



**ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**“DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO PARA  
SU IMPLEMENTACIÓN EN EL EVAPORADOR DE SIMPLE  
EFECTO CON SERPENTÍN DEL LABORATORIO DE PROCESOS  
INDUSTRIALES DE LA FACULTAD DE CIENCIAS”**

Trabajo de titulación presentado para optar al grado académico de:

**INGENIERO QUÍMICO**

**AUTORES: TEOBALDO AURELIO PATIÑO ROBLES**

**MIGUEL HUMBERTO VILLACÍS ALEJANDRO**

**TUTOR: ING. HANNIBAL BRITO**

**Riobamba – Ecuador**

**2015**

© 2015, Patiño T.; Villacís M.

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**  
**ESCUELA INGENIERÍA QUÍMICA**

El Tribunal de Tesis certifica que: El trabajo de investigación: “DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN EL EVAPORADOR DE SIMPLE EFECTO CON SERPENTÍN DEL LABORATORIO DE PROCESOS INDUSTRIALES DE LA FACULTAD DE CIENCIAS”, de responsabilidad de los señores: *Teobaldo Aurelio Patiño Robles y Miguel Humberto Villacís Alejandro*, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal de Tesis, quedando autorizada su presentación.

Ing. Hannibal Brito

**DIRECTOR DE TRABAJO  
DE TITULACIÓN**

Ing. Mónica Andrade

**COLABORADORA**

Ing. Mario Villacrés

**MIEMBRO DE TRIBUNAL**

**DOCUMENTALISTA**

**SISBIB - ESPOCH**

**NOTA DEL TRABAJO DE  
TITULACIÓN**

Nosotros, *Teobaldo Aurelio Patiño Robles* y *Miguel Humberto Villacís Alejandro*; somos responsables de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en este trabajo de titulación. El patrimonio intelectual de este trabajo, le pertenece a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO.

---

TEOBALDO AURELIO PATIÑO ROBLES

---

MIGUEL HUMBERTO VILLACÍS ALEJANDRO

## **DEDICATORIA**

Dedico esta tesis principalmente a mi padre Teobaldo Patiño, quien me dio la fortaleza para seguir adelante y cumplir mis objetivos.

También le dedico a mi madre Dolores Robles por haberme dado la vida, educación y apoyarme en los momentos más difíciles.

De igual manera les dedico a mis hermanos(as) por estar siempre apoyándome, principalmente al Abg. Pablo Patiño y la Dra. Celeste Patiño quienes son mis principales pilares en mi formación como profesional.

*Teobaldo Patiño*

Dedico este trabajo a mi familia, por apoyarme incondicionalmente. Sobre todo a mi madre Nelia Alejandro, quien confió en mí cuando nadie quiso hacerlo.

*Miguel Villacís*

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios por guiarme y protegerme durante toda mi vida.

Agradezco a mis padres por educarme y enseñarme el camino correcto para cumplir mis objetivos.  
Agradezco a mi hermano el Abg. Pablo Patiño por creer en mí y siempre estar apoyándome en el transcurso de mi carrera universitaria.

Agradezco a mi hermana la Dra. Celeste Patiño quien ha sido la persona que me ha aconsejado para que nunca desmaye y cumpla con la meta que me propuse.

Agradezco a la Sra. Angelina Cagua quien me apoyo durante mi formación como profesional.

Agradezco a mi enamorada Mery Mendoza por compartir momentos de alegrías y tristezas, así como también por apoyarme incondicionalmente durante todos estos años juntos.

Agradezco a mis profesores de la carrera que gracias a sus conocimientos impartidos lograron formarme como profesional.

***Teobaldo Patiño***

Agradezco a Dios, a mi familia y a todos quienes me ayudaron a culminar esta etapa de mi vida.

***Miguel Villacís***

## TABLA DE CONTENIDOS

CONTENIDO	pp.
RESUMEN.....	xiii
SUMMARY .....	xix
INTRODUCCIÓN .....	1
<b>CAPITULO I</b>	
<b>1 MARCO TEÓRICO REFERENCIAL .....</b>	<b>2</b>
<b>1.1 Sistema de control de procesos .....</b>	<b>2</b>
<i>1.1.1 Topologías de control.....</i>	<i>3</i>
<i>1.1.1.1 Sistema de control de lazo abierto.....</i>	<i>3</i>
<i>1.1.1.2 Sistema de control de lazo cerrado .....</i>	<i>4</i>
<i>1.1.2 Elementos de un proceso automatizado .....</i>	<i>5</i>
<i>1.1.2.1 Elementos de entrada de órdenes.....</i>	<i>5</i>
<i>1.1.2.2 Elementos de entrada de información .....</i>	<i>6</i>
<i>1.1.2.3 Elementos de salida de información.....</i>	<i>7</i>
<i>1.1.2.4 Preaccionadores y accionadores.....</i>	<i>7</i>
<i>1.1.3 Controlador PLC (Controlador Lógico Programable) .....</i>	<i>8</i>
<i>1.1.3.1 Arquitectura de un PLC.....</i>	<i>8</i>
<i>1.1.3.2 Funcionamiento .....</i>	<i>10</i>
<i>1.1.4 Medios de control por pantalla remota.....</i>	<i>13</i>
<b>1.2 Proceso de evaporación.....</b>	<b>13</b>
<i>1.2.1 Métodos de operación de evaporadores.....</i>	<i>14</i>
<i>1.2.2 Evaporadores de simple efecto.....</i>	<i>14</i>
<i>1.2.3 Diseño de evaporadores de simple efecto .....</i>	<i>15</i>
<i>1.2.3.1 Materia prima.....</i>	<i>15</i>
<b>1.3 Diseño y dimensionamiento del sistema de control.....</b>	<b>16</b>
<i>1.3.1 Parámetros operativos del evaporador con serpentín .....</i>	<i>16</i>

