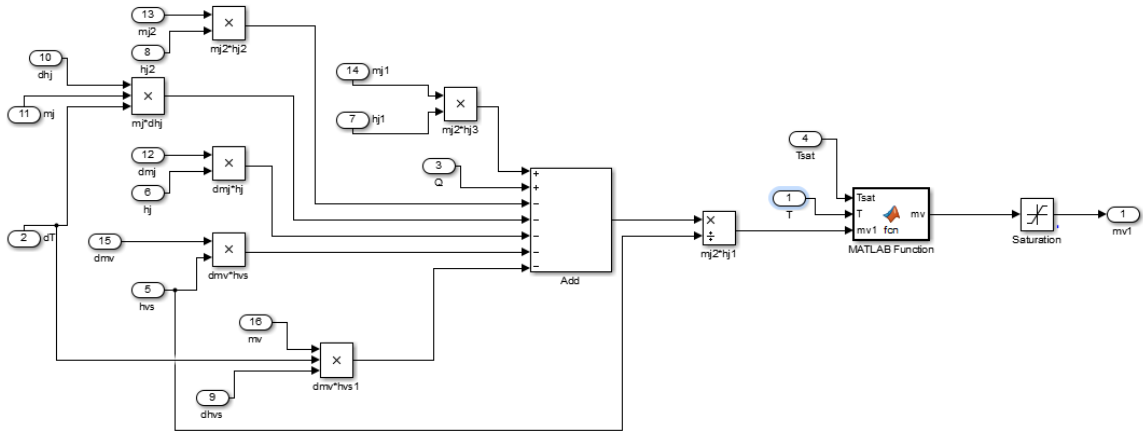
El bloque para el balance de energía es simplemente la representación en bloques de la ecuación 7, de ella se obtiene el flujo másico de vapor producido por la ebullición, sin embargo si se hace un análisis a la ecuación, ésta no tiene en cuenta si en realidad el jugo ha llegado a hervir, por este motivo a la salida de la ecuación se hace uso de condicionales para que la salida de vapor sea cero a menos que el jugo haya llegado a su punto de ebullición.

Figura 47. Balance de energía



Fuente: Autores

Figura 48. Balance de energía en bloques



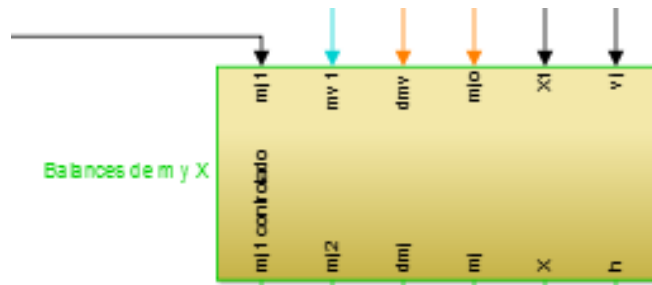
Fuente: Autores

## 6. Balance de masa y concentración

Los dos balances se encuentran dentro de un sub-sistema, esto es simplemente para no saturar tanto el programa y poder realizar más fácilmente la distribución de planta. De estos dos balances se obtiene el nivel de jugo que se mantiene dentro del evaporador, así como su variación y su altura, la masa de jugo a la salida, la cual posee un control *Fuzzy*, también se controla la masa de jugo a la entrada y la concentración final del jugo.

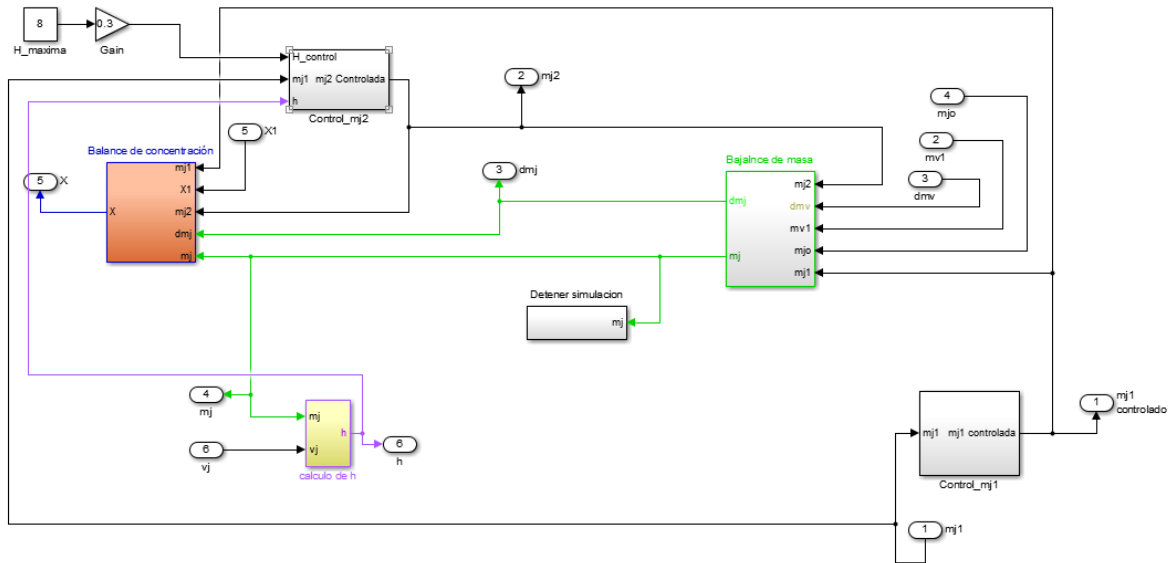
El subsistema de balance de  $m$  y  $X$  es donde difieren los dos diagramas de bloques de *Simulink* para cada uno de los modelos de simulación, más específicamente en los subsistemas de control dentro de este subsistema.

Figura 49. Balances de masa y concentración



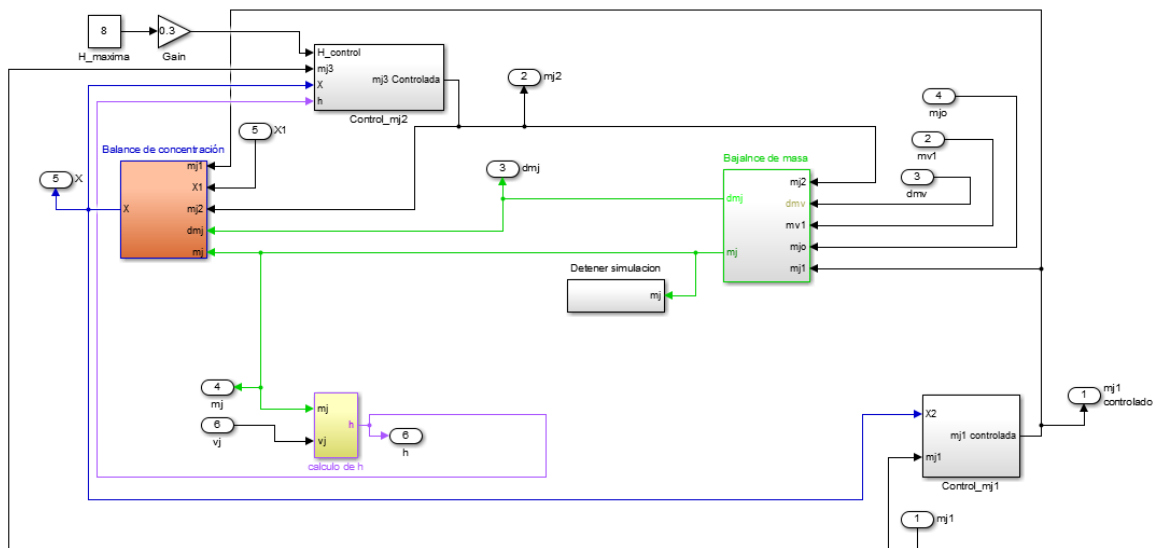
Fuente: Autores

**Figura 50. Balances de masa y concentración en bloques modelo sin control de concentración**



Fuente: Autores

**Figura 51. Balances de masa y concentración en bloques modelo con control de concentración**



Fuente: Autores

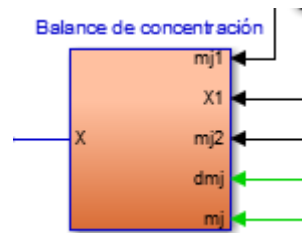
En estas dos figuras se puede apreciar todos los subsistemas que componen el balance de concentración, los controles de masa que entra y sale de los efectos,

el nivel de altura de jugo dentro de la calandria (h), el balance de masa y el subsistema que detiene la simulación.

- **Subsistema de balance de concentración**

Este subsistema se basa en la ecuación de especies o balance de concentración (ecuación 14) dada en el apartado de modelamiento matemático.

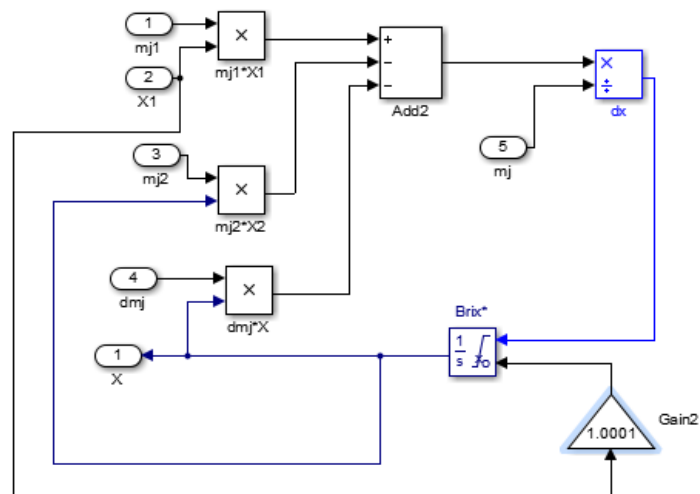
**Figura 52. Subsistema de balance de concentración**



Fuente: Autores

El diagrama de bloques dentro del subsistema “Balance de concentración” es el siguiente:

**Figura 53. Diagrama de bloques del subsistema de Balance de concentración**

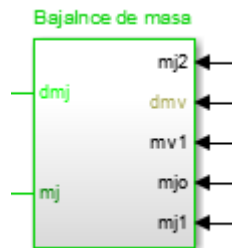


Fuente: Autores

- **Subsistema de balance de masa**

Este subsistema se basa en la ecuación de especies o balance de masa (ecuación 10) dada en el apartado de modelamiento matemático.

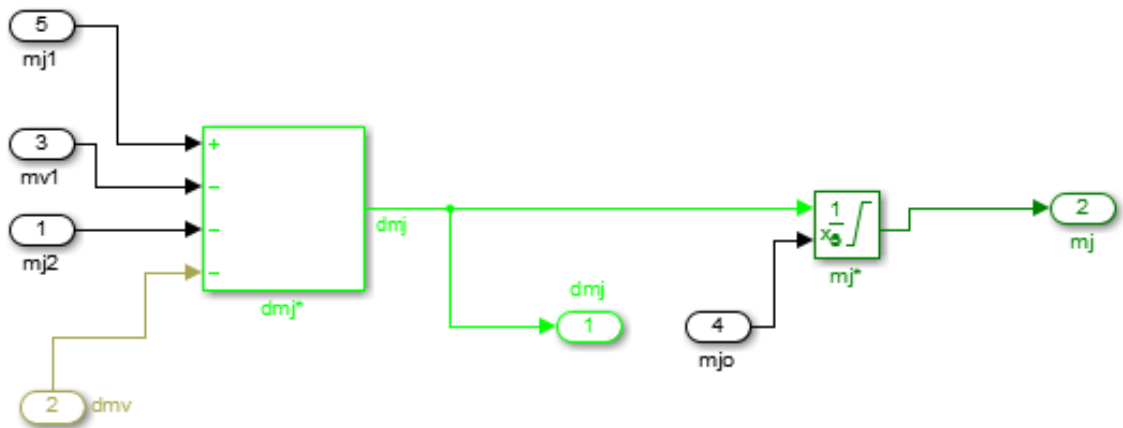
**Figura 54. Subsistema de balance de masa**



Fuente: Autores

El diagrama de bloques dentro del subsistema “Balance de masa” es el siguiente:

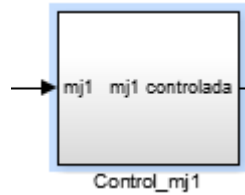
**Figura 55. Diagrama de bloques del subsistema de Balance de masa**



Fuente: Autores



**Figura 58. Subsistema de control masa de jugo de entrada**



**Fuente: Autores**

El diagrama de bloques dentro del subsistema "Control\_mj1" es el siguiente:

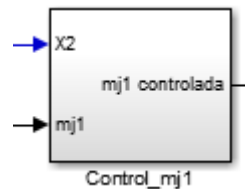
**Figura 59. Diagrama de bloques del subsistema de control\_mj1**



**Fuente: Autores**

Para el modelo con control de la concentración, las entradas se les controla una pre apertura que impida el vaciado de la calandria debido a la evaporación previa que se lleva a cabo.

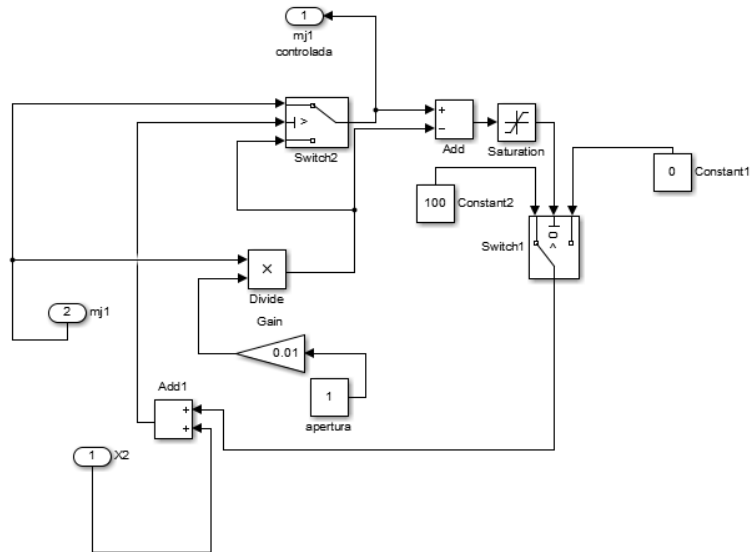
**Figura 60. Subsistema de control masa de jugo de entrada**



**Fuente: Autores**

El diagrama de bloques dentro del subsistema "Control\_mj1" es el siguiente:

Figura 61. Diagrama de bloques del subsistema de control\_mj1



Fuente: Autores

Los valores de los bloques de switch “que hacen las veces de condicionales varían según los datos suministrados en el GUIDE del programa para la salida de concentración deseada.

el diagrama de bloques está estructurado para que después de que se abra totalmente la válvula no se vuelva a cerrar posteriormente, independiente mente de la concentración.

- **Subsistema de control masa de jugo de salida**

Este subsistema varía dependiendo del modelo que se esté simulando, para el modelo simple sin control de llenado solo tienen en cuenta el control del nivel del jugo de caña dentro de la calandria, el cual se describe en la sección de control.

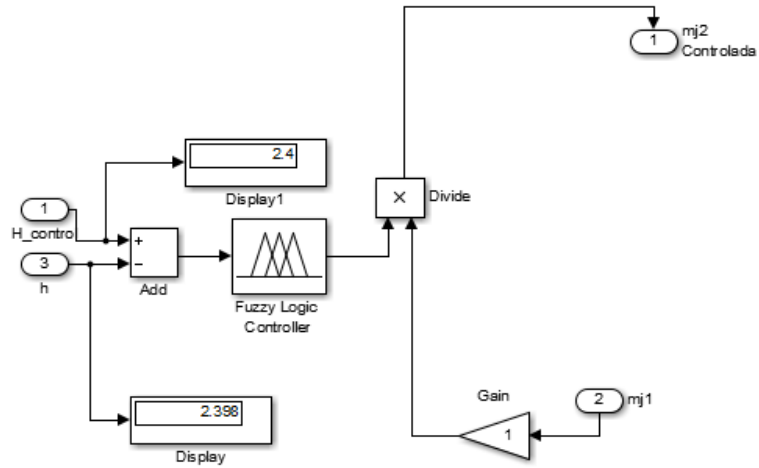
Figura 62. Subsistema de control masa de jugo de salida



Fuente: Autores

El diagrama de bloques dentro del subsistema “Control\_mj2” es el siguiente:

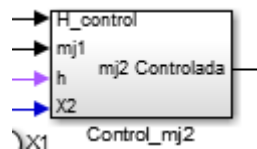
Figura 63. Diagrama de bloques del subsistema de Control\_mj2



Fuente: Autores

Para el modelo con control de la concentración, las válvulas de salida no se abrirá hasta que se llegue a la concentración establecida en la interfaz de regulación de válvulas en el GUIDE del *Simulink*.

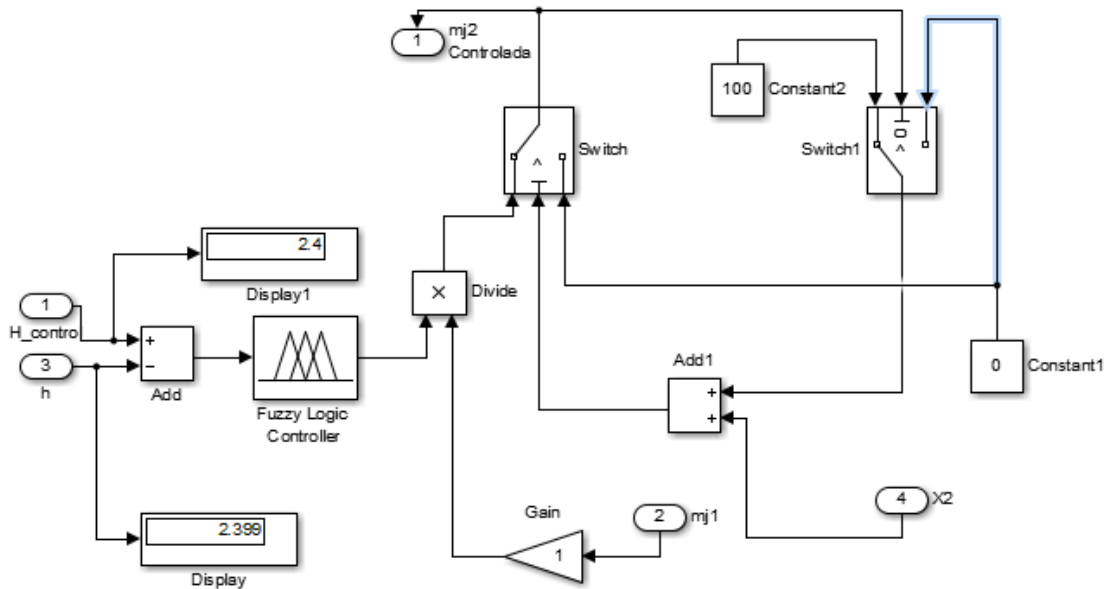
Figura 64. Subsistema de control masa de jugo de salida



Fuente: Autores

El diagrama de bloques dentro del subsistema “Control\_mj2” es el siguiente:

Figura 65. Diagrama de bloques del subsistema de Control\_mj2



Fuente: Autores

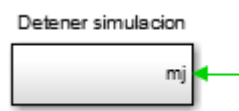
Los valores de los bloques de switch “que hacen las veces de condicionales varían según los datos suministrados en el GUIDE del programa para la salida de concentración deseada.

el diagrama de bloques está estructurado para que después de que se abra totalmente la válvula no se vuelva a cerrar posteriormente, independiente mente de la concentración.