1.3.1.1	<i>Cálculo del volumen máximo operativo para alimentación</i> .....	16
1.3.1.2	<i>Dimensionamiento de válvulas de control</i> .....	19
<b>1.3.2</b>	<b><i>Simulación de proceso de evaporación</i></b> .....	<b>21</b>
1.3.2.1	<i>Correlación de propiedades de alimentos</i> .....	21
1.3.2.2	<i>Cálculos de transferencia de calor</i> .....	24
<b>1.3.3</b>	<b><i>Modelo matemático de proceso de evaporación</i></b> .....	<b>34</b>
1.3.3.1	<i>Etapa de calentamiento (elevación de temperatura hasta el punto de ebullición)</i> .....	34
1.3.3.2	<i>Deducción de modelo matemático de proceso de calentamiento</i> .....	36
1.3.3.3	<i>Etapa de evaporación del líquido (absorción de calor latente)</i> .....	37
1.3.3.4	<i>Deducción del modelo matemático del proceso de evaporación</i> .....	39
1.3.3.5	<i>Modelo matemático de las válvulas de control</i> .....	39
<b>1.3.4</b>	<b><i>Aplicación de simulación de proceso de evaporación</i></b> .....	<b>40</b>

## **CAPITULO II**

<b>2</b>	<b>MARCO METODOLÓGICO</b> .....	<b>42</b>
<b>2.1</b>	<b>Muestreo</b> .....	<b>42</b>
<b>2.2</b>	<b>Metodología</b> .....	<b>42</b>
<b>2.2.1</b>	<b>Métodos</b> .....	<b>42</b>
2.2.1.1	<i>Método Inductivo</i> .....	43
2.2.1.2	<i>Método Deductivo</i> .....	43
<b>2.2.2</b>	<b>Técnicas</b> .....	<b>43</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Diagnóstico de funcionalidad y control</b> .....	<b>44</b>
<b>2.2.4</b>	<b>Muestreo de temperatura</b> .....	<b>45</b>
<b>2.2.5</b>	<b>Elaboración de dulce de leche (práctica de validación)</b> .....	<b>46</b>
<b>2.2.6</b>	<b>Elaboración de mermelada (práctica de validación)</b> .....	<b>47</b>
<b>2.2.7</b>	<b>Elaboración de jarabe de uva (práctica de validación)</b> .....	<b>49</b>
<b>2.2.8</b>	<b>Elaboración de jarabe de menta (práctica de validación)</b> .....	<b>50</b>
<b>2.3</b>	<b>Datos experimentales</b> .....	<b>51</b>
<b>2.3.1</b>	<b>Medidas estructurales del evaporador de simple efecto con serpentín</b> .....	<b>51</b>

2.3.2	<i>Parámetros del proceso de evaporación para simulación y cálculo del coeficiente de transferencia de calor.....</i>	53
2.4	<b>Datos adicionales.....</b>	54
2.4.1	<i>Medidas estructurales del evaporador usadas en cálculo de coeficiente de transferencia de calor.....</i>	54
2.4.2	<i>Datos de válvulas de control para simulación.....</i>	54
2.4.3	<i>Propiedades de materiales solidos del evaporador.....</i>	54
2.4.4	<i>Propiedades de flujos de suministros de vapor y agua para simulación y coeficiente de transferencia de calor.....</i>	55
2.5	<b>Construcción de modelo matemático de proceso de evaporación .....</b>	56
2.5.1	<i>Implementación de modelo matemático de evaporación .....</i>	56
2.5.1.1	<i>Implementación de modelo matemático del proceso de calentamiento.....</i>	56
2.5.1.2	<i>Implementación del modelo del proceso de evaporación.....</i>	57
2.5.1.3	<i>Implementación de ecuación de cálculo de composición del concentrado. ....</i>	59
2.5.1.4	<i>Implementación de ecuación de cálculo de capacidad calorífica del concentrado. ...</i>	60
2.5.1.5	<i>Implementación de ecuación de cálculo de densidad de concentrado.....</i>	62
2.5.1.6	<i>Implementación de ecuación de cálculo de viscosidad dinámica del concentrado.....</i>	63
2.5.1.7	<i>Implementación de ecuación de correlación de aumento ebulloscópico .....</i>	65
2.5.1.8	<i>Conexión de bloques de modelo de evaporación.....</i>	66
2.5.2	<i>Implementación modelo matemático del PLC (Programmable Logic Controller).....</i>	67
2.5.2.1	<i>Descripción del modelo matemático del PLC. ....</i>	68
2.5.3	<i>Implementacion de modelo matematico de las valvulas de control.....</i>	70
2.5.4	<i>Conexión de modelos matemáticos para simulación de sistema de control.....</i>	70
2.6	<b>Determinacion de coeficientes de transferencia de calor para el equipo de evaporacion .....</b>	71
2.6.1	<i>Programación de script de MATLAB para el cálculo del coeficiente global de transferencia de calor.....</i>	73
2.6.2	<i>Funciones programadas para cálculo de coeficiente global de transferencia de calor. ....</i>	76
2.6.2.1	<i>Función para el cálculo del factor de ficción de Darcy. ....</i>	76

2.6.2.2	<i>Función de correlación de número de Nusselt en convección forzada para flujo interno en conductos.</i>	77
2.6.2.3	<i>Función de correlación de número de Nusselt en convección forzada para flujo externo en batería de conductos.</i>	78
2.6.2.4	<i>Función de correlación de número de Nusselt en convección forzada para flujo sobre placas planas.</i>	79
<b>2.7</b>	<b>Implementación del sistema de control automático</b>	<b>80</b>
2.7.1	<i>Dispositivos seleccionados para el sistema de control</i>	80
2.7.2	<i>Diagrama de ambiente del sistema de control</i>	81
2.7.3	<i>Diagrama Ladder de programación del PLC Twido</i>	83
2.7.4	<i>Configuración de HMI</i>	87
2.7.5	<i>Implementación de panel de control remoto por conexión inalámbrica</i>	88