- **Subsistema de detener simulación**

Este subsistema toma como dato de entrada la masa de jugo dentro de la calandria, y evalúa si esta baja más de un nivel crítico, si esto ocurre el sistema de bloques manda una señal positiva al bloque de detener simulación y envía un 1 en la señal de error al workspace del *Simulink* para que se active la condición que manda el mensaje de error a la interfaz GUIDE.

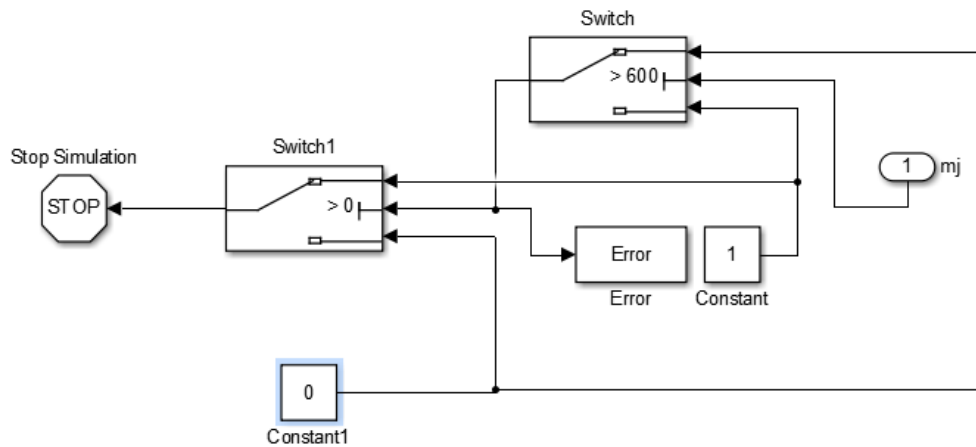
Figura 66. Subsistema de detener simulación



Fuente: Autores

El diagrama de bloques dentro del subsistema “Detener simulación” es el siguiente:

Figura 67. Diagrama de bloques del subsistema de detener simulación



Fuente: Autores

El nivel crítico de masa permitido varía dependiendo si se evalúa el modelo simple o el modelo de control de concentración, para el modelo simple se permite que el jugo llegue hasta 400 kilogramos y para el modelo con control de concentración 600 kilogramos como nivel crítico.

## 7. Salidas

Estos bloques sacan los datos de cada uno de los sub-sistemas del modelo, y permite que puedan ser usados por otros bloques o subsistemas del modelo.

Figura 68. Salidas del sistema

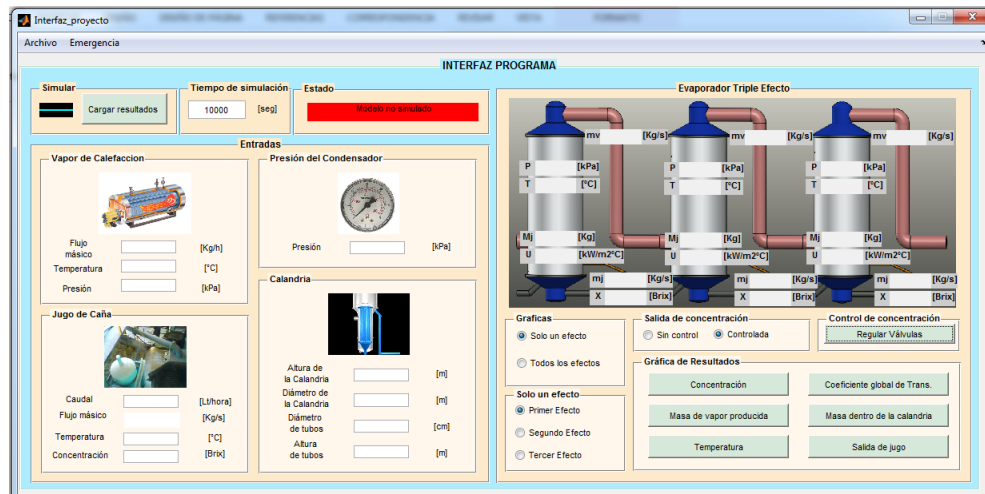


Fuente: Autores

## 5. INTERFAZ GUIDE

Como medio de interacción entre el usuario y la simulación se elaboró una interfaz GUIDE en *Matlab*, en esta se introducen los datos necesarios para el modelamiento del sistema, y como resultados se obtienen los estados de cada una de las calandrias en estado estable, las gráficas desde el arranque del sistema hasta su estabilización para todos o cada uno de los efectos y dos tipos se modelamientos para el sistema de triple efecto en serie, uno en el cual se lleva a cabo normalmente y otro controlando la salida mínima de concentración en cada calandria.

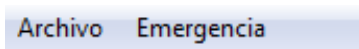
Figura 69. Evaporador tipo calandria



Fuente: Autores

### 5.1 MENÚ DE LA INTERFAZ

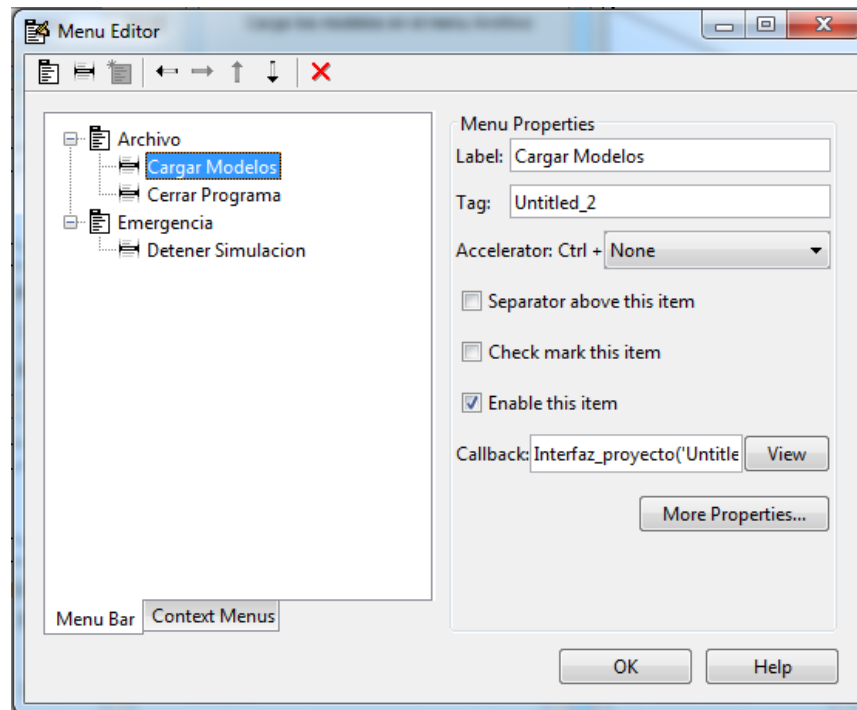
Figura 70. Menú de la interfaz



Fuente: Autores

Este menú ayuda a inicializar o cargar los modelos a trabajar, cerrar la interfaz y detener la simulación del modelo, está dividido en archivo y emergencia

Figura 71. Menú Editor



Fuente: Autores

### 5.1.1 Archivo

Esta sección es la que contiene la función para cargar los ficheros de *Simulink* que se usaran para la simulación de los modelos con la opción “Cargar modelos” o salir de la interfaz con la opción “Cerrar programa”

La programación de cargar modelos es la siguiente:

```
% Función que activa el comando "cargar modelos"  
function Untitled_2_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
% Busca y abre todos los modelos de simulinks y control para este programa
```

```
fuzzy Control_mj1  
find_system('name','simul_calandria_Sincontrol_llenado');  
open_system('simul_calandria_Sincontrol_llenado');
```

```
fuzzy Control_mj2
```

```

find_system('name','simul_calandria_control_llenado');
open_system('simul_calandria_control_llenado');
open_system('flujo_masa');

%inicialización de variables
%inicializa las variables en la interfaz

handles.control=1;
handles.v=1;
handles.efecto=1;
handles.sim1=0;
handles.sim2=0;

%guarda y exporta las variables inicializadas
guidata(hObject,handles);

%cambia el argumento en el static text del panel de estados a "Modelos
%Cargados
set(handles.text101,'string','Modelos Cargados')

```

La programación de “Cerrar programa” es la siguiente:

```

% Función que activa el comando "cerrar programa"
function Untitled_3_Callback(hObject, eventdata, handles)

%comando para cerrar la interfaz
close Interfaz_proyecto

```

### 5.1.2 Emergencia

Esta sección es la que contiene la función para detener la simulación de los modelos de *Simulink* en el caso que entren en un bucle infinito o cualquier otro problema con la opción “Detener simulación” y su programación es la siguiente:

```

% Función ejecutada por detener simulación
function Untitled_5_Callback(hObject, eventdata, handles)

% Detiene la simulación del simulink y lo indica en el panel de estado,
% poniendo en este "Simulación detenida" y tornándolo rojo

set_param(gcs, 'SimulationCommand', 'Stop');
set(handles.text101,'string','Simulación Detenida')

```

```
set(handles.text101,'BackgroundColor','red')
```

## 5.2 PANELES

Figura 72. Paneles



Fuente: Autores

En estos paneles dividen la interfaz en diferentes eventos como establecer las entradas al sistema, muestra de resultados, el estado del sistema en momentos específicos, la inicialización de la simulación del modelo y algunas imágenes de visualización.

La programación de las imágenes se da en la apertura del programa GUIDE, es la siguiente:

Esta función se ejecuta después de que la interfaz se hace visible:

```
function Interfaz_proyecto_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
```

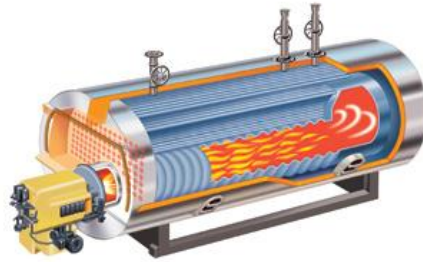
```
handles.output = hObject;  
guidata(hObject, handles);
```

```
% Toma la imagen a la variable img_estable de la misma carpeta del programa
```

```
img_estable=imread('estable.PNG');  
%Fuente: Autores  
axes(handles.axes6)  
imshow(img_estable)
```

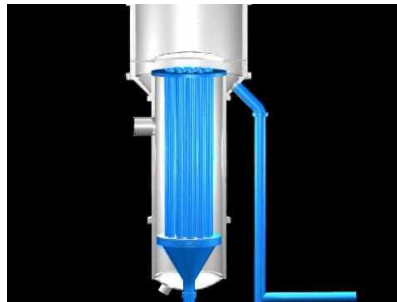
El proceso para las demás imágenes es similar, a continuación se dará la fuente de cada una de ellas:

**Figura 73. Caldera de vapor**



Fuente: <http://www.empresaeiciente.com/es/catalogo-de-tecnologias/calderas>

**Figura 74. Dimensiones**



Fuente: <http://informaciona.com/evaporador-de-simple-efecto/videos>

**Figura 75. Manómetro**



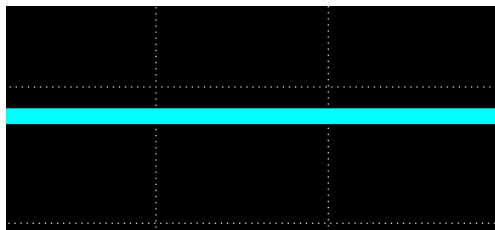
Fuente: <http://www.directindustry.es/prod/watts-water-technologies/manometros-tubo-bourdon-26077-378839.html>

**Figura 76. Jugo de caña**



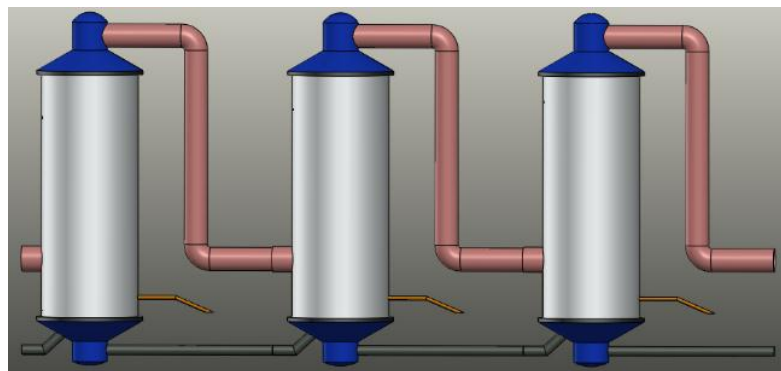
Fuente: <http://los-divinos.over-blog.es/article-30911819.html>

**Figura 77. Simulación**



Fuente: Autores

**Figura 78. Efectos**



Fuente: Autores

## 5.2.1 Panel de entradas

Figura 79. Panel entradas

The image shows a software interface titled "Entradas" (Inputs). It is organized into four distinct panels, each with a title and an icon:

- Vapor de Calefaccion:** Includes an icon of a boiler. It has three input fields: "Flujo másico" (Kg/h), "Temperatura" (°C), and "Presión" (kPa).
- Presión del Condensador:** Includes a pressure gauge icon. It has one input field: "Presión" (kPa).
- Jugo de Caña:** Includes an icon of sugarcane juice processing. It has four input fields: "Caudal" (Lt/hora), "Flujo másico" (Kg/s), "Temperatura" (°C), and "Concentración" (Brix).
- Calandria:** Includes an icon of a heat exchanger. It has four input fields: "Altura de la Calandria" (m), "Diámetro de la Calandria" (m), "Diámetro de tubos" (cm), and "Altura de tubos" (m).

Fuente: Autores

En este panel se introducen las entradas necesarias del sistema que se desea simular, tales como los datos del vapor de calefacción (flujo másico, temperatura, presión), del jugo de la caña disponible (caudal, temperatura, concentración), la presión del condensador y las dimensiones de la calandria (altura y diámetro de la calandria, diámetro y altura de los tubos).

Paneles de entrada

- Panel de vapor de calefacción.
- Panel de jugo de caña.
- Panel de presión de condensador.
- Panel de calandria.

Los datos se introducen en los "edit text" dentro de cada panel, estos espacios actualizan los valores de las entradas en el *Simulink*, la programación de los "edit text" es la siguiente:

%Ejecuta su función cuando el edit text recibe un valor

```
function edit6_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

%toma el valor del string (escritura) introducido el en edit text  
%y lo almacena en la variable handles.presión

```
handles.presion=get(hObject,'string');
```

%cambia el valor de handles.sim 1 y 2 a 0, esto es para indicar que se  
%cambio el sistema (los datos respecto al anterior) a modelar.

```
handles.sim1=0;  
handles.sim2=0;
```

%cambia el argumento (string) en el static text en el panel de estado a  
%"modelo no simulado" y cambia su color a rojo.

```
set(handles.text101,'string','Modelo no simulado')  
set(handles.text101,'BackgroundColor','red')
```

%guarda los datos y los exporta en el sistema  
guidata(hObject,handles);

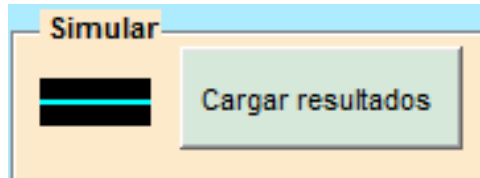
%envía los datos al simulink, justo a las rutas descritas en el sistema,  
%subsistemas y bloques y cambia el parámetro elegido por el valor de la  
%variable establecida

```
set_param('simul_calandria_Sincontrol_Llenado/Presiones/presion','Value',handles.  
presion);  
set_param('simul_calandria_control_Llenado/Presiones/presion','Value',handles.pre  
sion);
```

Los demás “edit text” presentan una programación similar.

## 5.2.2 Panel de simulación

Figura 80. Panel simulación



Fuente: Autores

Este panel simula el modelo para las entradas establecidas y introduce los resultados en los “static text” ubicados en la imagen de el evaporador de triple efecto en serie que se encuentra en el panel de resultados.

La programación del botón “cargar resultados” es la siguiente:

% Función que realiza la operación del botón "Cargar resultados"

```
function pushbutton10_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
% Cambia el argumento (string) en el “static text” en el panel de estado a  
%"Simulando modelo" y cambia su color a amarillo.
```

```
set(handles.text101,'string','Simulando el modelo')  
set(handles.text101,'BackgroundColor','yellow')
```

```
% Determina qué modelo simular de acuerdo a lo que quiera el usuario, el  
% primer modelo es el normal y el segundo es con la salida de concentración  
% controlada
```

```
if handles.control==1  
sim('simul_calandria_Sincontrol_llenado');  
else  
sim('simul_calandria_control_llenado');  
end
```

```
% Si la variable "Error" que se encuentra en cada uno de los efectos toma  
% un valor de 1, es decir que fue positiva, el programa se detendrá y  
% cambiara el argumento (string) en el “static text” en el panel de estado a
```

%"Simulación Detenida" y cambia su color a rojo.

```
if Error==1 || Error2==1 || Error3==1
errordlg('El flujo de masa de vapor de calefaccion es muy elevado','Vaciado de las
calandrias')
set(handles.text101,'string','Simulacion Detenida')
set(handles.text101,'BackgroundColor','red')
```

else

%si la variable "Error" no es positiva (1) en ningún momento terminara con  
%éxito la simulación y cambiara el argumento (string) en el "static text"  
%en el panel de estado a "Simulación Completa" y cambia su color a verde,  
%de acuerdo al modelo que haya sido elegido por el usuario.

```
if handles.control==1
handles.sim1=1;
set(handles.text101,'string','Simulacion Completa')
set(handles.text101,'BackgroundColor','green')
else
handles.sim2=1;
set(handles.text101,'string','Simulacion Completa')
set(handles.text101,'BackgroundColor','green')
```

end

end

%guarda los datos y los exporta en el sistema  
guidata(hObject,handles);

%envía las propiedades a los "static text" sobre el axes

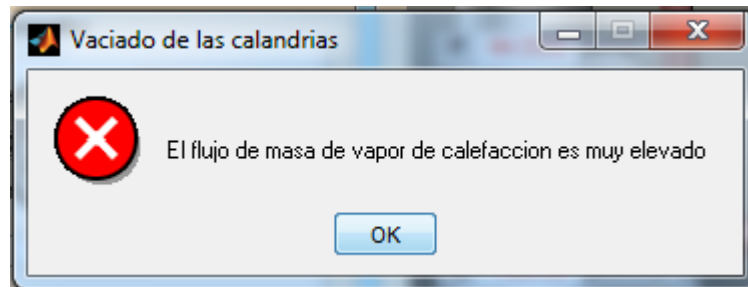
%Propiedades primer efecto

```
set(handles.text25,'string',Mj_1);
set(handles.text47,'string',U_1);
set(handles.text28,'string',mv_1);
set(handles.text24,'string',T_1);
set(handles.text27,'string',X_2);
set(handles.text26,'string',mj_2);
set(handles.text23,'string',P1);
```

Para los otros efectos es similar la manera de enviar las propiedades al "edit text"  
Si durante la simulación la variable "Error" toma un valor de 1 y se detiene la  
simulación aparece el siguiente cuadro de dialogo, que indica el posible problema

que ocurre, debido a que el subsistema “Detener simulación” se encuentra en la línea de masa de jugo de caña dentro de la calandria, en el programa se asume que la única manera en que se vaciara la calandria seria con un exceso de masa de vapor de calefacción en relación con la masa de jugo de entrada.

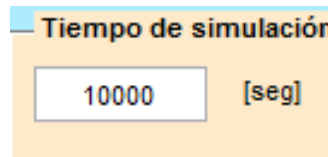
Figura 81. Cuadro de dialogo de error



Fuente: Autores

### 5.2.3 Panel de tiempo de simulación

Figura 82. Panel de tiempo de simulación



Fuente: Autores

En este panel se puede establecer el tiempo de duración de la simulación intruduciendo su valor en un “edit text”.

La programacion de este “edit text”es :

%Función de el "edit text" del tiempo de simulación.