### **CAPITULO III**

<b>3</b>	<b>MARCO DE RESULTADOS, DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>	<b>89</b>
<b>3.1</b>	<b>Resultados</b>	<b>89</b>
3.1.1	<i>Resultados de cálculo de parámetros operativos del evaporador.</i>	89
3.1.2	<i>Resultados de cálculos de transferencia de calor.</i>	89
3.1.3	<i>Resultados de dimensionamiento de válvulas de control.</i>	90
3.1.3.1	<i>Dimensionamiento de válvulas de agua</i>	90
3.1.3.2	<i>Dimensionamiento de válvula de vapor</i>	91
3.1.4	<i>Resultados de simulación de proceso de evaporación sin sistema de control automático</i>	91
3.1.4.1	<i>Temperatura del concentrado.</i>	91
3.1.4.2	<i>Calor específico del concentrado</i>	92
3.1.4.3	<i>Densidad del concentrado</i>	92
3.1.4.4	<i>Viscosidad dinámica del concentrado</i>	93
3.1.4.5	<i>Fracción de sólidos totales en el concentrado</i>	93
3.1.5	<i>Resultados de simulación de proceso de evaporación controlado</i>	94
3.1.5.1	<i>Temperatura del concentrado.</i>	94

3.1.5.2	<i>Capacidad calorífica del concentrado</i> .....	94
3.1.5.3	<i>Densidad del concentrado</i> .....	95
3.1.5.4	<i>Viscosidad dinámica del concentrado</i> .....	95
3.1.5.5	<i>Fracción de solidos totales del concentrado</i> .....	96
3.1.6	<b><i>Simulación de perfil de velocidad generado por el agitador en COMSOL Multiphysics</i></b> .....	<b>96</b>
3.2	<b>Discusión de resultados</b> .....	<b>97</b>
3.2.1	<b><i>Discusión de resultados de cálculo de parámetros operativos</i></b> .....	<b>97</b>
3.2.2	<b><i>Discusión de resultados de cálculos de transferencia de calor</i></b> .....	<b>98</b>
3.2.3	<b><i>Discusión de resultados de dimensionamiento de válvulas</i></b> .....	<b>98</b>
3.2.3.1	<i>Discusión de resultados de dimensionamiento de válvula de agua</i> .....	98
3.2.3.2	<i>Discusión de resultados de dimensionamiento de válvulas de vapor</i> .....	99
3.2.4	<b><i>Discusión resultados de simulación del proceso de evaporación de sin sistema de control automático</i></b> .....	<b>99</b>
3.2.4.1	<i>Discusión de resultados de temperatura del concentrado</i> .....	99
3.2.4.2	<i>Discusión de resultados de calor específico de concentrado</i> .....	100
3.2.4.3	<i>Discusión de resultados de densidad del concentrado</i> .....	101
3.2.4.4	<i>Discusión de resultados de viscosidad dinámica del concentrado</i> .....	101
3.2.4.5	<i>Discusión de resultados de fracción de solidos totales del concentrado</i> .....	102
3.2.5	<b><i>Discusión de resultados de simulación del proceso de evaporación controlado</i></b> ....	<b>102</b>
3.2.5.1	<i>Discusión de resultados de temperatura del concentrado</i> .....	102
3.2.5.2	<i>Discusión de resultados de calor específica de concentrado</i> .....	103
3.2.5.3	<i>Discusión de resultados de densidad del concentrado</i> .....	103
3.2.5.4	<i>Densidad de resultados de viscosidad dinámica del concentrado</i> .....	104
3.2.5.5	<i>Discusión de resultados de fracción de solidos totales del concentrado</i> .....	104
3.2.6	<b><i>Discusión de resultados de simulación del perfil de velocidad del fluido</i></b> .....	<b>105</b>
	<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>106</b>
	<b>RECOMENDACIONES</b> .....	<b>107</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	
	<b>ANEXOS</b>	

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1-1</b>	Composición de productos lácteos extraídas de las normas técnicas del INEN.....	15
<b>Tabla 2-1</b>	Factores de corrección de correlación de numero Nusselt para sistemas de conductos.....	29
<b>Tabla 1-2</b>	Diagnóstico de funcionalidad y control del evaporador.....	44
<b>Tabla 2-2</b>	Muestreo de temperaturas para el cálculo de transferencia de calor del evaporador con serpentín.....	45
<b>Tabla 3-2</b>	Técnica para elaboración de dulce de leche.....	46
<b>Tabla 4-2</b>	Procedimiento para la elaboración de mermelada.....	47
<b>Tabla 5-2</b>	Procedimiento para la elaboración de jarabe de uva.....	49
<b>Tabla 6-2</b>	Procedimiento para la elaboración de jarabe de menta.....	50
<b>Tabla 7-2</b>	Medidas tomadas del equipo evaporador para planos.....	51
<b>Tabla 8-2</b>	Parámetros para simulación del proceso de evaporación.....	53
<b>Tabla 9-2</b>	Medidas del equipo evaporador para simulación.....	54
<b>Tabla 10-2</b>	Datos para simulación de válvulas de control.....	54
<b>Tabla 11-2</b>	Propiedades de los materiales del evaporador.....	54
<b>Tabla 12-2</b>	Parámetros para simulación del proceso de evaporación.....	55
<b>Tabla 13-2</b>	Tabla de entradas y salidas del bloque función calSys.....	56
<b>Tabla 14-2</b>	Tabla de entradas y salidas del bloque función evapSys.....	57
<b>Tabla 15-2</b>	Tabla de entradas y salidas del bloque función cComp.....	59
<b>Tabla 16-2</b>	Tabla de entradas y salidas del bloque función corrCp.....	60
<b>Tabla 17-2</b>	Tabla de entradas y salidas del bloque función corrRho.....	62
<b>Tabla 18-2</b>	Tabla de entradas y salidas del bloque función corrVisc.....	63
<b>Tabla 19-2</b>	Tabla de entradas y salidas del bloque función corrTb.....	65
<b>Tabla 20-2</b>	Tabla de simplificaciones para resolución de transferencia de calor.....	71
<b>Tabla 21-2</b>	Dispositivos y materiales usados para construcción del sistema de control.....	80
<b>Tabla 1-3</b>	Resultados de cálculo de parámetros operativos del evaporador.....	89
<b>Tabla 2-3</b>	Resultados de cálculo de parámetros operativos del evaporador.....	89