```
function edit12_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
%Toma el valor del argumento (string) escrito en el edit text y lo almacena  
%en la variable handles.time
```

```

handles.time=get(hObject,'string');

%manda al simulink a la opción de Stop Time el valor de la variable
%handles.time

set_param('simul_calandria_Sincontrol_Llenado', 'StopTime',handles.time);
set_param('simul_calandria_control_Llenado', 'StopTime',handles.time);

%establece que el nuevo sistema no ha sido simulado
handles.sim1=0;
handles.sim2=0;

%guarda los y los exporta al sistema
guidata(hObject,handles);

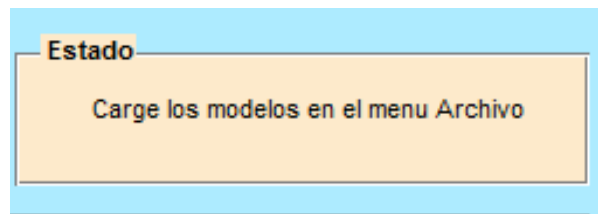
% Cambia el argumento (string) en el "static text" en el panel de estado a
%"Modelo no Simulado" y cambia su color a rojo.

set(handles.text101,'string','Modelo no simulado')
set(handles.text101,'BackgroundColor','red')

```

#### 5.2.4 Panel de estado

Figura 83. Panel de estado



Fuente: Autores

Este panel indica el estado del sistema para algunos tiempos específicos por medio de un "static text"

La programación del "static text" se desarrolla por medio de comandos set y de condición "if" en la programación de la interfaz.

Un ejemplo seria:

```

% Cambia el argumento (string) en el "static text" en el panel de estado a
%"Simulando modelo" y cambia su color a amarillo.

set(handles.text101,'string','Simulando el modelo')

```

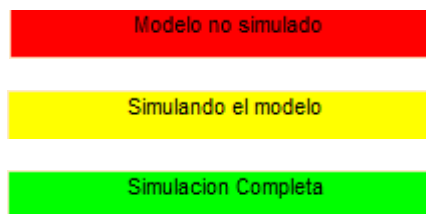
```
set(handles.text101,'BackgroundColor','yellow')
```

o con “if”

```
if handles.control==1  
handles.sim1=1;  
set(handles.text101,'string','Simulacion Completa')  
set(handles.text101,'BackgroundColor','green')  
else
```

Los dos ejemplos usados en el botón de “cargar resultados”

**Figura 84. Ejemplos de la barra de estados**

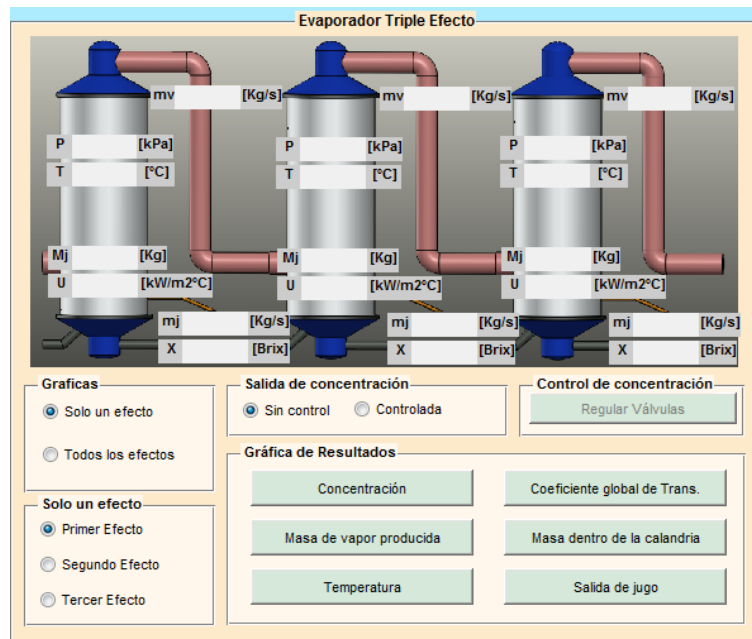


Fuente: Autores

### 5.2.5 Panel de resultados

Este panel presenta muchas funciones como mostrar los resultados en estado estable del modelo y las gráficas de los resultados desde el arranque hasta su estabilidad, para todos o cada uno de los efectos según el “radio button” seleccionado, también permite escoger entre dos modelos diferentes, uno en el cual el sistema se modela normalmente y otro en el cual se establece la salida mínima de concentración en cada efecto, este segundo también presenta una opción de control de la concentración en donde se puede regular algunas de las aperturas de las válvulas y la salida de concentración mínima de cada efecto.

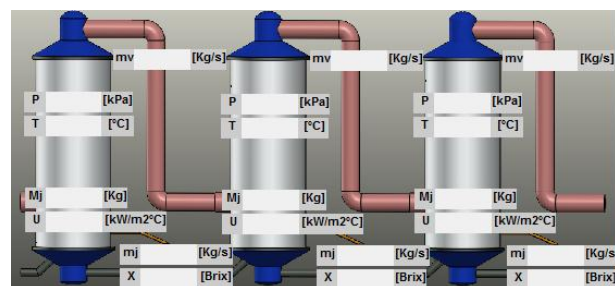
Figura 85. Panel de resultados



Fuente: Autores

### a) Valores de estabilidad del sistema

Figura 86. Panel de valores de estabilidad del sistema



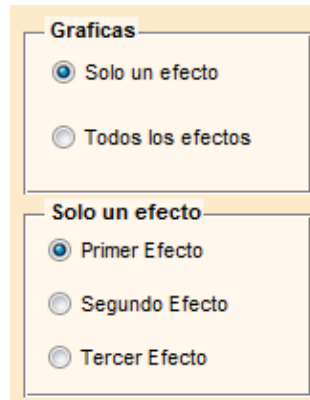
Fuente: Autores

### b) Buttom group de “Gráficas” y “Solo un efecto”

Para mostrar los datos de estabilidad del sistema el panel usa “staic text” ubicados sobre un axes, la programación que hace este proceso fue explicada en la parte de “Panel de tiempo de simulación”.

Para mostrar los resultados de las gráficas el panel se basa en “radio buttoms” ubicados en dos “buttom group”

Figura 87. buttom group de “Gráficas” y “Solo un efecto”



Fuente: Autores

Este conjunto especifica si se desea ver solo una gráfica de un efecto específico o ver los resultados de todos los efectos.

Los “buttom group” tienen la siguiente programación:

```
% Esta es la función del buttom group de graficas
function uipanel6_SelectionChangeFcn(hObject, eventdata, handles)

% Condición si se escoge el radio buttom de un solo efecto para que la
% variable handles.v tenga un valor de 1 y se habiliten los radio buttoms
% de los efectos en el buttom group "solo un efecto"
if hObject == handles.solo
    handles.v=1;
    set(handles.primer,'Enable','on');
    set(handles.segundo,'Enable','on');
    set(handles.tercer,'Enable','on');
else

% Condición si se escoge el radio buttom de todos los efecto para que la
% variable handles.v tenga un valor de 2 y se deshabiliten los radio
% buttoms de los efectos en el buttom group "solo un efecto"

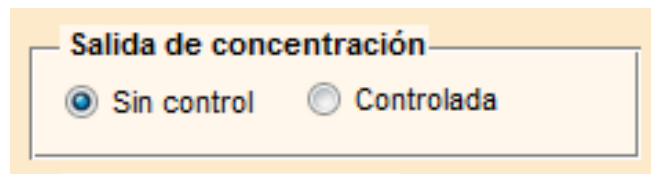
    handles.v=2;
    set(handles.primer,'Enable','off');
    set(handles.segundo,'Enable','off');
    set(handles.tercer,'Enable','off');
end
%guarda y exporta los datos al sistema
guidata(hObject,handles);
```

La programación del button group “solo un efecto” es similar a esta, pero esta no deshabilita ni habilita nada, y almacena valores de 1 o 2 a la variable handles.efecto.

Para determinar el tipo de modelo a simular (con control de concentración o sin control de concentración), se usan los radio buttons ubicados en el button group “Salida de concentración”

### c) Button group de “Salida de concentración”

Figura 88. button group “Salida de concentración”



Fuente: Autores

La programación del button group “Salida de concentración” es similar a la del button group “graficas”, incluye la habilitación y rehabilitación del botón regular válvulas dependiendo si es requerido (modelo con concentración controlada), que es similar a lo echo en el button group “graficas”, El button group “Salida de concentración” también modifica el panel “estado” del modelo, indica si el modelo que se está seleccionando se ha o no simulado.

Su programación es la siguiente:

```
% la variable handles.sim indica si ya se simulo el modelo 1 o 2  
%(valor 1 modelo simulado)
```

```
if handles.sim1==1  
    set(handles.text101,'string','Simulacion Completa')  
    set(handles.text101,'BackgroundColor','green')  
else  
    set(handles.text101,'string','Modelo no simulado')  
    set(handles.text101,'BackgroundColor','red')  
end
```

Los comandos que cambian el argumento y color del static text del panel de estado ya se han definido con anterioridad.

## **Variables para los comandos condicionales**

Estas variables `handles.v` `handles.efecto` y `handles.control` son usadas por los comandos condicionales “if” para determinar el tipo de modelo que se simulara o si se desea ver la gráfica de todos o un solo efecto, y sea el segundo caso cual efecto.

### **handles.v:**

- Si toma valor de 1 se indica que se desea ver las gráficas de un efecto en particular.
- Si toma valor de 2 se indica que se desea ver las gráficas de todos los efectos juntas.

### **handles.efecto:**

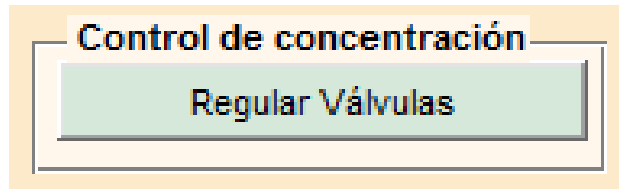
- Si toma valor de 1 se indica que se desea ver las gráficas del primer efecto.
- Si toma valor de 2 se indica que se desea ver las gráficas del segundo efecto.
- Si toma valor de 3 se indica que se desea ver las gráficas del tercer efecto.

### **handles.control:**

- Si toma valor de 1 se indica que se desea modelar el sistema sin control de concentración.
- Si toma valor de 2 se indica que se desea modelar el sistema con control de concentración.

## **d) Panel de control de concentración**

Figura 89. Panel de control de concentración



Fuente: Autores

Este botón está programado para abrir la interfaz de regulación de válvulas, la cual permite la entrada de valores para establecer parámetros como los niveles de concentración mínimos de salida y nivel inicial de apertura en las válvulas de entrada de jugo para los efectos. Este es solo necesario para el modelamiento del sistema con control de concentración, en caso de que se quiera modelar el sistema normal se desactiva, su programación es muy simple:

% Función que se ejecuta con el botón de control de válvulas

```
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

% abre la interfaz Regular válvulas

Regular\_valvulas

% Establece que la simulación del modelo 2 (simulación con control de llenado)  
% ya no está simulada, en el panel de estado

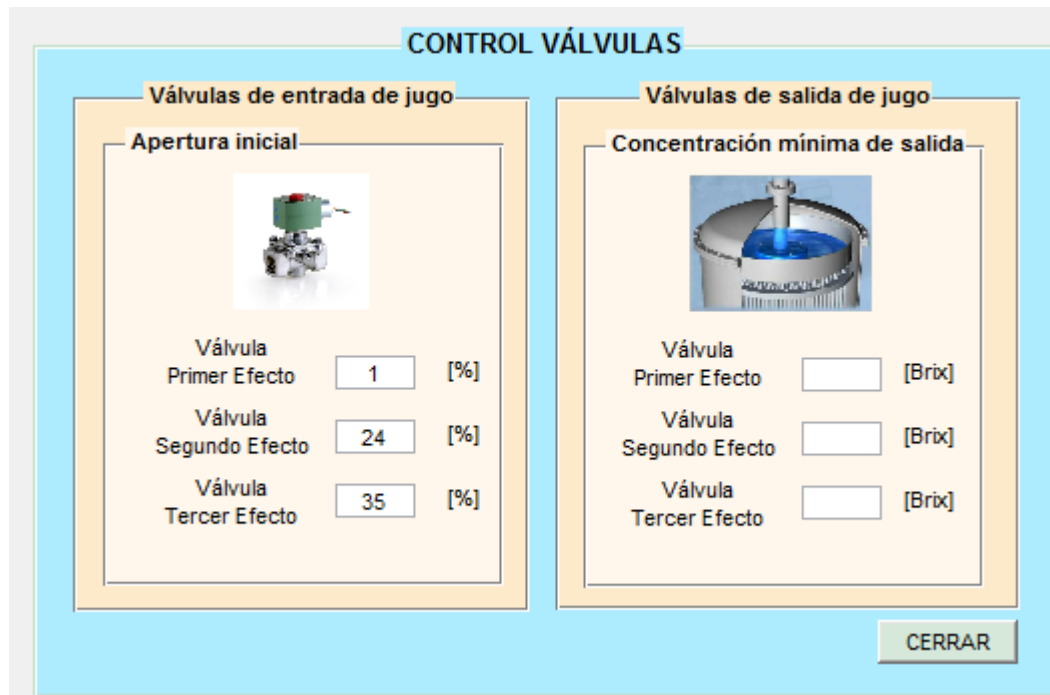
```
handles.sim2=0;
```

```
set(handles.text101,'string','Modelo no simulado')
```

```
set(handles.text101,'BackgroundColor','red')
```

#### e) Interfaz de regulación de válvulas

Figura 90. Interfaz de regulación de válvulas



Fuente: Autores

Esta interfaz es similar a la del “panel de entrada” en la interfaz del programa, cambia los valores de entrada de los bloques del *Simulink*, pero a diferencia del panel de entrada este modifica los valores denominados como apertura inicial de las válvulas de entrada de jugo para cada uno de los efectos y la concentración mínima de salida de las válvulas de salida de jugo para cada uno de los efectos.

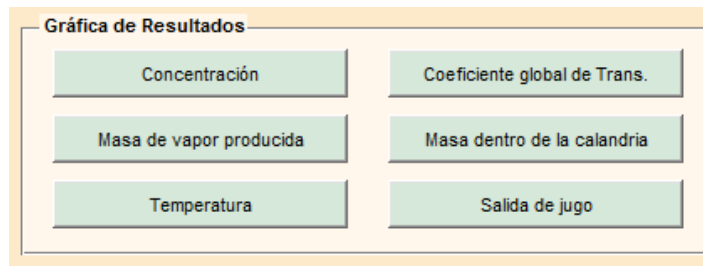
Su función se da en la introducción de valores en los “edit text” al igual que el “panel de entradas”, por eso presenta una programación similar que se puede revisar en esa sección.

Para visualizar los resultados gráficos se utilizan los botones ubicados en el panel resultados gráficos, cada uno de los botones especifica la gráfica de un estado determinado:

- Concentración.
- Masa producida.
- Temperatura.

- Coeficiente global de transferencia de calor.
- Masa dentro de la calandria.
- Salida de jugo.

Figura 91. Panel de Gráfica de resultados



Fuente: Autores

La programación de estos botones es la siguiente:

% Función que se ejecuta con el botón "Salida de jugo"

```
function pushbutton7_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
%Salida de jugo
```

```
% Determina si se eligió graficar un efecto específico o todos con la  
% variable handles.v
```

```
switch handles.v
```

```
% Si se escogió uno en particular se determina cual con la variable  
%handles.efecto
```

```
case 1
```

```
switch handles.efecto
```

```
case 1
```

```
% Si se escogió por ejemplo el primer efecto el programa abre el scope
```

```
% producido por el simulink correspondiente a esta gráfica
```

```
grafica = strcat (handles.modelo, '/', 'mj2');
```

```
open_system(grafica);
```

```
case 2
```

```
grafica = strcat (handles.modelo, '/', 'mj3');
```

```
open_system(grafica);
```

```
case 3
```

```

grafica = strcat (handles.modelo, '/', 'mj4');
open_system(grafica);

end
case 2
% Si se escogió todos los efectos el abre el programa scope producido por el
% simulink correspondiente a esta grafica
grafica = strcat (handles.modelo, '/', 'mj salidas');
open_system(grafica);

end

%escribe en los ejes de las gráficas los datos correspondientes y le pone
%el titulo

xlabel ('mj [Kg/s] vs Tiempo [seg]')
ylabel ('mj [Kg/s]')
title ('Salida de jugo')

```

Todos los botones presentan una programación similar.

## 6. CONTROL

El control es un elemento clave para el modelamiento del sistema de evaporación de triple efecto en serie, este tiene la tarea de cumplir con la condición de funcionamiento de la calandria, la cual indica que su nivel de jugo debe estar siempre más o menos a un 30% de la altura total de la misma, esta condición se cumple por medio de unas válvulas con apertura y cierre proporcional controladas por sensores de nivel y concentración, el método de control utilizado para el modelamiento fue el *Fuzzy*.

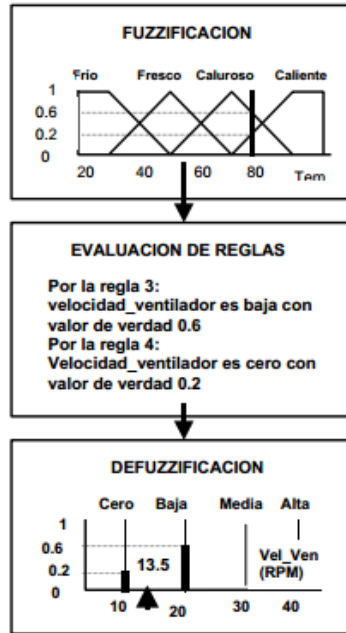
### 6.1 CONTROL FUZZY

La lógica difusa pretende evaluar diversos procesos, en su mayoría muy complejos, basándose en la manera como el ser humano percibe las cosas, contrario a la lógica tradicional no busca una expresión exacta para describir cada proceso, esto le permite procesar información que contiene datos con un alto nivel de imprecisión y a pesar de ello obtener resultados con un alto grado de confiabilidad.

La necesidad de trabajar con conjuntos difusos surge del hecho que existen conceptos que no tienen límites claros. Un conjunto difuso se encuentra asociado por un valor lingüístico que está definido por una palabra, etiqueta lingüística o adjetivo. En los conjuntos difusos de pertenencia pueden tomar valores del intervalo 0 y 1, y la transición del valor entre cero y uno es gradual y cambia de manera instantánea como pasa con los conjuntos claro [2].

Para la implementación de un control difuso se deben formular una serie de reglas y funciones que definen las variables de entrada y salida y se comprueba si la salida es la deseada, si esto no ocurre se deben cambiar los parámetros por medio de un ajuste fino. Estos parámetros incluyen El universo de discurso de las variables, los valores de pico de las funciones de membresía, las reglas y el traslape de los conjuntos difusos.

Figura 92. Ejemplo de lógica difusa

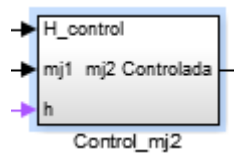


Fuente: [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lmt/ramirez\\_r\\_o/capitulo3.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lmt/ramirez_r_o/capitulo3.pdf)

## 6.2 IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROL FUZZY EN EL MODELO

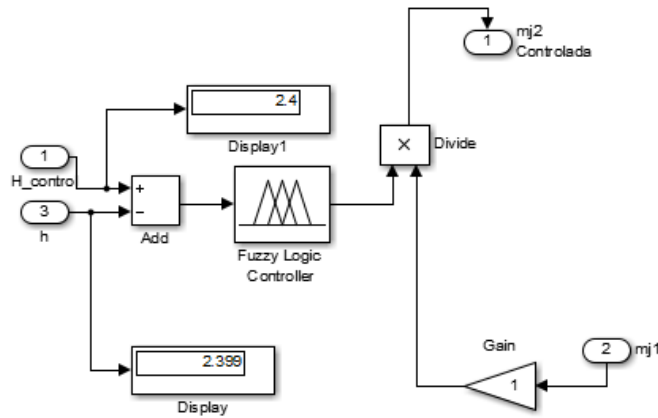
El control se implementó para controlar el nivel de altura de jugo en la calandria, la condición fue que este no podía exceder el 30% de la altura total de la calandria, este control se usó en los dos modelos, tanto el de control de concentración como el modelo simple, el subsistema de control está ubicado en el subsistema de balance de masa y concentración, se controla la salida de masa de jugo en función del error de altura recibido en el *Fuzzy*.