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1-1</b>	Sistema de control de lazo abierto.....	Z4
<b>Figura 2-1</b>	Sistema de control de lazo cerrado.....	4
<b>Figura 3-1</b>	Elementos básicos de un proceso automatizado.....	5
<b>Figura 4-1</b>	Elementos de entradas de órdenes.....	6
<b>Figura 5-1</b>	Ejemplos de accionadores usados en sistemas de control de procesos...	7
<b>Figura 6-1</b>	Ejemplos de PLC (Autómatas programables) usados a nivel industrial...	8
<b>Figura 7-1</b>	Elementos de entradas de órdenes.....	10
<b>Figura 8-1</b>	Entorno de programación de Matlab 2013b versión de prueba.....	41
<b>Figura 9-1</b>	Entorno Simulink de Matlab 2013b versión de prueba.....	41
<b>Figura 1-2</b>	Bloque función calSys.....	56
<b>Figura 2-2</b>	Bloque función evapSys.....	58
<b>Figura 3-2</b>	Bloque función cComp.....	59
<b>Figura 4-2</b>	Bloque función corrCp.....	61
<b>Figura 5-2</b>	Bloque función corrRho.....	62
<b>Figura 6-2</b>	Bloque función corrVisc.....	64
<b>Figura 7-2</b>	Bloque función corrTb.....	65
<b>Figura 8-2</b>	Diagrama de bloques para modelo matemático de evaporación, subsistema MCEvaporador.....	67
<b>Figura 9-2</b>	Diagrama de bloques StateFlow, modelo lógico que representa al PLC..	69
<b>Figura 10-2</b>	Diagrama de bloques de modelo de válvulas.....	70
<b>Figura 11-2</b>	Diagrama de bloques, para proceso de evaporación automatizado.....	71
<b>Figura 12-2</b>	Diagrama de resistencia térmica del evaporador con serpentín.....	72
<b>Figura 13-2</b>	Diagrama de elementos del sistema de control con variables asignadas..	81
<b>Figura 14-2</b>	Diagrama de ambiente del sistema de control.....	82
<b>Figura 15-2</b>	Pestaña de creación de proyectos de TwidoSuite 2.20.....	83
<b>Figura 16-2</b>	Diagrama de ambiente del sistema de control.....	84
<b>Figura 17-2</b>	Tabla de entradas digitales usadas en PLC.....	84
<b>Figura 18-2</b>	Tabla de salidas digitales usadas en PLC.....	85
<b>Figura 19-2</b>	Tabla de configuración de entradas analógicas, usadas en PLC.....	85
<b>Figura 20-2</b>	Configuración de módulo de conexión Ethernet.....	85
<b>Figura 21-2</b>	Tabla de marcas de memoria.....	86
<b>Figura 22-2</b>	Ventana de configuración de comportamiento del PLC.....	86
<b>Figura 23-2</b>	Ventana de edición de diagramas Ladder del PLC.....	87

<b>Figura 24-2</b>	Entorno de edición de pantalla HMI Brainchild, Panel Studio v1.34.....	88
<b>Figura 1-3</b>	Resultado de temperatura del concentrado para simulación de proceso de evaporación sin control automático.....	91
<b>Figura 2-3</b>	Resultado de Calor específico del concentrado para simulación de proceso de evaporación sin control automático.....	92
<b>Figura 3-3</b>	Resultado de densidad del concentrado para simulación de proceso de evaporación sin control automático.....	92
<b>Figura 4-3</b>	Resultado de viscosidad del concentrado para simulación de proceso de evaporación sin control automático.....	93
<b>Figura 5-3</b>	Resultado de viscosidad del concentrado para simulación de proceso de evaporación sin control automático.....	93
<b>Figura 6-3</b>	Resultado de temperatura del concentrado para simulación de proceso de evaporación controlado.....	94
<b>Figura 7-3</b>	Resultado de capacidad calorífica del concentrado para simulación de proceso de evaporación controlado.....	94
<b>Figura 8-3</b>	Resultado de densidad del concentrado para simulación de proceso de evaporación controlado.....	95
<b>Figura 9-3</b>	Resultado de viscosidad dinámica del concentrado para simulación de proceso de evaporación controlado.....	95
<b>Figura 10-3</b>	Resultado de fracción de sólidos totales del concentrado para simulación de proceso de evaporación controlado.....	96
<b>Figura 11-3</b>	Resultado de simulación de agitador del evaporador para fluidos con características similares al agua.....	96
<b>Figura 12-3</b>	Resultado del perfil de velocidad de agitador del evaporador para fluidos con características similares al agua.....	97

## INDICE DE ECUACIONES

<b>Ec. 1</b>	Volumen total del cilindro.....	16
<b>Ec. 2</b>	Longitud del serpentín como hélice.....	17
<b>Ec. 3</b>	Sección transversal de un tubo cilíndrico.....	17
<b>Ec. 4</b>	Volumen de un tubo cilíndrico.....	17
<b>Ec. 5</b>	Altura de fluido perdida por el serpentín.....	17
<b>Ec. 6</b>	Altura de fluido perdida por factor de seguridad.....	18
<b>Ec. 7</b>	Altura de fluido operativa del evaporador.....	18
<b>Ec. 8</b>	Volumen máximo operativo del cilindro.....	19
<b>Ec. 9</b>	Dimensionamiento de válvula de control para agua.....	19
<b>Ec. 10</b>	Dimensionamiento de válvula de control para vapor de agua.....	20
<b>Ec. 11</b>	Dimensionamiento de válvula de control para gases.....	20
<b>Ec. 12</b>	Conversión de $C_p$ a $K_p$ .....	21
<b>Ec. 13</b>	Sistema de ecuaciones de correlación de aporte para $C_p$ de un alimento.....	21
<b>Ec. 14</b>	Sumatoria de los aportes de $C_p$ en función de la composición.....	21
<b>Ec. 15</b>	Sistema de ecuaciones de correlación de aporte para $k$ de un alimento.....	22
<b>Ec. 16</b>	Sumatoria de los aportes de $k$ en función de la composición.....	22
<b>Ec. 17</b>	Sistema de ecuaciones de correlación de aporte para $\rho$ de un alimento.....	22
<b>Ec. 18</b>	Sumatoria de los aportes de $\rho$ en función de la composición.....	23
<b>Ec. 19</b>	Correlación de viscosidad alimentos diluidos.....	23
<b>Ec. 20</b>	Correlación de viscosidad de la leche en función de sólidos totales.....	23
<b>Ec. 21</b>	Correlación de viscosidad de la leche en función de grasa 1.....	23
<b>Ec. 22</b>	Correlación de viscosidad de la leche en función de grasa 2.....	24
<b>Ec. 23</b>	Correlación de viscosidad de la leche en función de grasa 3.....	24
<b>Ec. 24</b>	Correlación de Colebrook para factor de fricción de Darcy.....	24
<b>Ec. 25</b>	Correlación de número de Nusselt para flujo laminar dentro de conductos.....	25
<b>Ec. 26</b>	Correlación de Gnielinski para número de Nusselt en flujo transitorio dentro de conductos.....	25
<b>Ec. 27</b>	Correlación de factor de fricción de Darcy de Pethukov.....	25
<b>Ec. 28</b>	Correlación de número de Nusselt para flujo turbulento dentro de conductos..	25
<b>Ec. 29</b>	Coefficiente de convección para flujo interno en conductos cilíndricos.....	26
<b>Ec. 30</b>	Resistencia a la transferencia de calor por conducción en paredes de cilindros..	27
<b>Ec. 31</b>	Temperatura de superficie externa de un cilindro.....	27

<b>Ec. 32</b>	Velocidad máxima de flujo en batería de conductos.....	28
<b>Ec. 33</b>	Numero de Reynolds para flujo entre conductos.....	28
<b>Ec. 34</b>	Correlaciones del número de Nusselt en función del número Reynolds para flujo entre conductos alineados.....	29
<b>Ec. 35</b>	Temperatura del fluido evaluada para convección en pared plana.....	29
<b>Ec. 36</b>	Número de Reynolds para flujo sobre placa plana.....	30
<b>Ec. 37</b>	Correlaciones de número Nusselt para flujo sobre capa plana.....	31
<b>Ec. 38</b>	Coefficiente de convección para flujo sobre pared plana.....	31
<b>Ec. 39</b>	Resistencia térmica de pared plana.....	32
<b>Ec. 40</b>	Temperatura media logarítmica.....	32
<b>Ec. 41</b>	Resistencia térmica global del sistema de intercambio de calor.....	33
<b>Ec. 42</b>	Coefficiente global de transferencia de calor.....	33
<b>Ec. 43</b>	Eficiencia de proceso de intercambio de calor.....	34
<b>Ec. 44</b>	Capacidad calorífica media del proceso de intercambio.....	34
<b>Ec. 45</b>	Incremento ebulloscópico para alimento concentrado.....	35
<b>Ec. 46</b>	Modelo matemático de etapa de calentamiento.....	36
<b>Ec. 47</b>	Balance de energía.....	36
<b>Ec. 48</b>	Balance de energía para proceso continuo.....	37
<b>Ec. 49</b>	Modelo matemático de etapa de evaporación.....	38
<b>Ec. 50</b>	Balance de materia para proceso continuo.....	39
<b>Ec. 51</b>	Modelo matemático de válvula de control.....	40

## INDICE DE ANEXOS

- Anexo A** Fotografías de evaporador sin sistema de control
- Anexo B** Fotografías de evaporador con sistema de control implementado
- Anexo C** Fotografías de panel de control construido e implementado para sistema de control del evaporador
- Anexo D** Fotografías de elementos externos del panel de control
- Anexo E** Fotografías de elementos internos del panel de control
- Anexo F** Fotografías de elementos finales del sistema de control
- Anexo G** Diagrama Ladder programado en el PLC, primera parte
- Anexo H** Diagrama Ladder programado en el PLC, segunda parte.
- Anexo I** Diagrama Ladder programado en el PLC, tercera parte.
- Anexo J** Interface gráfica de pantalla remota hecha Lookout 6.2
- Anexo K** Diagrama de conexión de dispositivos con controlador PLC
- Anexo L** Pantallas implementadas en interface gráfica HMI Brainchild, primera parte
- Anexo M** Pantallas implementadas en interface gráfica HMI Brainchild, segunda parte
- Anexo N** Pantallas implementadas en interface gráfica HMI Brainchild, tercera parte
- Anexo O** Pantallas implementadas en interface gráfica HMI Brainchild, cuarta parte
- Anexo P** Pantallas implementadas en interface gráfica HMI Brainchild, quinta parte
- Anexo Q** Ejemplo de matriz cuantitativa para la determinación de variables sujetas a control.
- Anexo R** Ejemplo de matriz cualitativa para la determinación de interacción entre variables a controlar
- Anexo S** Diagramación de construcción de circuito de adquisición de datos de temperatura
- Anexo T** Práctica de validación de elaboración de dulce de leche (arequipe)