Figura 93. Subsistema de control de mj2



Fuente: Autores

**Figura 94. Control de mj2**

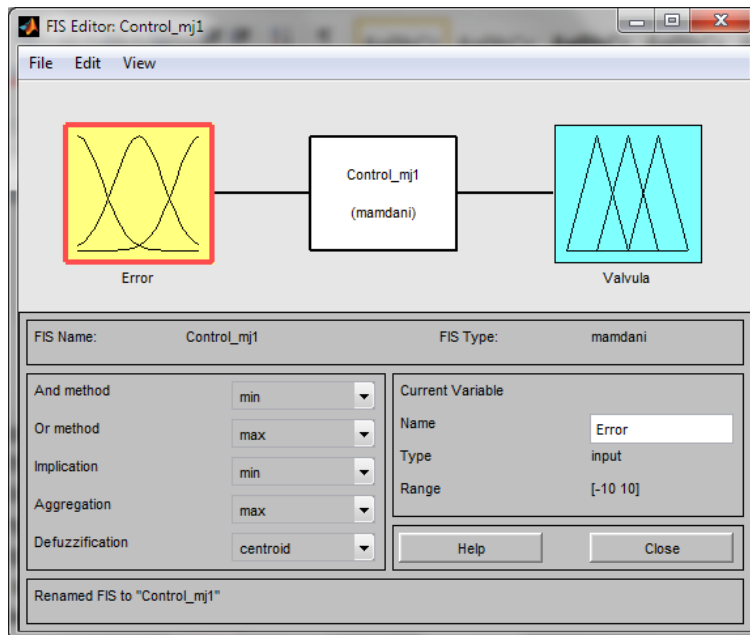


**Fuente: Autores**

De esta manera el control regula la salida de jugo de caña de acuerdo a la diferencia que exista entra la altura de referencia y la actual en el modelamiento, este sería el error, el cual el control tratara de llevarlo a cero.

Esta es la ventana del control *Fuzzy*, es donde se dan los parámetros de control, consta de 3 pasos, parametrizar el input(error) y el output(válvula), y establecer las reglas de control *Fuzzy*(control\_mj1)

**Figura 95. Ventana de parametrización del control *Fuzzy***



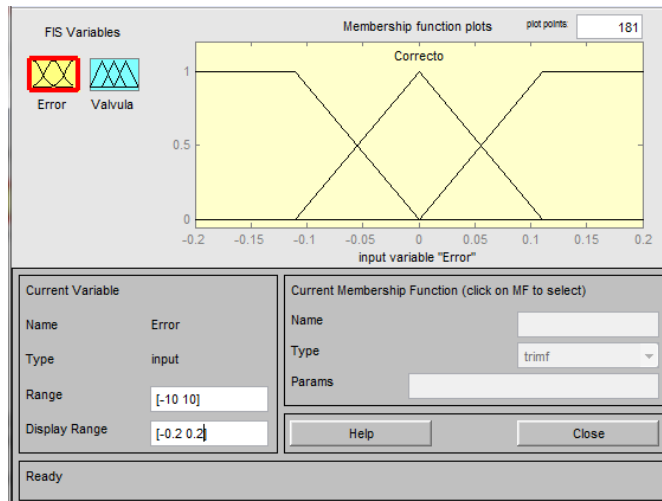
**Fuente: Autores**

Para parametrizar el input(Error) o entrada de control se va a la ventana de input (clic sobre el input), hay se establece los estados que sean necesarios, para el control del nivel se establecieron tres:

- Encima (-10 a 0).
- Correcto (-0.1 a 0.1).
- Debajo (0 a 10).

Encima indica que el nivel se encuentra en un rango muy arriba de la referencia, debajo indica que el nivel se encuentra en un rango muy bajo de la referencia, y correcto que el nivel se encuentra en un rango aceptable, el control sabe el en qué estado se encuentra el sistema por medio de la diferencia entre la altura de referencia y el nivel actual en el modelamiento.

**Figura 96. Ventana de parametrización del input(Error)**

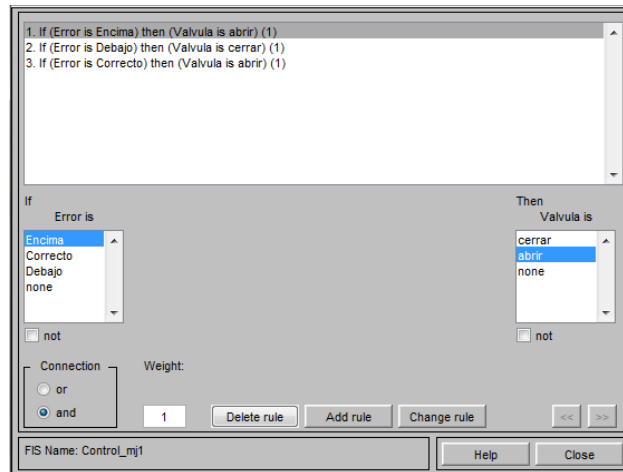


**Fuente: Autores**

Para elaborar las reglas se va a la ventana de reglas del control *Fuzzy* (clic sobre el control\_mj1), hay se establece las reglas de acuerdo a la necesidad del modelo, para este fueron necesarias tres reglas.

- Si Error es igual a Encima, la salida output(Válvula) será abrir.
- Si Error es igual a Debajo, la salida output(Válvula) será cerrar.
- Si Error es igual a Correcto, la salida output(Válvula) será abrir.

**Figura 97. Ventana de reglas del control *Fuzzy***



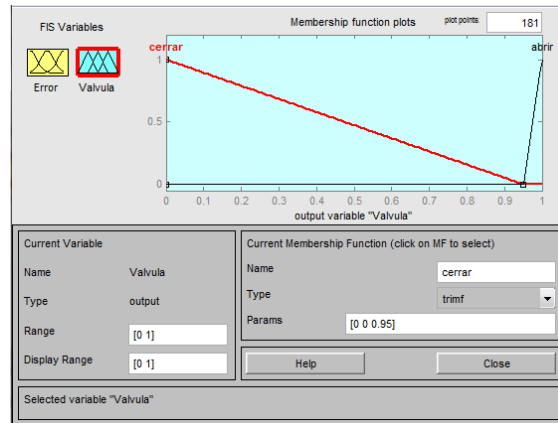
**Fuente: Autores**

Para parametrizar el output(Error) o salida de control se va a la ventana de output (clic sobre el output), hay se establece los estados que sean necesarios, para el control de la apertura de la válvula se hicieron dos:

- Cerrada (0 a 0.95).
- Abierta (0.95 a 1).

El sistema se ubica en uno de estos estados output dependiendo del estado input en el que se encuentre, esto se establece en las reglas de control *Fuzzy*, si el sistema se ubica en cerrada mandara una señal con valor de 0 a 0.95 dependiendo de qué tan por debajo se encuentre el nivel de altura de la referencia de 0 a 1 en porcentaje, si por el contrario está en correcto o en encima se abrirá de acuerdo a las mismas condiciones de 0.95 a 1.

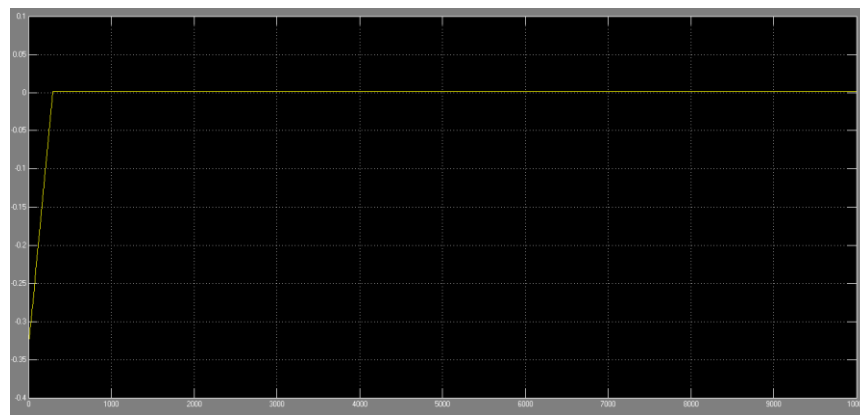
Figura 98. Ventana de parametrización del output(Válvula)



Fuente: Autores

A continuación se aprecia la gráfica del error de los resultados del control de nivel de altura en los modelamientos de los sistemas, se puede apreciar el tiempo en que le toma al control llegar y estabilizarse en cero, este valor varia dependiendo a las condiciones del sistema.

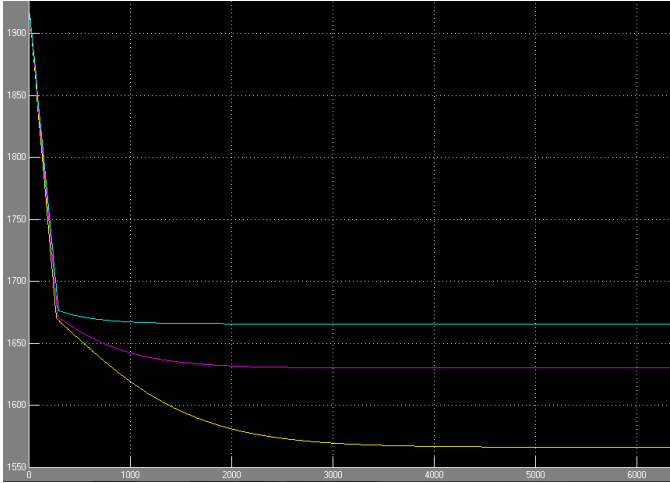
Figura 99. Grafica del error del control *Fuzzy*



Fuente: Autores

El control logra que la salida de jugo de caña se estabilice con la entrada de jugo de caña y el vapor producido en cada efecto, llevando a cero el diferencial de masa de jugo dentro de la calandria lo que hace que el valor de masa dentro de la calandria se haga constante.

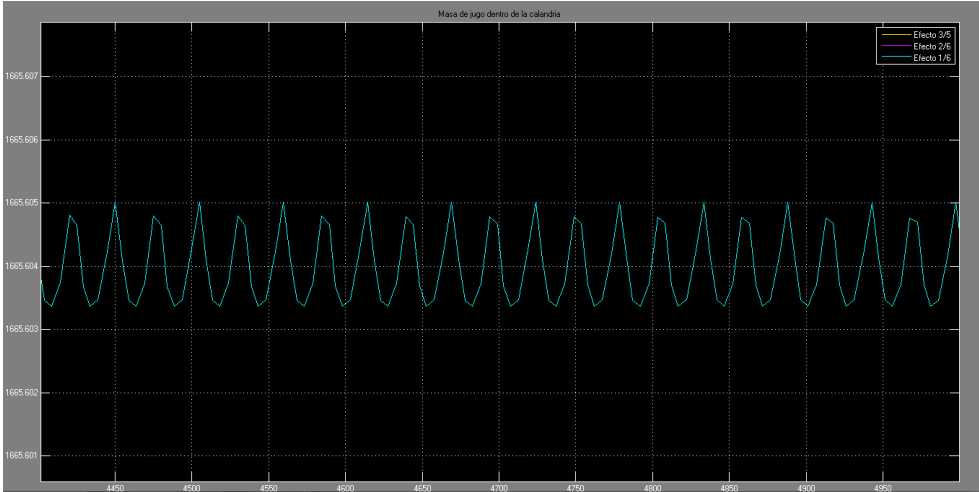
Figura 100. Grafica de nivel de masa en los evaporadores



Fuente: Autores

el control mantiene el nivel de la altura en un rango según se haya parametrizado el *Fuzzy* despues de estabilizar la salida de jugo de caña de azucar.

Figura 101. Grafica de control *Fuzzy*



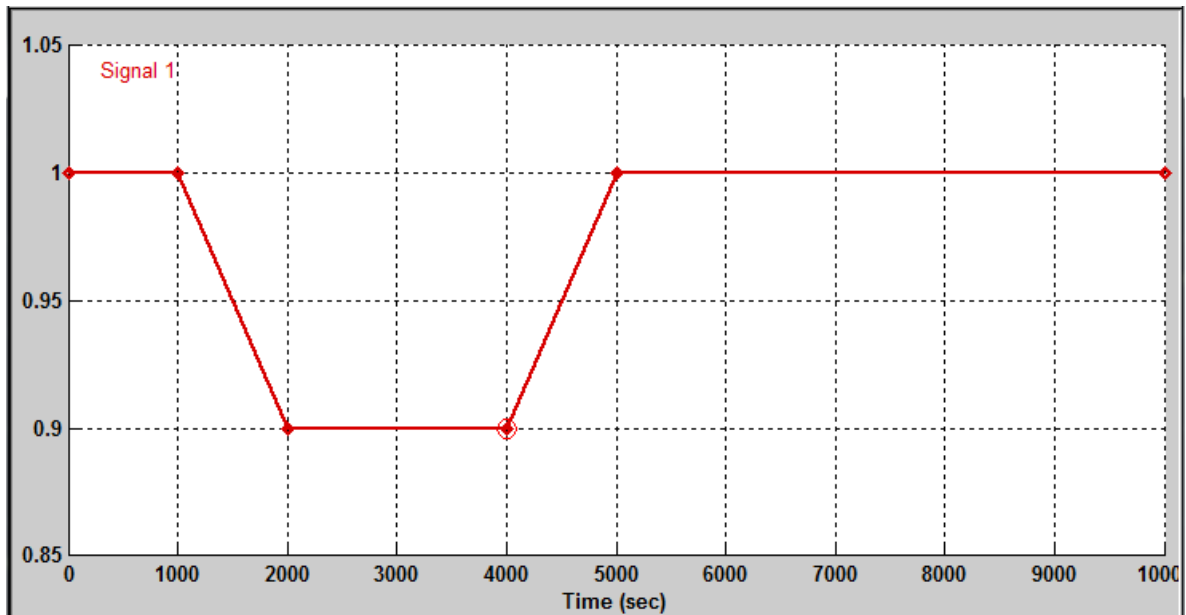
Fuente: Autores

## 7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Uno de los principales objetivos de la simulación de procesos industriales es poder predecir los resultados del proceso cuando hay cambios en las variables de entrada del mismo, en el caso de los evaporadores de múltiple efecto los cambios se pueden presentar principalmente en las condiciones del jugo debido a su naturaleza, cambios en su concentración y temperatura pueden conllevar a no obtener los resultados deseados, en menor medida también pueden haber perturbaciones en el vapor que circula en la calandria del primer efecto. A continuación se presentan el comportamiento de las principales variables de salida de un evaporador cuando hay cambios en las condiciones iniciales del jugo y en la cantidad de vapor saturado de calefacción.

Para el desarrollo de este fenómeno se usaran perturbaciones del 10% en todas las condiciones iniciales del modelo y se observaran los resultados obtenidos a partir de estas perturbaciones en relaciones con resultados sin perturbaciones.

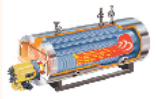


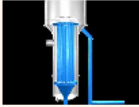
Figura 102. Perturbación en las condiciones iniciales



Fuente: Autores

Las condiciones iniciales establecidas para el modelamiento a perturbar fueron las siguientes:

**Figura 103. Condiciones iniciales**

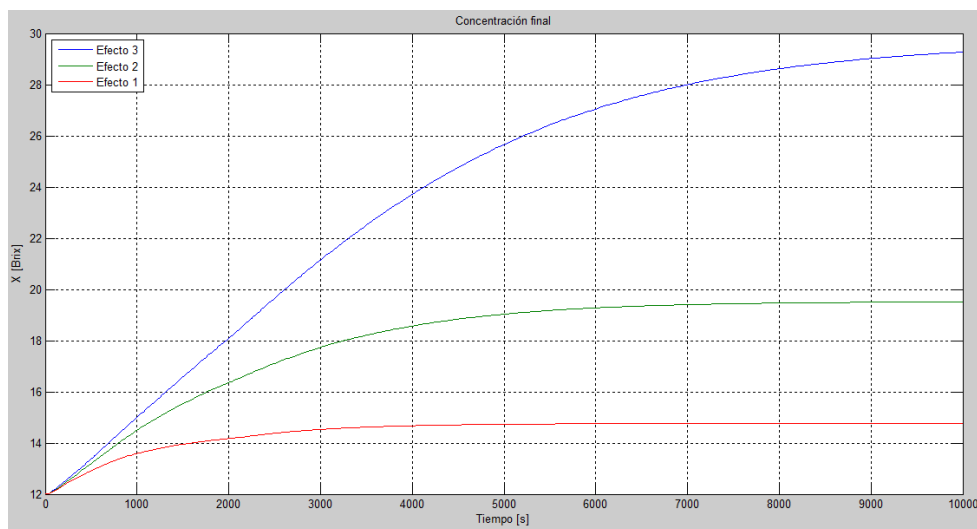
Energías	
<b>Vapor de Calefacción</b> 	
Flujo másico	3600 [Kg/h]
Temperatura	112 [°C]
Presión	145 [kPa]
<b>Jugo de Caña</b> 	
Caudal	11568.13 [Lt/hora]
Flujo másico	5 [Kg/s]
Temperatura	98 [°C]
Concentración	12 [Brix]
<b>Presión del Condensador</b> 	
Presión	43 [kPa]
<b>Calandria</b> 	
Altura de la Calandria	5 [m]
Diámetro de la Calandria	2 [m]
Diámetro de tubos	2.54 [cm]
Altura de tubos	2.5 [m]

Fuente: Autores

## 7.1 RESULTADOS SIN PERTURBACIÓN

- Concentración a la salida

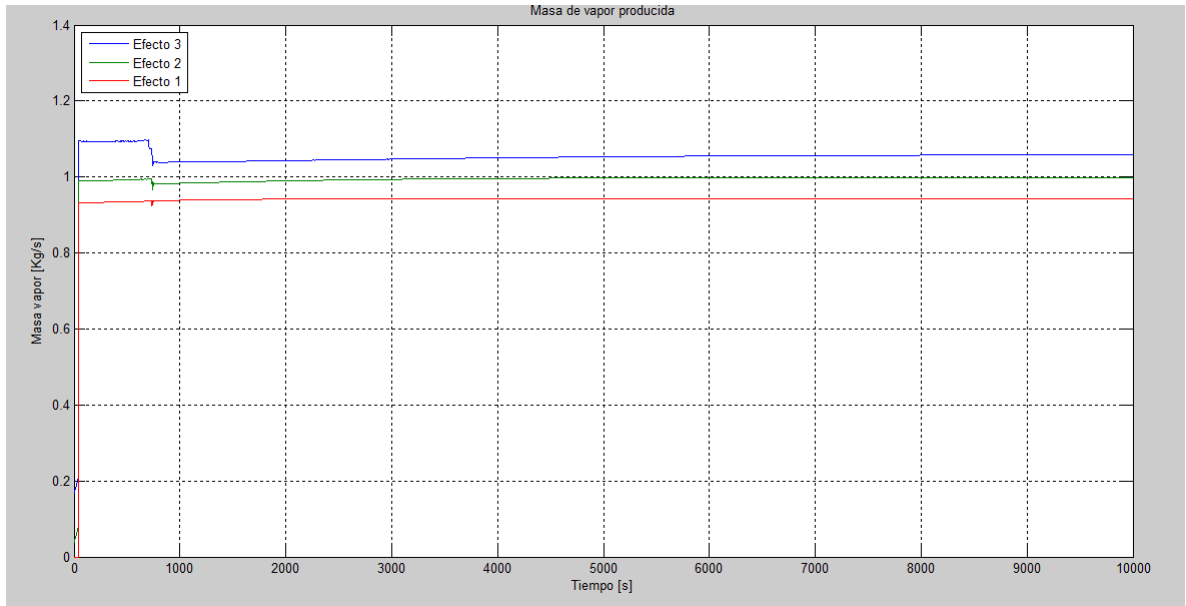
**Figura 104. Concentración a la salida sin perturbar**