## RESUMEN

Se realizó el diseño e implementación de un sistema de control automático para el evaporador de serpentín de simple efecto, el mismo que se encuentra en el laboratorio de procesos industriales de la Facultad de Ciencias. Para ello se generó un modelo matemático del proceso de evaporación usando datos reales, con lo que se decidió que tipo de automatización se implementaría al proceso. Para la selección de las variables de proceso a controlar se realizó el diagnóstico de la funcionalidad del equipo en busca de fallas e impedimentos para la implementación del sistema de control. De esta manera se automatizaron las variables de proceso: temperatura del concentrado, frecuencia del motor eléctrico y el tiempo del proceso. Como controlador se usó un controlador lógico programable [PLC], que controla el proceso por programación lógica. Para medir la temperatura, se utilizó una resistencia térmica [RTD] como sensor. Para controlar la frecuencia del motor eléctrico se utilizó un variador de frecuencia desde 0 a 60 Hz. Para prestar mayor facilidad para el ingreso y monitoreo de las variables de proceso se implementaron dos vías: la pantalla HMI táctil y el panel remoto mediante red inalámbrica Wireless. En el control de flujo de suministro de vapor y agua se utilizaron electroválvulas, cerradas al fallo. Para el ajuste del sistema de control se realizaron prácticas de validación del equipo, en las que se elaboraron: mermelada, dulce de leche, jarabe de menta y uva. Con los resultados de las prácticas se obtuvieron rendimientos de: 33% para dulce de leche, 50-70% para mermelada y 60% para jarabes. La eficiencia del evaporador aumento en un 22,57%, de 66,30% sin sistema de control a 88,87% con el proceso controlado. Para el uso del evaporador se recomienda trabajar a 92°C con un margen de error de  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ , y no superar los 95°C.

**Palabras clave:** <SISTEMA DE CONTROL>, <EVAPORADOR>, <TEMPERATURA DE CONCENTRADO>, <LABORATORIO DE PROCESOS INDUSTRIALES>, <SENSOR TERMORESISTENCIA>, <RENDIMIENTO>, <Human Machine Interface [HMI]>, <Programmable Logic Controller [PLC]>

## SUMMARY

The design and implementation of an automatic control system for the evaporator coil single action that is in the laboratory of industrial processes of the Faculty of Sciences was held. For them generate mathematical model of evaporation process using actual data from the evaporator and the raw material used, so you can decide what kind of automation process would be implemented. Temperature, frequency of the electric motor and the time per step and total process: in this way the process variables were automated. It was used as a PLC controller, which controls the logic programming process. To measure an RTD temperature sensor, which is connected to an analog input module annexed to the PLC used. To control the frequency of the electric motor an inverter was used from 0-60 Hz, which effects mechanical speed reducer represents 30 rpm. HMI touch screen and remote panel via wireless connection: to provide greater ease of entry and monitoring process variables two-way implemented. The latter variable is the time controlled process, which is divided into two stages or evaporation cooking process and the cooling time. To control the flow of steam and water supply valves are used, they closed to failure. They simply allow material flow or closed. The objective of the design and implementation was to expand the gamma of foodstuffs to be developed with this team and facilitate the handling of the process.

**Keywords:** <SYSTEM CONTROL>, <AUTOMATION>, <EVAPORADOR>, <OPERATE TIME>, <TEMPERATURE>, <FREQUENCY>, <CONTROLLER>, <SENSOR> <PROCESS>, <HMI (Human Machine Interface)>, <PLC (Programmable Logic Controller)>

## INTRODUCCIÓN

Los procesos industriales, desde su implementación como medio de producción de bienes y servicios, han necesitado de métodos que permitan mantener: condiciones, parámetros y variables de proceso dentro de un límite aceptable; es decir, "mantenerlos bajo control". El control de procesos industriales garantiza la seguridad y la calidad de bienes o servicios, cumpliendo de esta manera con uno de sus principales objetivos: "*proveer productos, bienes o servicios, que sean aptos para su consumo. Garantizando: seguridad, calidad y eficiencia en cada etapa del proceso*". Mantener un nivel de eficiencia requiere un control exhaustivo de la calidad de los procesos y productos, la seguridad del personal y la del consumidor; al proporcionarle productos con cumplimiento de la normativa vigente en el país o la normativa interna implementada.

En ciertos casos, la automatización forma parte del diseño de equipos y procesos; es decir, que se proyecta la implementación de mecanismos de control de variables de operación, en la fase de diseño. En otros casos, cuando no existe un sistema de control o no es lo suficientemente robusto para garantizar seguridad y calidad, puede ser implementado si el proceso lo permite. Tomando en cuenta varios aspectos como: el nivel tecnológico; tiempo de uso; beneficio vs costos; facilidad de implementación de instrumentación como: *sensores, transductores y controladores*, se puede hacer uso de estudios de automatización. Esto se aplica para procesos o equipos en funcionamiento, donde se evalúan: las capacidades y limitaciones del equipo o proceso; eficiencia: térmica, mecánica, eléctrica, logística, etc., para determinar su compatibilidad con la automatización.

El diseño actual del evaporador de simple efecto con serpentín horizontal, está orientado a la elaboración de un único producto; que es el dulce de leche, *su diseño está hecho para la producción de arequipe*, pudiendo dadas sus cualidades ser apto para elaborar otros productos como mermelada u otros concentrados. La mayor parte del equipo está hecho en acero inoxidable ASTM 304 cromo-níquel y es de fabricación reciente. Consta de un motor eléctrico que acciona el agitador, mediante un reductor de velocidad. Para el control de flujo de vapor y la apertura de la salida de condensado, tras la trampa de vapor, existen válvulas manuales. El sistema eléctrico consta de: botonera de arranque y apagado, cables de conexión eléctrica hacia el motor y toma de corriente de 110V/220V. En la Facultad de Ciencias no existen trabajos previos relacionados con el diseño e implementación de sistemas de control para equipos. Siendo Ingeniería Química no especializada en diseño eléctrico, para sistemas de control, será necesaria la asesoría de profesionales especializados. Los resultados de este trabajo pueden ser usados en futuros trabajos sobre control de procesos en la escuela de Ingeniería Química.

## CAPITULO I

### 1 MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

#### 1.1 Sistema de control de procesos

Los sistemas de control de procesos, son medios tecnológicos que permiten disminuir la cantidad de trabajo necesario, para llevar a cabo un proceso. Cuando hablamos de trabajo, nos referimos, al que es necesario para: evitar daños en el producto y resultados no esperados. Las tareas de monitorización y asignación de ajustes necesarios a las variables operatorias, en los primeros procesos industriales del siglo XVIII, lo realizaban varios operarios por equipo; esto disminuía eficiencia y aumentaba el riesgo de accidentes, que eran comunes en las factorías de aquel siglo. Por la sinergia del proceso, debido a su vulnerabilidad a las perturbaciones y la incertidumbre; resultado de la incapacidad de predecir la respuesta que tendría el proceso, a reajustes de las operaciones, se desarrollaron instrumentos que permitían: medir, decidir y ejecutar acciones de manera automática, sin mayor acción humana que la calibración y sincronización al momento del arranque. Consecuentemente con los avances tecnológicos, los instrumentos para el control fueron asimilándolos, aumentando: la capacidad de procesamiento de información, precisión y exactitud en las medidas, y facilitando aún más su uso para sistemas industriales complejos.

En la automatización de un proceso, es necesario tomar decisiones sobre la limitación de las capacidades que tendrá el sistema de control. Delimitar la complejidad, en función de: las necesidades de los usuarios u operarios, la complejidad del proceso, las posibles mejoras futuras, el incremento de la vida útil de los equipos y principalmente el presupuesto, permiten dar un ligero bosquejo sobre cómo podría ser el diseño del sistema de control. El conocer el proceso permite determinar que variables son críticas para el control del mismo, además de reconocer la relación entre las variables, y poder seleccionar las variables a controlar directa o indirectamente. En el caso del proceso de evaporación las variables críticas son: la temperatura de la solución a concentrarse o el fluido de alimentación, la presión o temperatura del vapor que se alimenta al serpentín, las revoluciones del agitador que son en realidad las revoluciones del motor eléctrico, el tiempo de retención del proceso para el ciclo de evaporación y enfriado.

En primera instancia encaminamos el diseño del sistema de control, hacia el uso de controladores PID (*Proporcional, Integral y Derivativo*), pero existen otras soluciones mucho más baratas y sencillas para implementar un sistema de control. En remplazo de un controlador PID, se decidió

usar un PLC<sup>1</sup> (*Programmable Logic Controller*), que nos ofrece mayor facilidad de configuración, y además podemos implementar bajo programación, algoritmos que emulen un controlador PID. En el presente apartado, describiremos cada elemento que conforma un sistema de control, usando un PLC como controlador en lugar de un PID. Como anotación sobre los elementos de control necesarios para un sistema con PLC, al final lo único que cambia es el controlador, siendo necesarios: sensores, transductores, elementos finales, etc., con la diferencia en el controlador. Pero en base, al emplear un PLC, el fundamento de control deja de emplear los mismos principios del control PID, y estos pasan a ser, el uso de un algoritmo lógico; usando un lenguaje de programación de tipo IL<sup>2</sup> (*Instruction List*) o Ladder<sup>3</sup> (*Lenguaje de contactos*) entre otros. Aun siendo los mecanismos de control diferentes entre controladores PID y PLC, emplean los mismos tipos de sistemas de control.

### ***1.1.1 Topologías de control***

Los sistemas de control pueden adoptar distintas configuraciones, a las que se les puede agrupar en dos clases. Estas clases se pueden diferenciar por la forma del circuito de control. En uno de ellos, el circuito describe una línea recta entre las entradas y las salidas, a esta topología de control se la llama de *Lazo Abierto*. Cuando la forma del circuito describe un ciclo o una forma geométrica cerrada, se le suele llamar de *Lazo Cerrado*. La analogía de las figuras geométricas y las clases de sistemas de control es válida para circuitos simples, porque aunque son válidas para sistemas más complejos, es mucho más difícil notar las formas geométricas por la cantidad enorme de entradas, retro-alimentaciones, bloques, etc. A continuación se describe de mejor manera las topologías de los circuitos de control.

#### ***1.1.1.1 Sistema de control de lazo abierto***

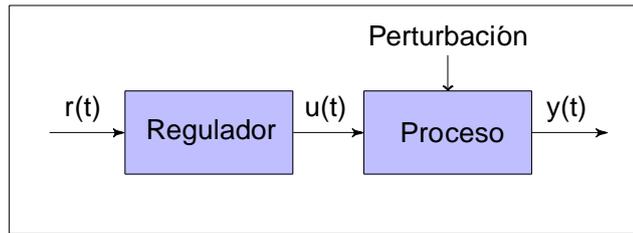
Son aquellos sistemas en los que las acciones de control no dependen específicamente de las salidas. Normalmente este tipo de controles usan un regulador o un accionador, para obtener un ajuste calculado o estimado. El principal problema con el lazo abierto son las perturbaciones sobre el proceso; que generan alteraciones en las variables a controlar. Un ejemplo son los reguladores de los sistemas de calefacción, que están calibrados para ciertas condiciones de temperatura interior y ambiental. Las variaciones de estas temperaturas provocan el reajuste del regulador, para poder obtener la temperatura deseada. (NISE, 2002, pp.10, 11)

---

<sup>1</sup> Controlador lógico programable

<sup>2</sup> Lista de instrucciones, comprende una secuencia de acciones que se ejecutan, en función de condiciones programadas.

<sup>3</sup> Lenguaje de programación gráfico basado en esquemas eléctricos de control clásicos

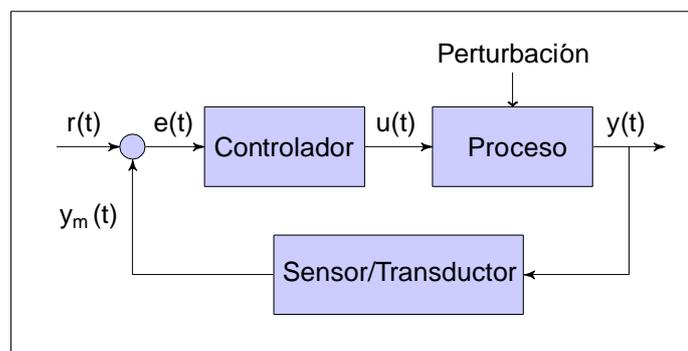


**Figura 1-1:** Sistema de control de lazo abierto.  
 Realizado por: PATIÑO T.; VILLACÍS M., 2015.

En la figura 1-1, se describe la forma general de un diagrama de bloques para un sistema de control de lazo abierto. En él se puede entender que este circuito es bastante sensible a las perturbaciones ejercidas sobre el proceso. El instrumento encargado de emitir la señal de control  $u(t)$ , es un regulador o controlador. Los reguladores ejecutan una acción pre-calculada que lleva a la variable controlada hasta el punto de consigna  $r(t)$ . Para determinar el valor de señal de control, su rango y proporcionalidad, se requiere conocer lo suficiente el problema para poder generar un modelo matemático que aproxime el comportamiento del proceso en función a las variaciones del regulador. Lo frecuente es sintonizar y calibrar los reguladores de manera experimental. (Mendiburu, 2003, p. 11)