Fuente: Autores

- Vapor producido en la calandria

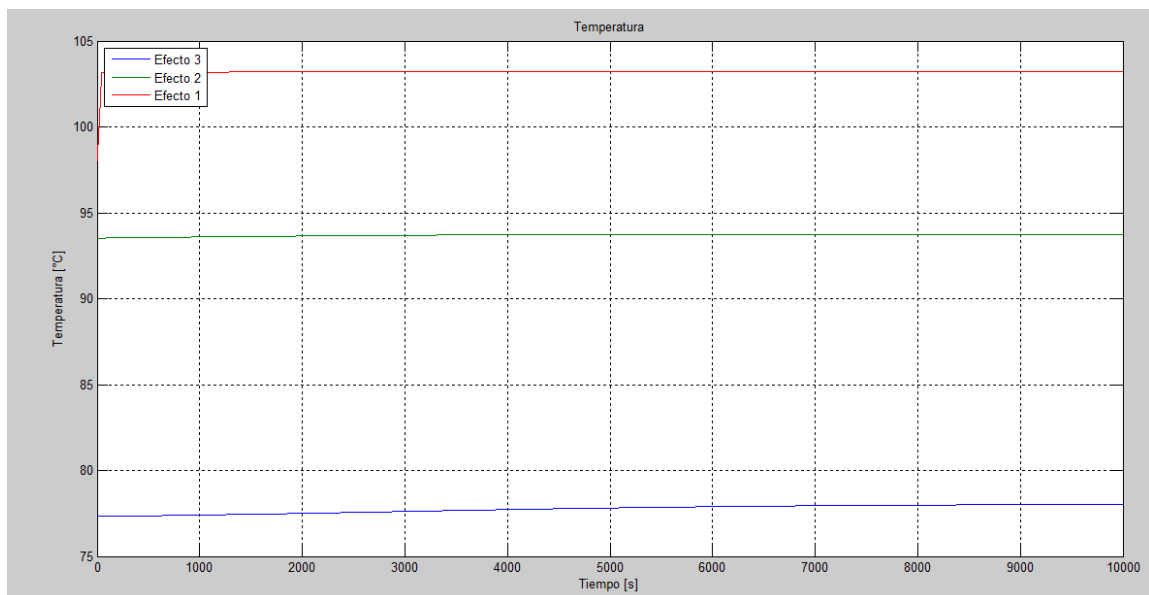
Figura 105. Vapor producido sin perturbar



Fuente: Autores

- Temperatura de saturación

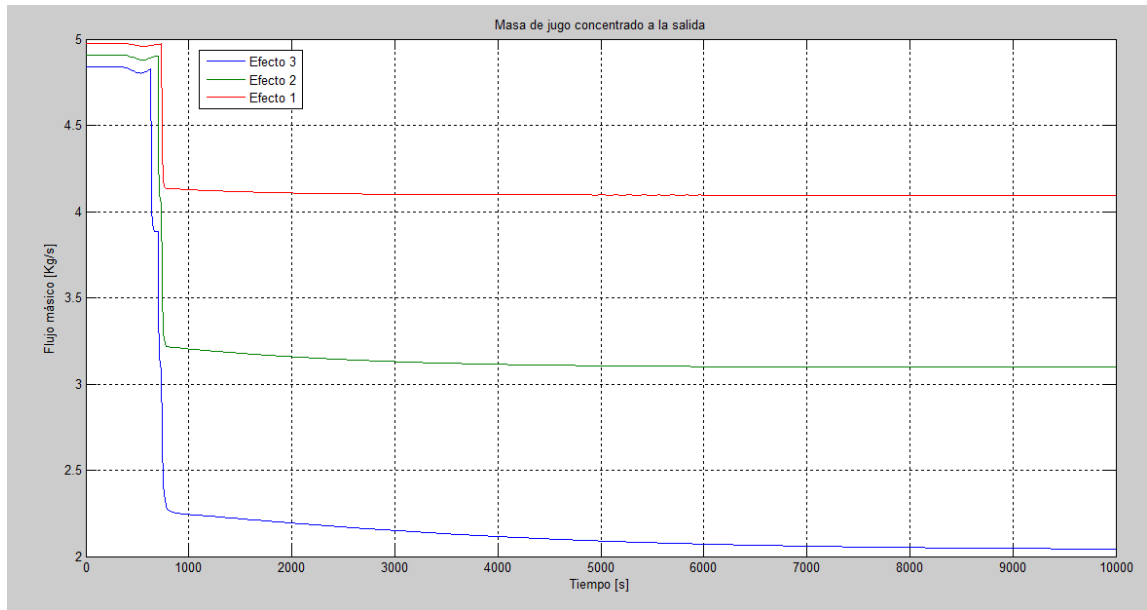
Figura 106. Temperatura sin perturbar



Fuente: Autores

- Salida de jugo de la calandria

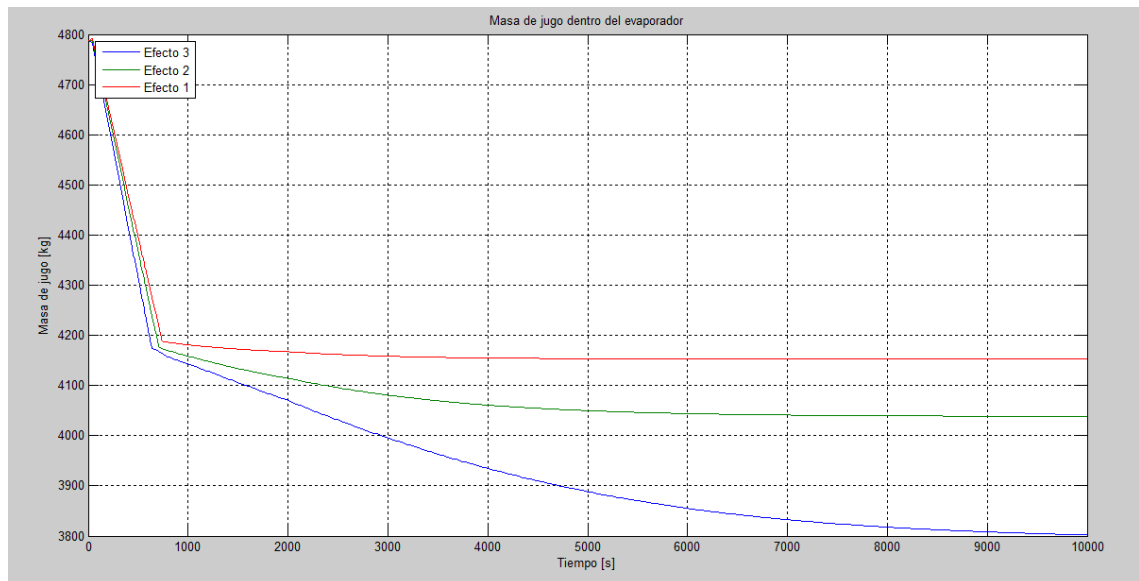
Figura 107. Salida de jugo sin perturbar



Fuente: Autores

- Masa de jugo dentro de la calandria

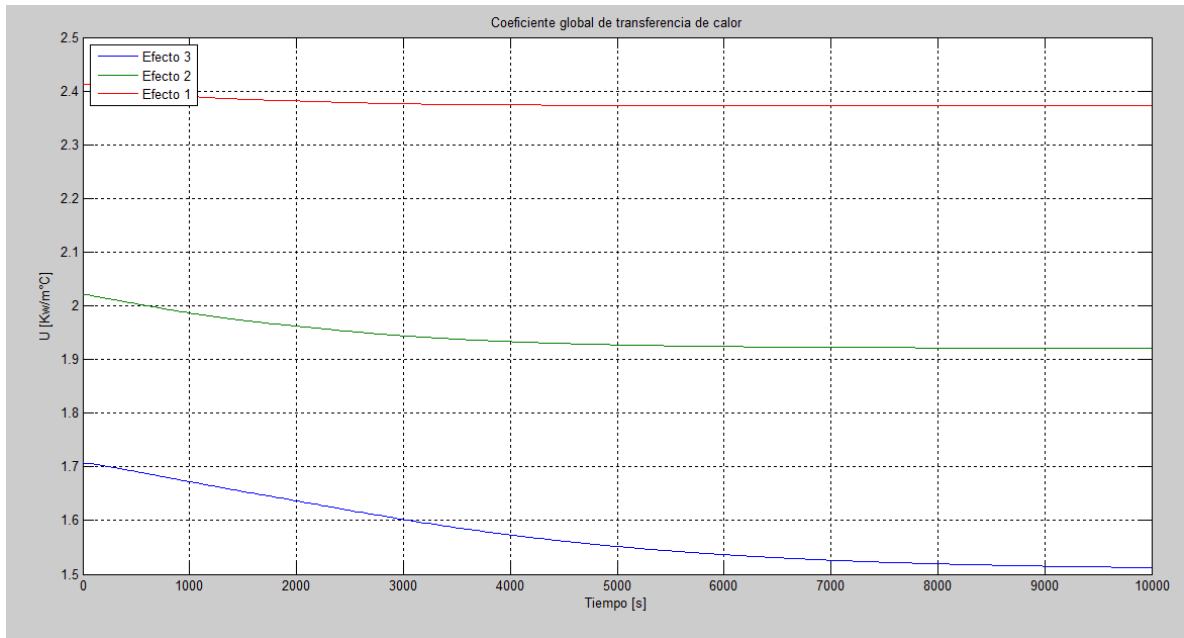
Figura 108. Masa dentro de la calandria sin perturbar



Fuente: Autores

- **Coeficiente global de transferencia de calor**

**Figura 109. Coeficiente global de transferencia de calor sin perturbar**



Fuente: Autores

## 7.2 PERTURBACIÓN EN LA CONCENTRACIÓN INICIAL

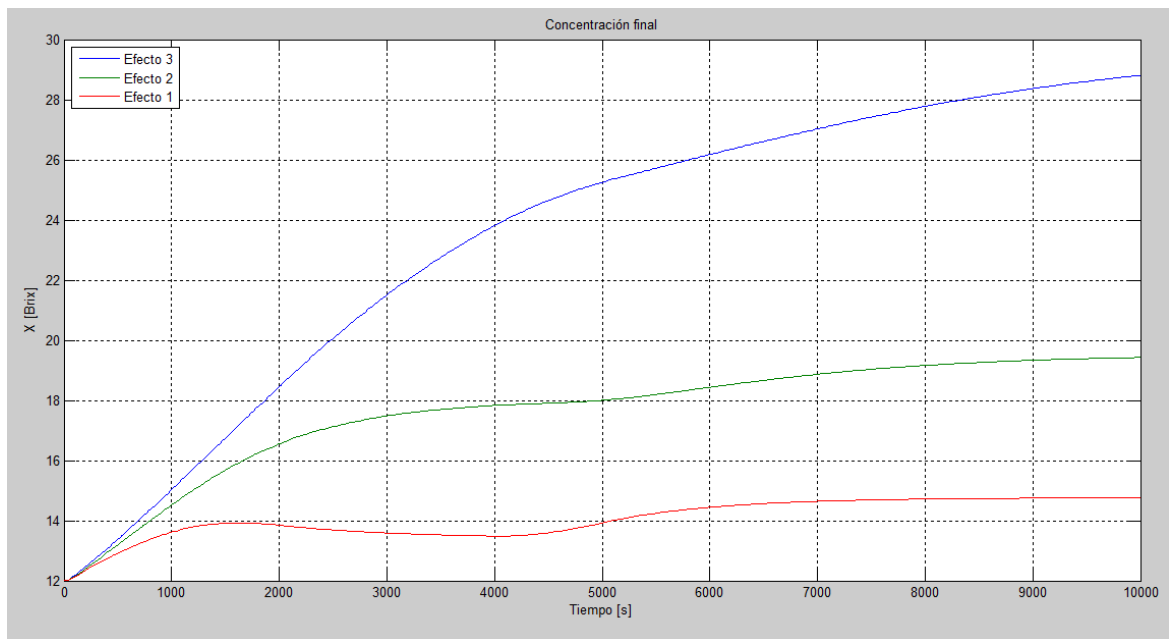
En la práctica el jugo de caña de azúcar que se procesa en los evaporadores recibe un tratamiento previo, dentro del cual la agitación del mismo en una constante y esto a su vez genera una uniformidad en las propiedades del jugo, sin embargo los grandes ingenios azucareros adquieren la caña de diferentes fuentes debido a su gran producción produciendo así pequeñas diferencias, la concentración es una de estas variables que pueden verse afectadas y es un problema cuando el jugo tiene bajas concentraciones porque debe evaporarse más agua y el producto final es menor.

Esta caída en la concentración implica que el jugo en ese intervalo tiene menos azúcar y más agua, a continuación se hará una comparación de las salidas con la perturbación y sin la perturbación:

- **Salida de concentración**

La concentración dentro de las calandrias se ve muy afectada por un cambio o perturbación en la concentración de entrada del jugo, principalmente en el primer efecto, esto se debe a que este efecto es el que se mezcla directamente con la entrada de jugo de caña, una mayor rata de caudal de entrada traería como consecuencia un cambio aún más grande en la estabilidad de la concentración.

**Figura 110. Concentración a la salida con perturbación**

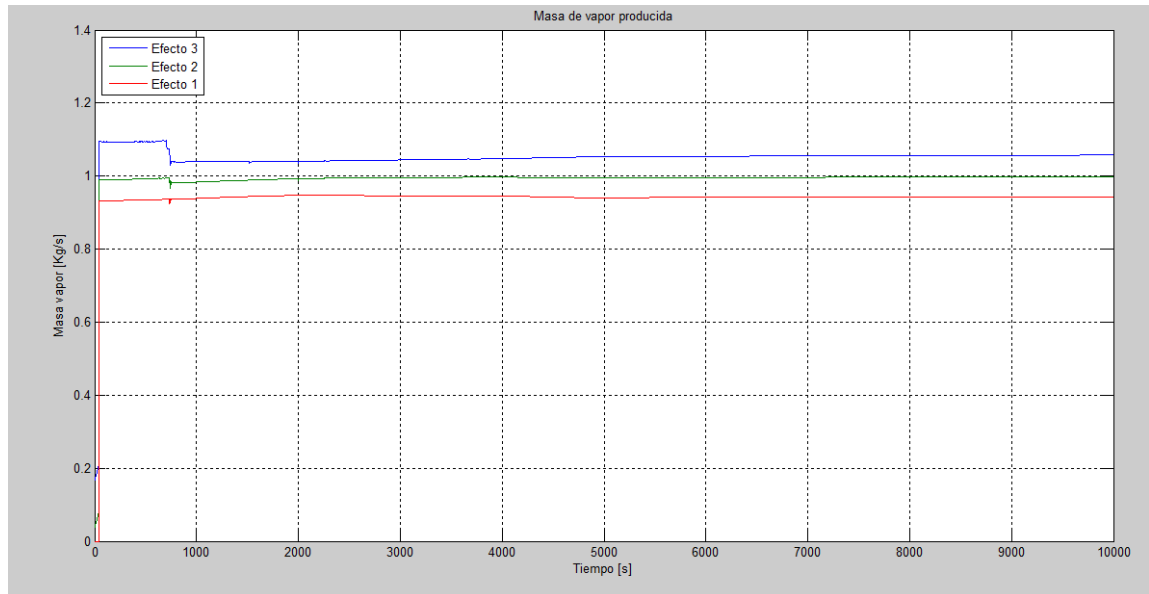


Fuente: Autores

- **Vapor producido**

La tasa de producción de vapor se ve aumentada durante la etapa de perturbación debido a que el porcentaje de agua es mayor en este momento, el agua tiene un punto de ebullición menor al de la sacarosa, y al esta representar aun mayor parte de la mezcla baja su punto de ebullición, lo que causa este efecto.

**Figura 111. Vapor producido con perturbación**

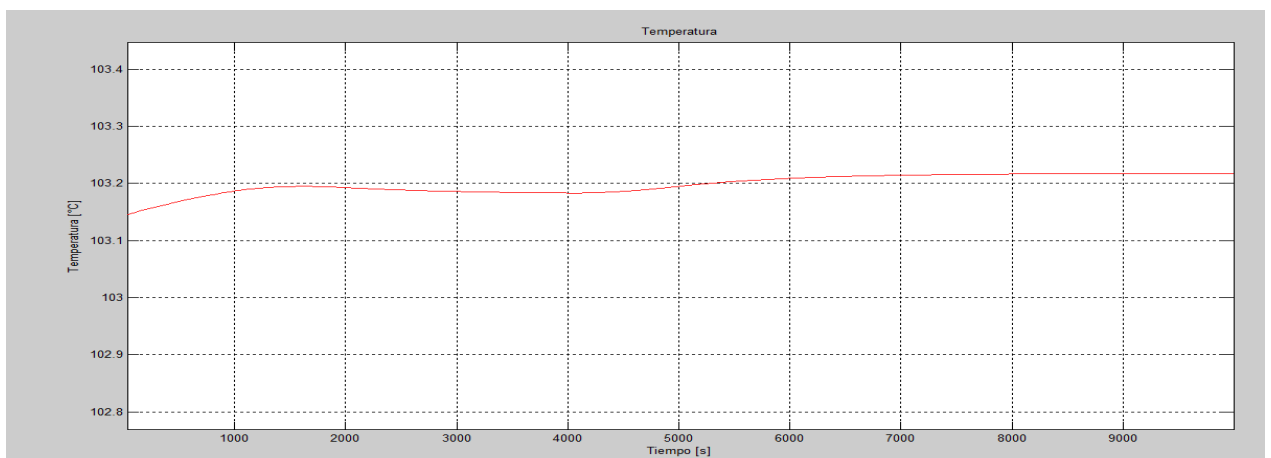


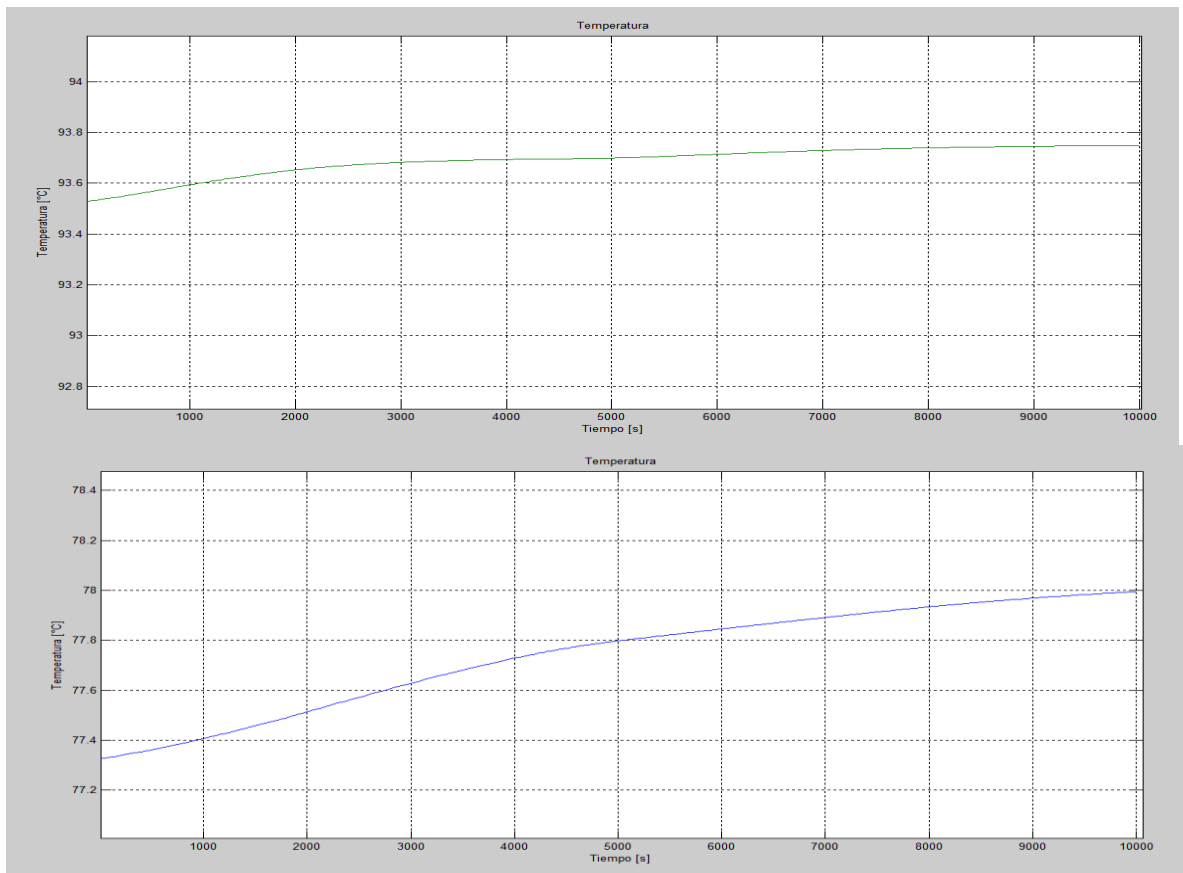
Fuente: Autores

- **Temperatura de ebullición dentro de la calandria**

La temperatura de ebullición o de saturación de la mezcla disminuye debido a que el agua tiene una temperatura de ebullición más baja que la sacarosa, es decir al disminuir la concentración de la mezcla, también disminuye su punto de ebullición.

**Figura 112. Temperatura con perturbación (Efecto 1, Efecto 2, Efecto 3)**



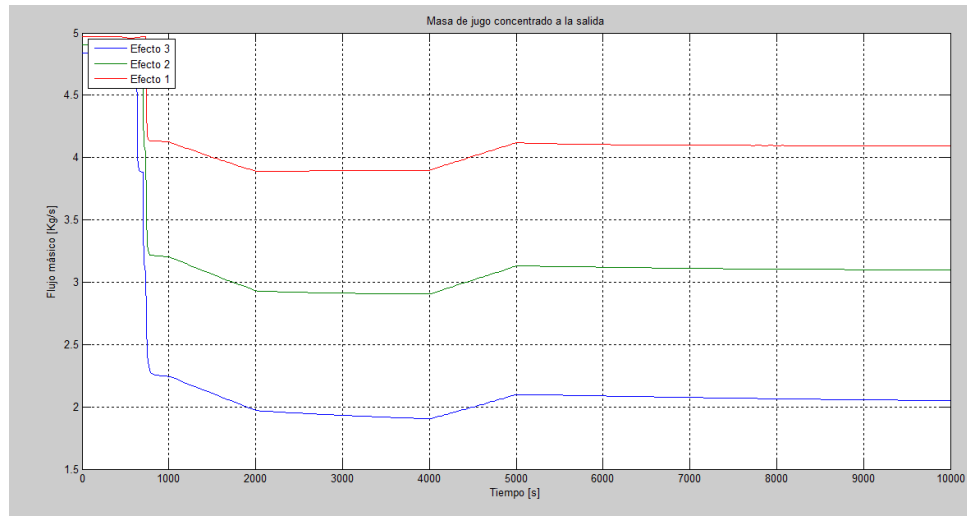


Fuente: Autores

- **Salida de masa de jugo de caña**

Como la producción de vapor se ve aumentada, el flujo másico de salida de jugo de caña tiene que disminuir para poder cumplir con la conservación de la masa dentro de la respectiva calandria y mantener el nivel de la altura del jugo al 30% de la misma.

**Figura 113. Salida de jugo con perturbación**

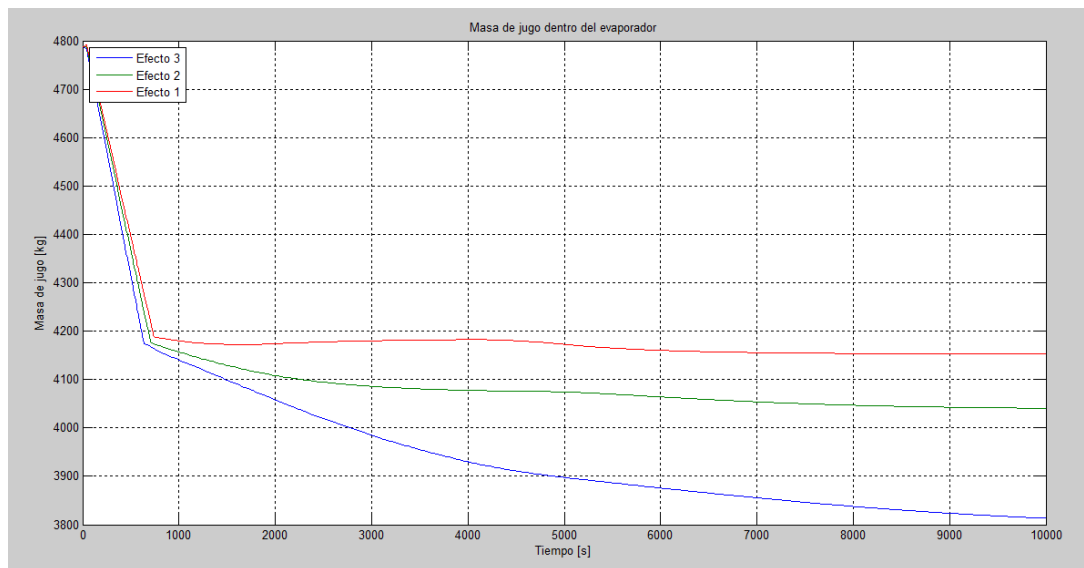


Fuente: Autores

- **Masa dentro de la calandria**

El cambio de concentración afecta directamente a la densidad de la mezcla, el agua es más densa que la sacarosa, esto causa que para la misma altura de jugo dentro de la calandria se tenga un porcentaje de masa de jugo mayor a una menor concentración.

**Figura 114. Masa dentro de la calandria con perturbación**

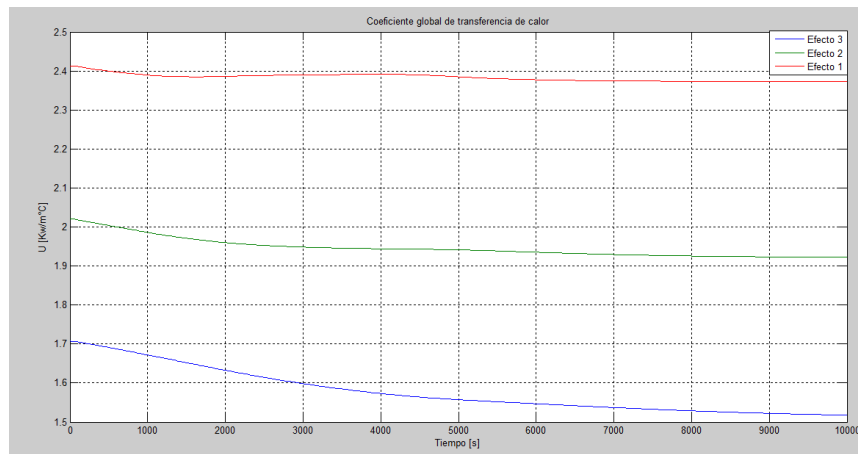


Fuente: Autores

- **Coefficiente global de transferencia de calor**

El coeficiente global de transferencia de calor dentro de cada una de las calandrias es afectado por muchos factores, por eso era de esperarse que un cambio en la concentración de la mezcla tenga consecuencias en la perturbación de la estabilidad de esta propiedad.

**Figura 115. Coeficiente global de transferencia de calor con perturbación**



Fuente: Autores

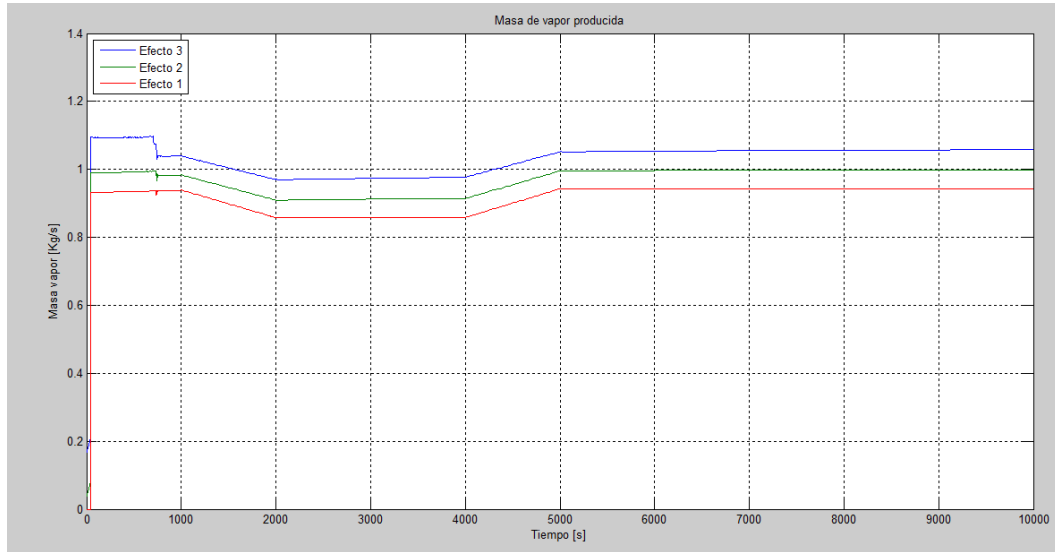
### 7.3 PERTURBACIÓN EN LA TEMPERATURA INICIAL

La temperatura del jugo restringe la transferencia de calor y la cantidad total de calor que debe recibir el jugo para llegar a la ebullición, un problema que se puede encontrar es que el jugo no llegue lo suficientemente caliente al evaporador y el vapor de calefacción no logre evaporarlo lo suficiente.

- **Vapor producido**

La tasa de producción de vapor se disminuye debido a que ahora el intercambiador necesita transmitir más calor al nuevo jugo a menor temperatura que entra durante la perturbación para que llegue a la temperatura de saturación a la concentración de la mezcla y pueda evaporarse el agua para producir el vapor.

**Figura 116. Vapor producido con perturbación**

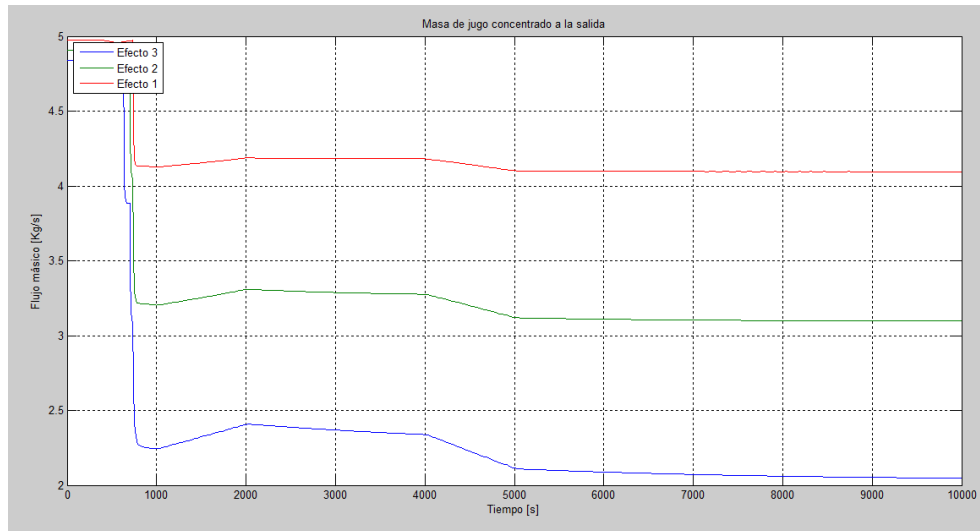


Fuente: Autores

- **Salida de masa de jugo de caña**

Como la producción de vapor se ve disminuida, el flujo másico de salida de jugo de caña tiene que aumentar para poder cumplir con la conservación de la masa dentro de la respectiva calandria y mantener el nivel de la altura del jugo al 30% de la misma.

**Figura 117. Salida de jugo con perturbación**



Fuente: Autores

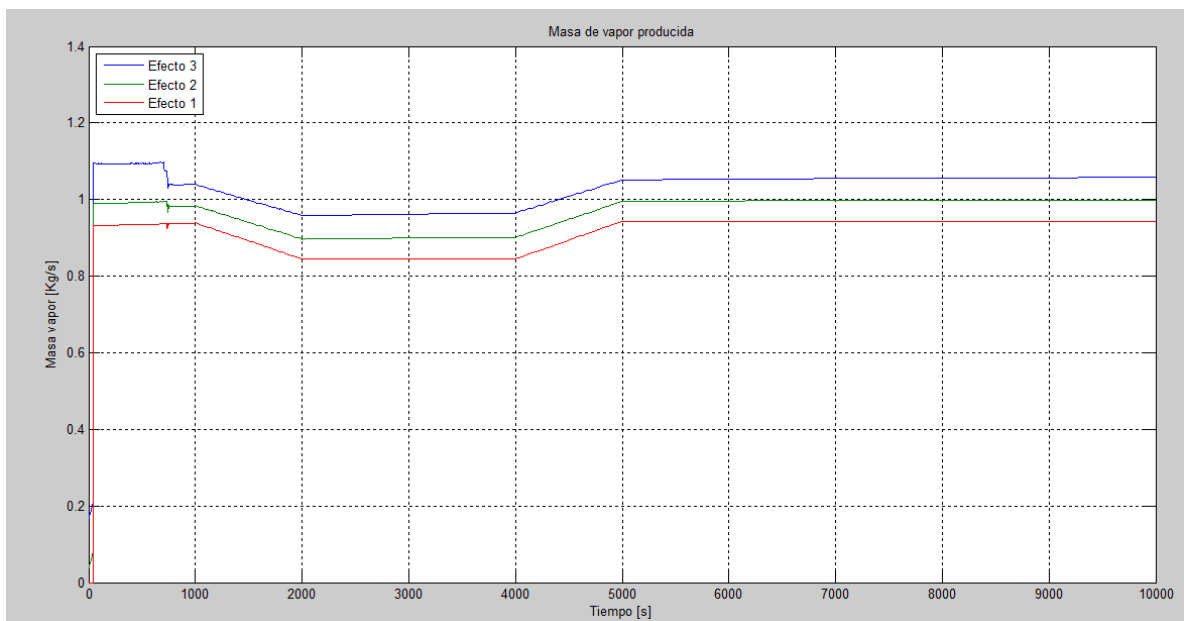
Los demás estados como la temperatura, concentración, masa de jugo dentro de la calandria y coeficiente global de transferencia de calor no son afectados considerablemente por una perturbación en la temperatura de entrada del jugo de caña.

## 7.4 PERTURBACIÓN EN LA MASA DE VAPOR DE CALEFACCIÓN

La cantidad de vapor que se aplica dentro de la calandria tiene un efecto directo sobre la cantidad de agua que se va a evaporar, si hay una caída en el flujo de vapor va a haber en consecuencia una disminución en la concentración del jugo, el origen de esta caída se debe a la cantidad de calor disponible para calentar el jugo, el cual es proporcional a la cantidad de vapor.

Al aplicarse una perturbación del 10% se observa una caída en la cantidad de vapor producida en la ebullición, la cual no es muy considerable pero afectará la concentración final del jugo.

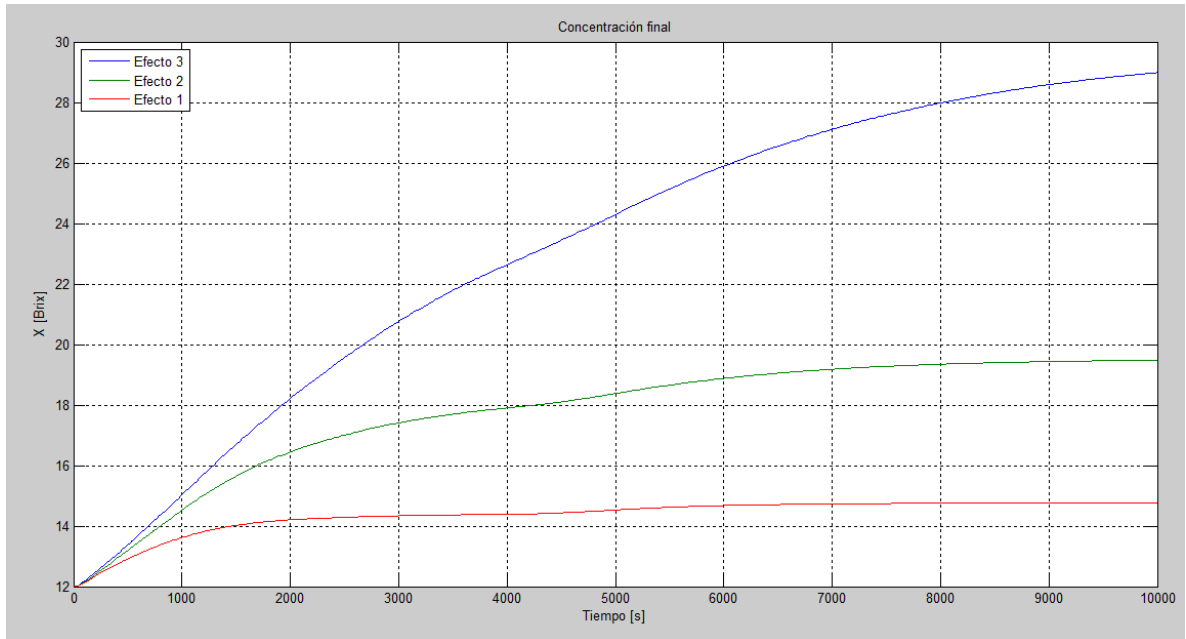
Figura 118. Masa de vapor producida.



Fuente: Autores

La concentración como se había mencionado se ve afectada en el intervalo en el que ocurre la perturbación, sin embargo no es considerable el efecto de la perturbación aplicada, se tiene una caída en la concentración de apenas 1 brix.

**Figura 119. Concentración final.**



**Fuente: Autores**

## 7.5 VERIFICACIÓN DE RESULTADOS

Verificación respecto a un ejercicio del libro Hugot. Manual de ingenieros azucareros.

Este es un ejemplo citado por el libro de Hugot. Manual de ingenieros azucareros para un caso de un evaporador de cuádruple efecto, la diferencia de presiones que se tiene en cada vaso respecto a la caída de presiones total es distinta a la que se usa para el evaporador de triple efecto, sin embargo esto no debe ser causa de una variación significativa en los resultados de salida del sistema de evaporación de triple efecto, evaluando solo los 3 primeros vasos:

Figura 120. Extracción de condensado separada de cada vaso

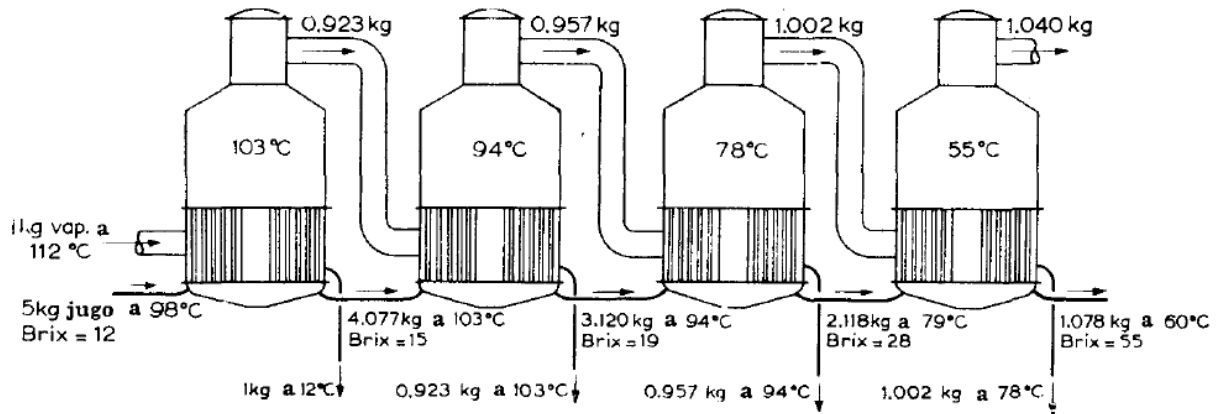


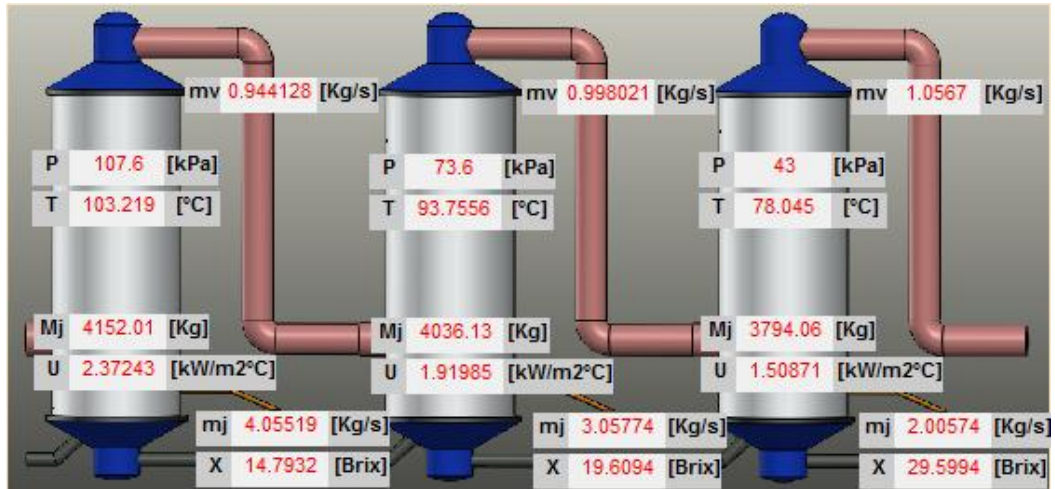
FIG. 262. Extracción de condensados separada de cada vaso

Fuente: Hugot. Manual de ingenieros azucareros

Los resultados obtenidos para las entradas de este sistema las cuales son:

- 1 Kilogramo de vapor saturado de calefacción a 112°C.
- 5 Kilogramo de jugo de caña a 98°C y con una concentración de 12 Brix.
- Las presiones fueron dadas en lenguaje de temperaturas siendo 78°C la del condensador, con una caída de temperatura de 25 °C, para los 3 primeros efectos.
- Las dimensiones no fueron definidas, sin embargo se considera que todo el vapor saturado de calefacción se condensa, esta es la misma consideración que se tiene en el modelo simulado del evaporador de triple efecto en serie.

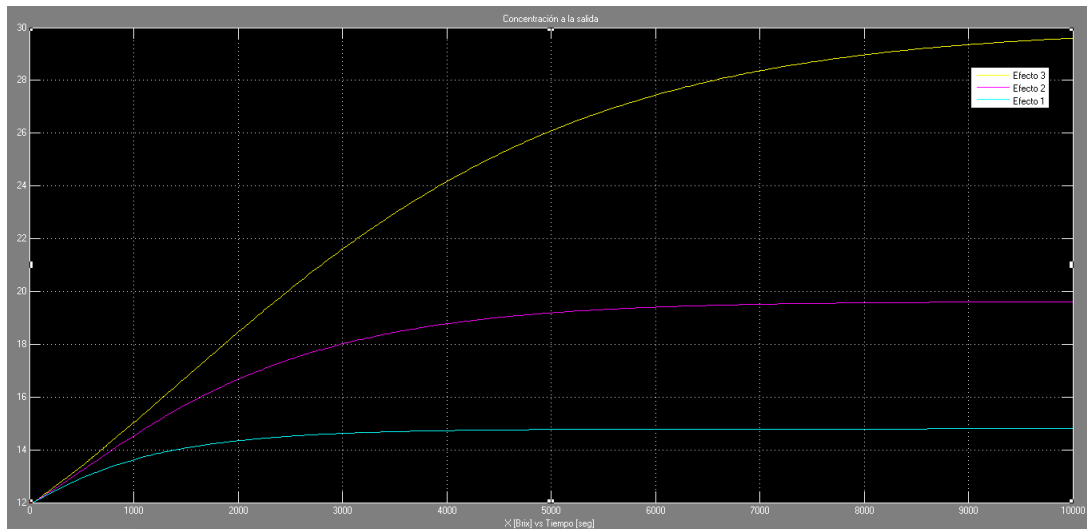
Figura 121. Resultados programa



Fuente: Autores.

Como se puede apreciar en la figura, los resultados modelados por el programa no presentan un error no mayor al 8% respecto a los propuestos en el ejemplo del libro de hugot, este error también puede ser causa de que la diferencia de presiones utilizada por el programa no era la correspondiente para un evaporador de cuádruple efecto, descrita en el capítulo de *Simulink*, en el apartado del bloque de presiones.

Figura 122. Grafica de concentración en los efectos



Fuente: Autores.

Esta grafica muestra el comportamiento de la concentración dentro de los 3 primeros efectos hasta que alcanzan la estabilidad.

## 8. CONCLUSIONES

- Se desarrolló una herramienta computacional para la simulación de evaporadores de triple efecto con una interfaz amigable con el usuario que provee los datos en régimen estacionario y las gráficas para un análisis transitorio del proceso.
- El programa permite el ingreso de todos los datos correspondientes a el estado del jugo de caña de azúcar, el estado del vapor proveniente de la planta y el dimensionamiento del evaporador y arroja los siguientes resultados:
  - La gráfica de la concentración en el tiempo, desde que ingresa al evaporador hasta que empieza la ebullición del jugo y posteriormente llega a la concentración final en régimen transitorio.
  - La cantidad de vapor de agua producto de la ebullición.
  - La cantidad de jugo en el interior del evaporador llegando en régimen transitorio al nivel óptimo recomendado.
  - La temperatura del jugo que aumenta con la transferencia de calor proveniente del vapor hasta la temperatura de ebullición en el evaporador, la cual está limitada por la presión en el interior de este.
  - El flujo másico de jugo concentrado a la salida de cada evaporador.
  - El coeficiente de transferencia de calor en el tiempo usando una correlación desarrollada por L.J Watson.
- Haciendo un análisis a los datos arrojados por el programa, se puede observar la gran ventaja que otorga al proceso la implementación de un controlador que regule la apertura de las válvulas que permiten la salida de jugo concentrado de cada etapa de evaporación, reduciendo en más de mil segundos la llegada del jugo a su concentración final, y pasando así a estado estable.

- La creación del modelo en *Simulink* y la implementación de la interfaz gráfica *Guide* permitieron ampliar los conocimientos acerca programación de modelados para procesos industriales, y verificar su validez con datos de diferentes fuentes.

## BIBLIOGRAFIA

ARCE, R.A. manual de *Simulink* para la asignatura de teoría de sistemas, Universidad de Sevilla. Sevilla, 2009. p, 33.

GEANKOPLIS, C.J. Procesos de transporte y operaciones unitarias. 3 ed. Mexico. Compañía editorial continental, 1998. p 545-572.

HUGOT, E. Handbook of Cane Sugar Engineering. 3 ed. Amsterdam. Elsevier, 1960. p. 339-428

MENDIETA, M.O. Análisis experimental de la evaporación del jugo de caña de azúcar en película sobre una placa plana, En: Agroenergía. Bucaramanga, 2013. p, 113-127.

PEÑA, A. Determinación de propiedades fisicoquímicas de jugos y mieles de caña panelera. Universidad Nacional de Colombia. Programa de Especialización en Ciencia y Tecnología de Alimentos. Bogotá D.C, 2009. p 49-55.

RAMIREZ R.O, Simulación en simmechanics de un sistema de control difuso para el robot udlap. Universidad de las Américas Puebla, Escuela de Ingeniería y Ciencias, Departamento de Computación, Electrónica y Mecatrónica. Tesis profesional, Capítulo 3, 2008. Internet:

[http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lmt/ramirez\\_r\\_o/capitulo3.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lmt/ramirez_r_o/capitulo3.pdf)

WATSON, L.J. Heat transfer mechanisms in evaporators, En: Proceedings of Australian society of sugar cane technologists. Mackay, 1987, p 221-227.

## ANEXOS

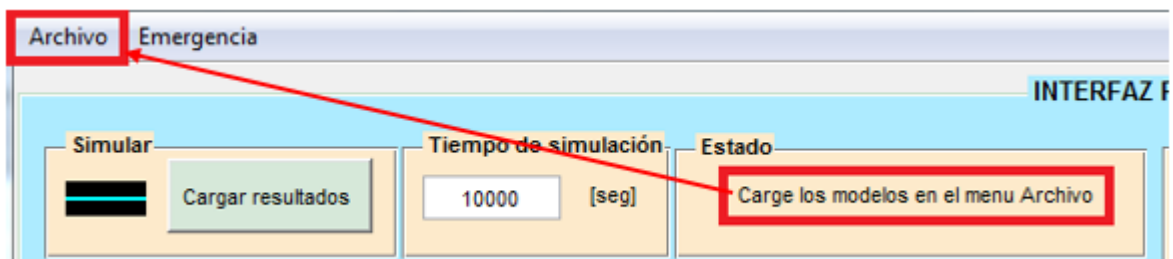
### Anexo A. Uso de la interfaz

Para el uso del modelo del evaporador de triple efecto en serie se dispone de una interfaz, a continuación se explicara paso a paso como debe usarse esta para simular correctamente el modelo sin tener problemas:

Primero después de haber abierto el código de la interfaz y este ya se haya ejecutado, el menú de estado nos sugerirá cargar los modelos, es decir los bloques de *Simulink* y los controles necesarios para el modelamiento del sistema.

El comando para cargar los modelos se encuentra en el menú de Archivo que se encuentra en la barra sobre la interfaz como lo muestra la siguiente figura:

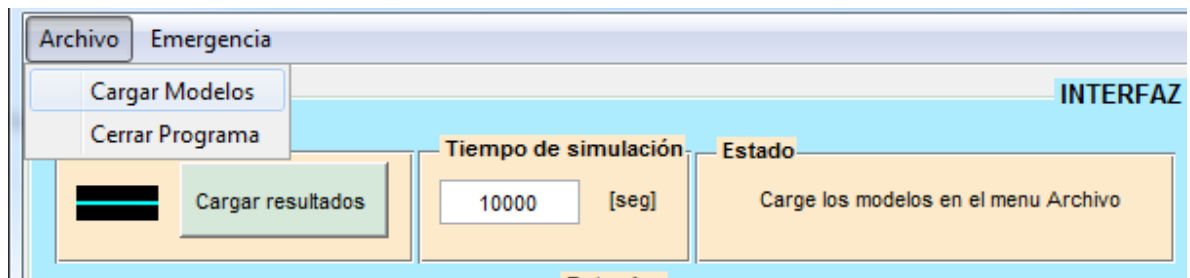
Figura 123. Cargar modelos



Fuente: Autores

Allí se encuentran dos comandos, el primero es el necesario para cargar o abrir los ficheros de *Simulink* y controles y el segundo es para cerrar la interfaz, se debe pulsar el primero "Cargar modelos" como se indica:

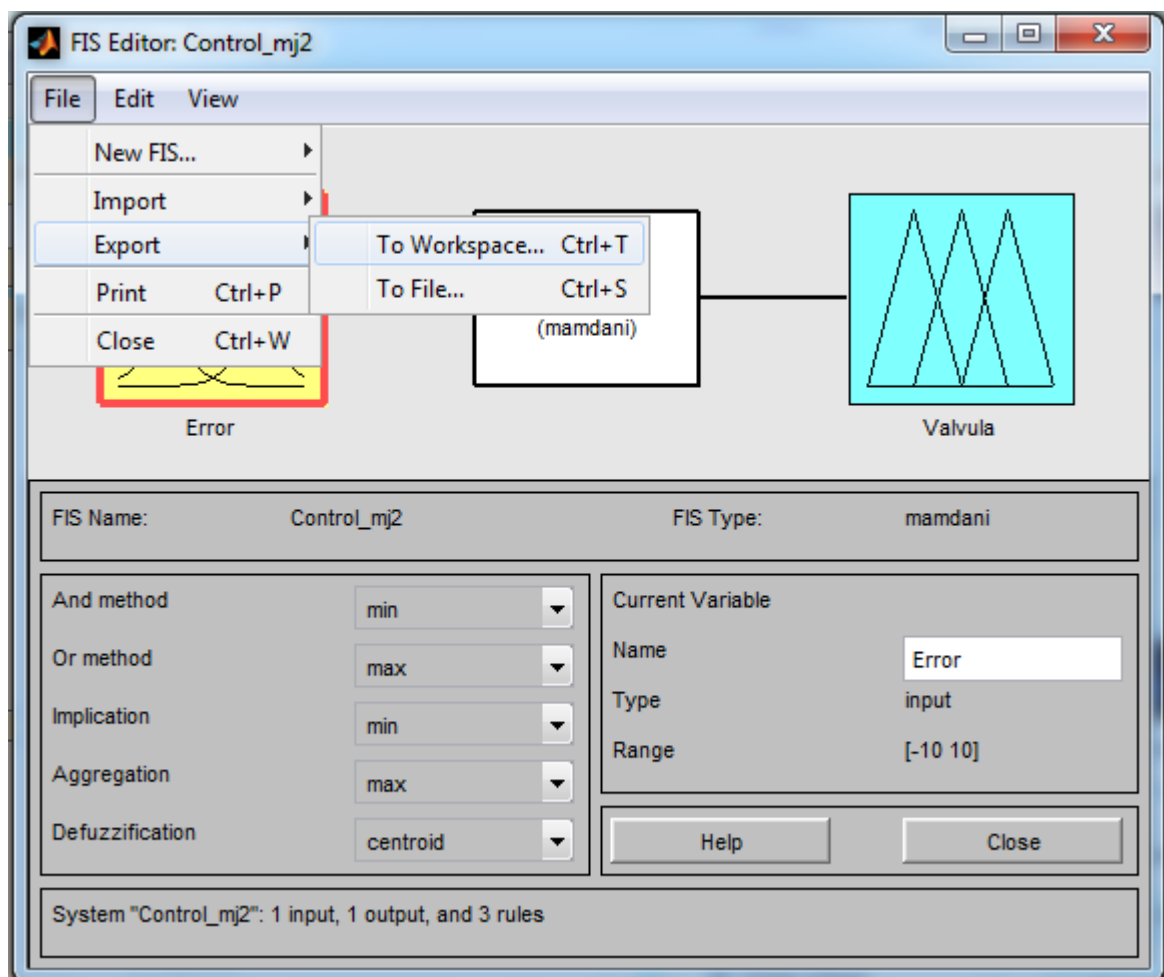
Figura 124. Menú Archivo



Fuente: Autores

Después de pulsar el comando tardara unos segundos en abrirse los programas, cuando ya estén abiertos todos (5 en total, 3 ficheros *Simulink* y 2 controles *Fuzzy*) minimizamos los archivos de *Simulink* (opcional) para no saturar la pantalla y en la ventana de los dos controles vamos al menú File, Export y To Workspace, esto es necesario para exportar al workspace de *Matlab* los 2 controles *Fuzzy* para que el *Simulink* pueda acceder a ellos, luego pueden cerrarse sin guardar cambios las ventanas de los controles.

Figura 125. Ventana de comandos del control *Fuzzy*

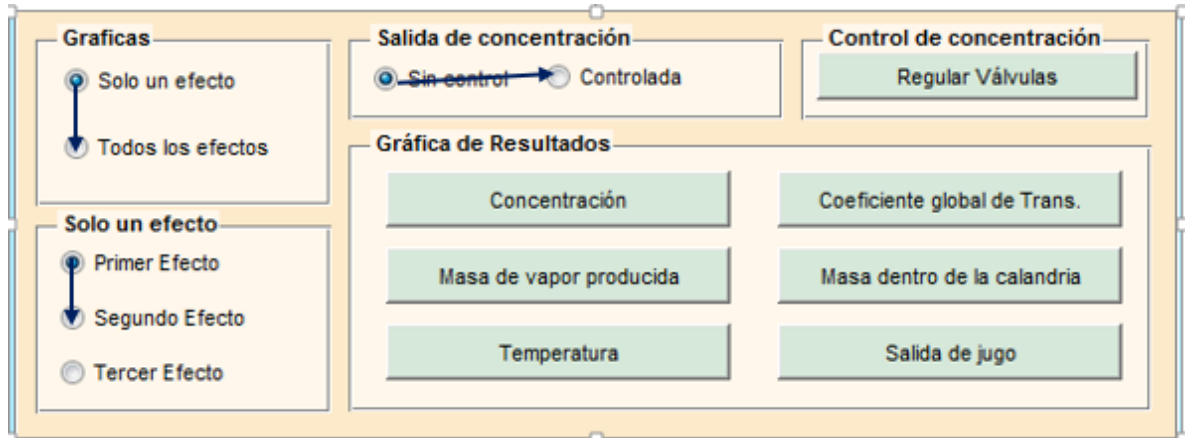


Fuente: Autores

Es necesario también mover aunque sea una vez algún radio button de los button groups del panel de resultados, esto para que se inicialicen las variables de

condición que sin este paso el programa podría indicar que una de ellas no existe o no está definida.

Figura 126. Inicializar variables de condición



Fuente: Autores

Con las variables de condición inicializadas y los modelos cargados, el siguiente paso es introducir los valores de entrada de algún sistema que se desee modelar, estos datos de entrada son los indicados por el panel de entradas, todos son necesarios, aunque si se dejan en blanco el *Simulink* usara los que tiene por defecto del ultimo guardado, estos datos son los del vapor de calefacción, el jugo de caña de azúcar, el condensador y las dimensiones de la calandria.

Figura 127. Colocar datos de entrada

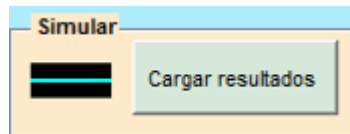
Flujo másico	<input type="text" value="3000"/>	[Kg/h]
Temperatura	<input type="text" value="110"/>	[°C]
Presión	<input type="text" value="150"/>	[kPa]

Fuente: Autores

El sistema está listo para ser simulado, para esto se va al panel de simular y se oprime el botón cargar resultados, (si se presenta un error de inicialización con el *Fuzzy*, se vuelve a oprimir cargar resultados, ocurre algunas veces la primera vez que se corre el programa) con esto el panel de estado tendrá tres cambios

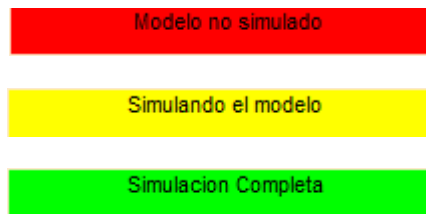
mientras se simula el modelo, pasara de indicar que no se ha simulado el modelo actual, simulando modelo y cuando termine la simulación aparecerá simulación completa, durante este proceso solo se debe esperar.

**Figura 128. Simular**



**Fuente: Autores**

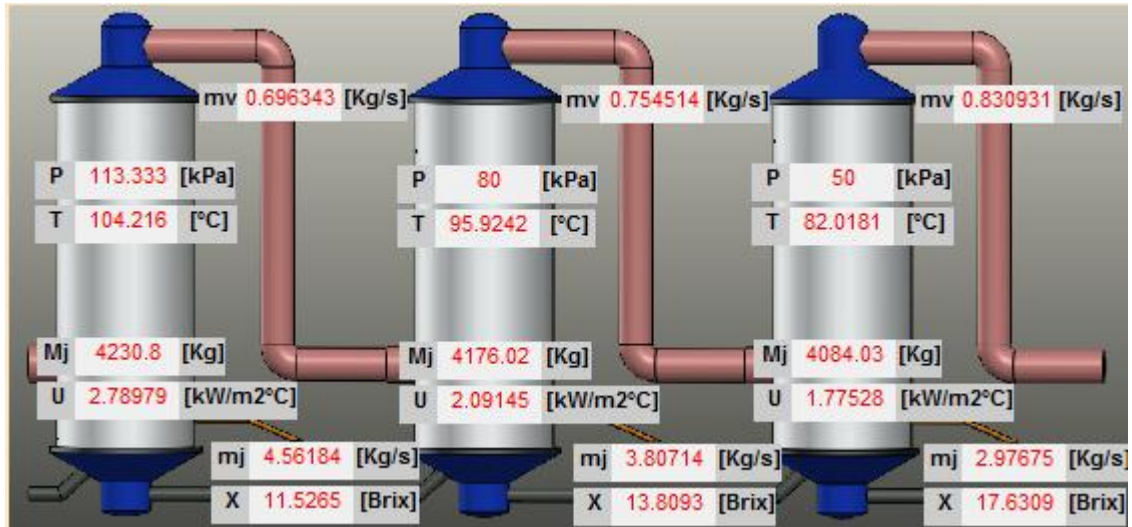
**Figura 129. Estados de espera**



**Fuente: Autores**

Con la simulación del modelo cargada se puede acceder al panel de resultados y ver los resultados en estado estable de cada una de las tres calandrias, en este se indican las presiones, temperaturas de saturación, masa de vapor producida, masa de jugo interna, salida de jugo y el coeficiente global de transferencia de calor de cada uno de los efectos.

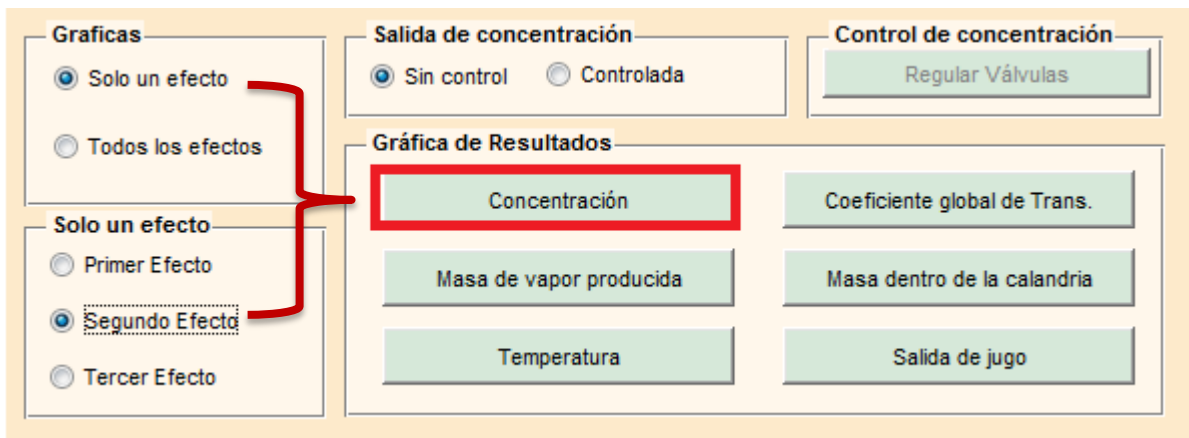
Figura 130. Resultados estado estable



Fuente: Autores

En este panel también se puede ver el comportamiento de cada uno de las propiedad desde el arranque hasta su estabilidad, ya sea las de cualquiera de los 3 efectos o todos los efectos al mismo tiempo para hacer comparaciones, solo se debe indicar en los paneles de la izquierda la gráfica que se desea analizar.

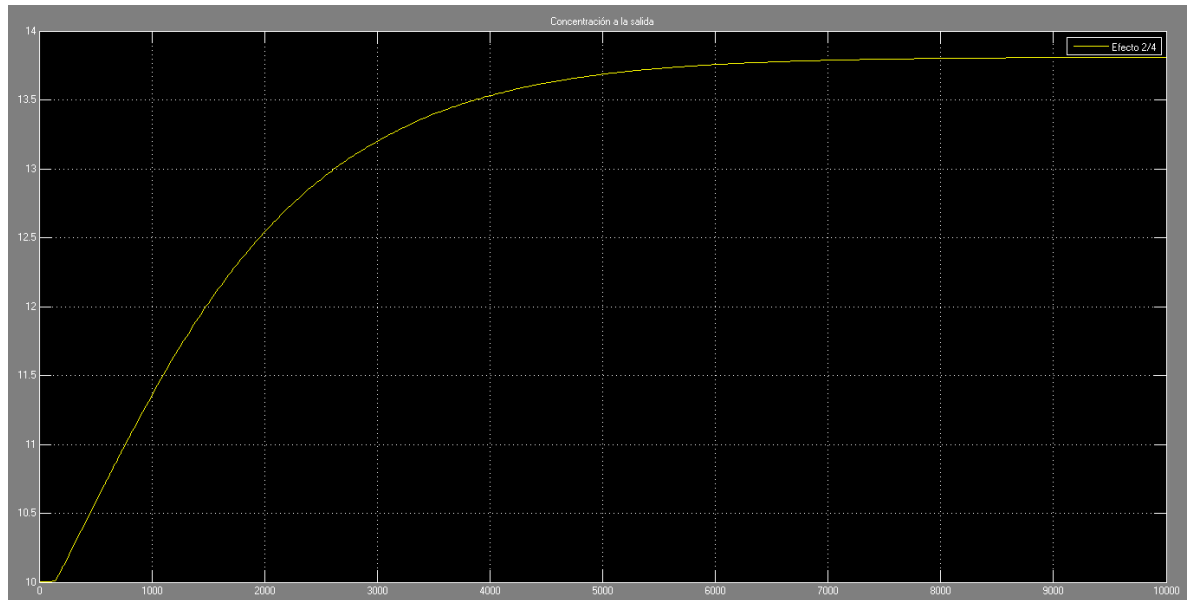
Figura 131. Graficas de los resultados



Fuente: Autores

Esta grafica se visualizar desde el scope del *Simulink*, esto permite que se puedan usar todos los comandos de zoom que este posee para poder analizar más detalladamente cada una de las gráficas.

Figura 132. Grafica de concentración segundo efecto



Fuente: Autores

El programa presenta dos modelos uno en el que se simula normalmente el evaporador de triple efecto y en el que el usuario puede controlar la salida mínima de concentración de cada efecto, el objetivo de este último es ganar tiempo de producción y disminuir el desperdicio de jugo con concentraciones no deseadas, se puede seleccionar el modelo que se desee en el panel de resultados en la sección de salida de concentración, el modelo con control de concentración también tiene un panel extra que permite ingresar el nivel mínimo de concentración deseado.

Figura 133. Modelos de simulación



Fuente: Autores

Para este nivel mínimo lo más recomendable es ya conocer el estado estable del sistema que se modelo para ingresar los valores de concentración como la concentración mínima de salida de cada uno de los evaporadores.

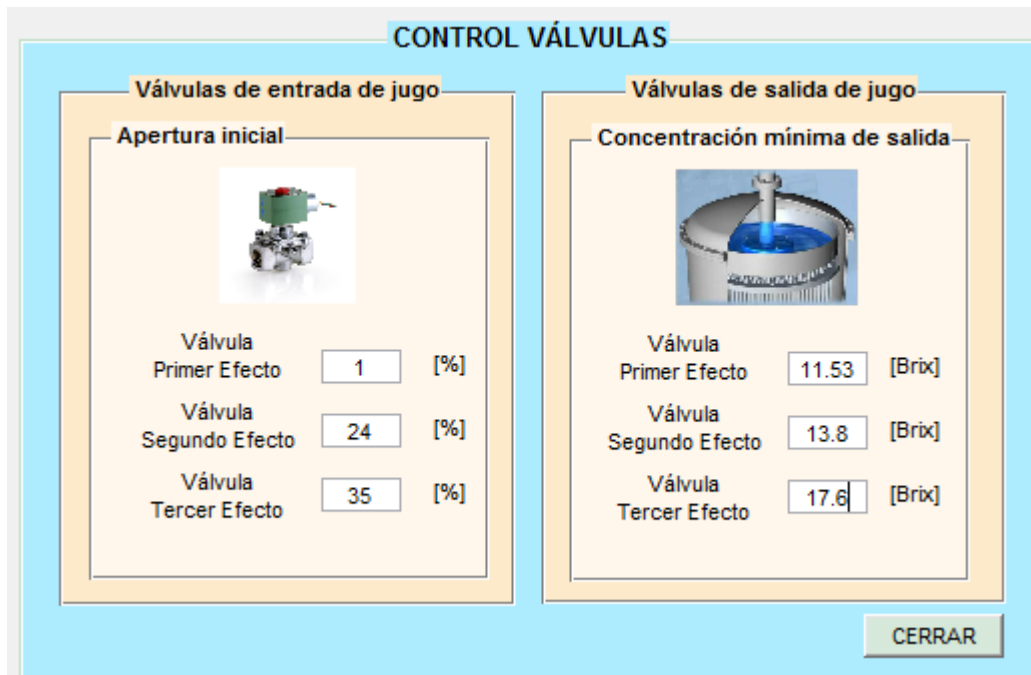
Figura 134. Ejemplos de la barra de estados



Fuente: Autores

En la interfaz de regulación de válvulas también existe un panel en el que se pueden dar datos para las aperturas debido a que por la evaporación la calandria se tiende a vaciar, estas aperturas tratan de compensar la masa perdida por este proceso y se pueden regular desde 0-100% según lo quiera el usuario.

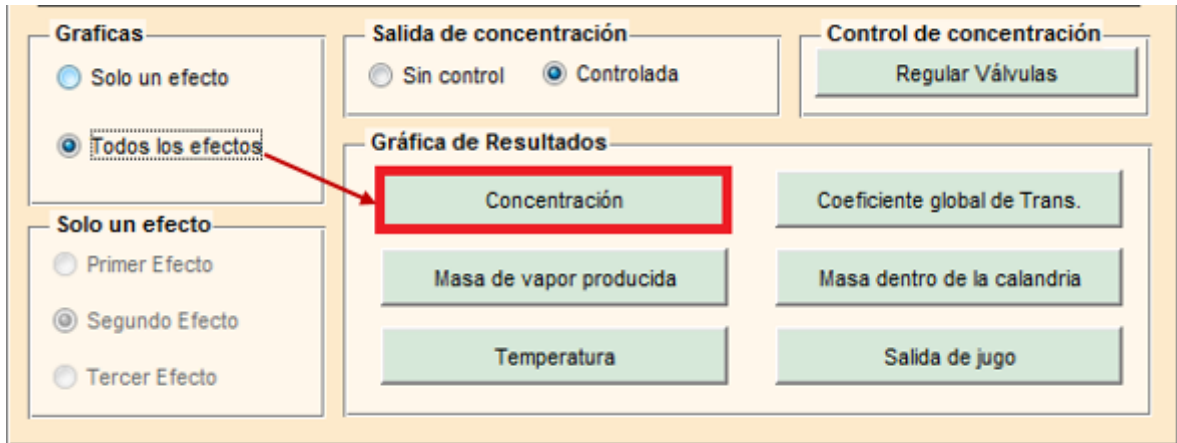
Figura 135. Interfaz de Regulación de válvulas



Fuente: Autores

De la misma manera que con el modelo anterior al terminar de entrar todos los datos se oprime el botón de cargar resultados, se espera el tiempo necesario para que se efectuó la simulación y una vez terminada se ingresa al panel de resultados y analizar las gráficas que se deseen.

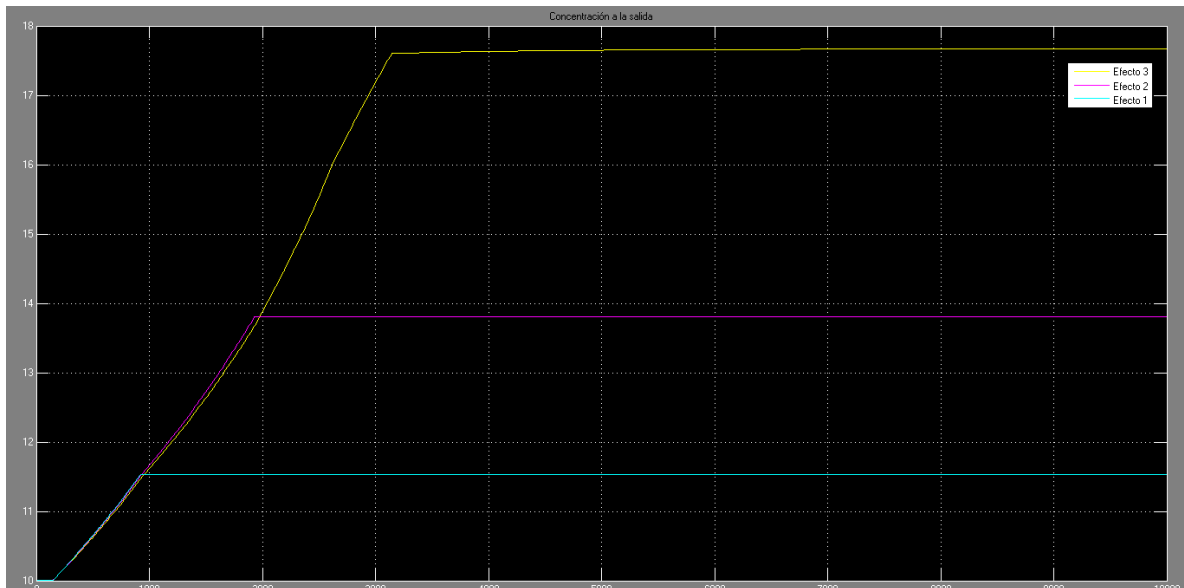
Figura 136. Grafica de resultados



Fuente: Autores

Aquí se pueden apreciar los resultados del control de la concentración por medio de los scopes del *Simulink*.

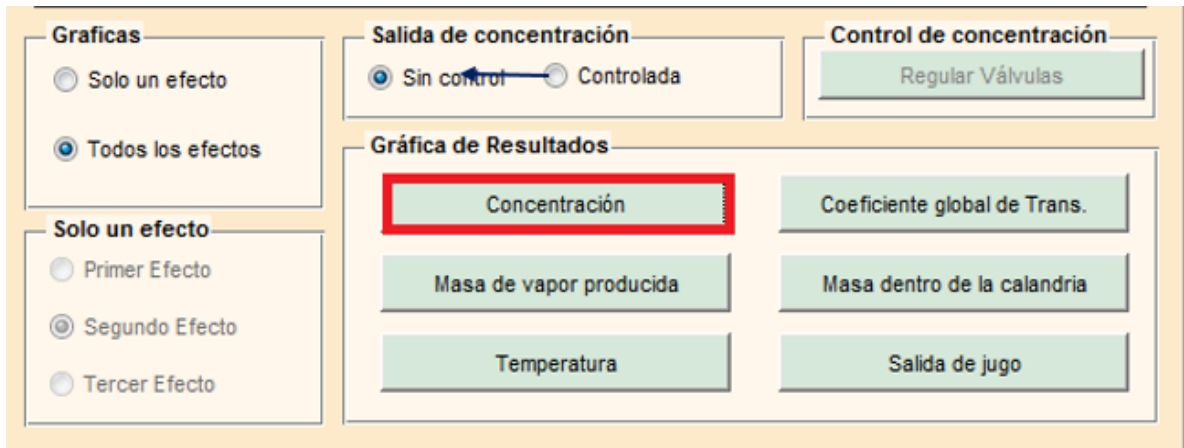
Figura 137. Grafica de concentración de los 3 efectos con concentración controlada



Fuente: Autores

Con los dos modelos cargados se puede cambiar de modelo sin problema en la sección de salida de concentración y comparar las gráficas de cada uno con el otro.

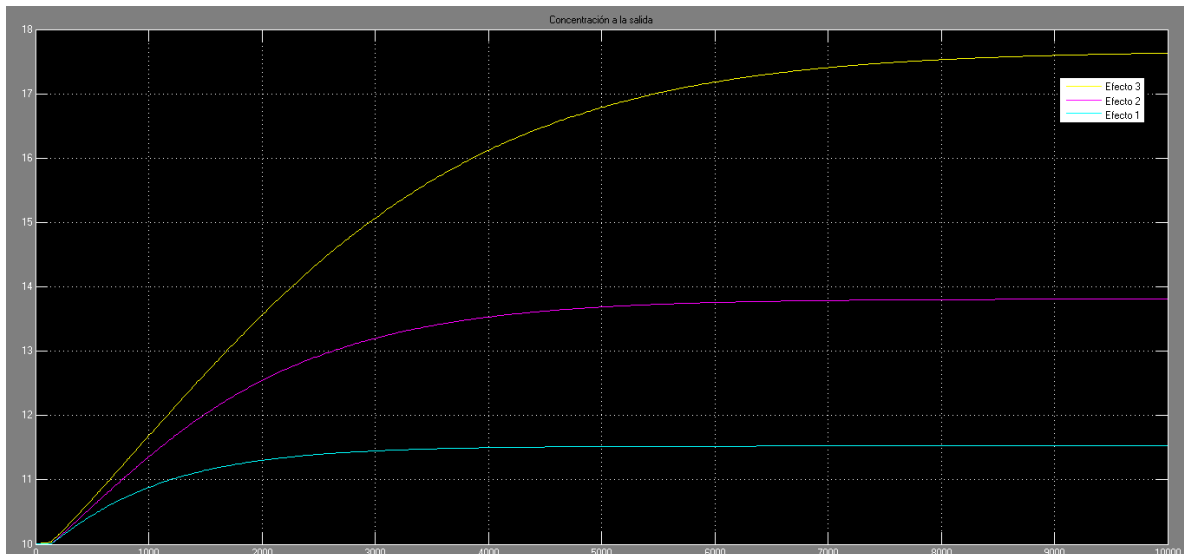
Figura 138. Resultados de los dos modelos



Fuente: Autores

Esta es la misma grafica que se mostró anteriormente, se puede apreciar que en esta la estabilidad toma un tiempo mayor en lograrse en comparación con la del modelo de control de la concentración.

Figura 139. Grafica de concentración de los 3 efectos sin concentración controlada



Fuente: Autores