#### 1.1.1.2 Sistema de control de lazo cerrado

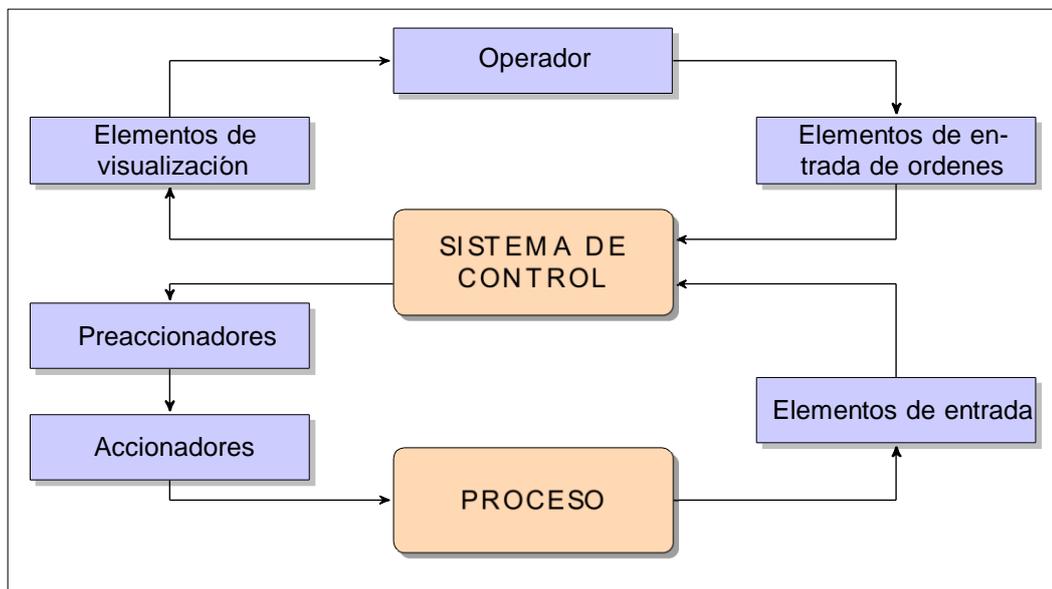
En estos sistemas las acciones de control son ajustadas por re-alimentación de las salidas. Estos sistemas son usados cuando se requiere que el proceso se ajuste por sí mismo. Para poder devolver una señal que represente la variable de salida  $y(t)$ , se emplean sensores. Si el controlador requiere una señal de tipo diferente a la emitida por el sensor, se usan transductores. La señal  $y_m(t)$  se resta del punto de consigna  $r(t)$ , dando como resultado el margen de error entre la salida y el valor deseado para la variable controlada. El error  $e(t)$  se usa en el controlador, este lo procesa y emite una señal de control  $u(t)$  que se envía a un elemento final de control. Para la figura 2-1, el elemento final está implícito dentro del bloque que representa el proceso. (NISE, 2002, pp.12, 13)



**Figura 2-1:** Sistema de control de lazo cerrado.  
 Realizado por: PATIÑO T.; VILLACÍS M., 2015.

### 1.1.2 Elementos de un proceso automatizado

Un proceso automatizado tiene un conjunto de elementos que cumplen una función específica dentro del sistema de control. En la figura 3-1, podemos observar la distribución básica de los elementos de un proceso automatizado. Posteriormente se tratará cada uno de los elementos representados en el diagrama; describiéndolos y dando ejemplos para mayor comprensión. La secuencia que se observa en la gráfica, es la básica para procesos controlados o relación proceso-sistema de control. Existen variantes que agregan transductores o filtros para señal, dependiendo de las características del proceso y el controlador.



**Figura 3-1:** Elementos básicos de un proceso automatizado.

Fuente: Boix O., Automatismos eléctricos programables. Universitat Politècnica de Catalunya

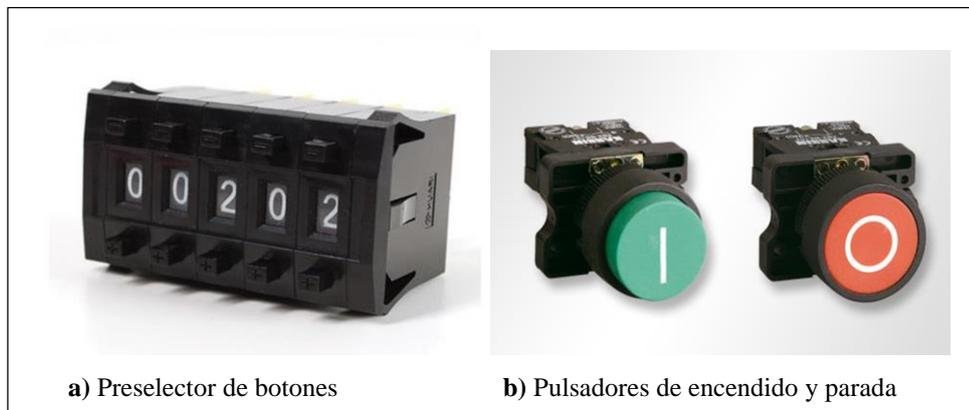
Realizado por: PATIÑO T.; VILLACÍS M., 2015.

#### 1.1.2.1 Elementos de entrada de órdenes

Son dispositivos que permiten al operador, ingresar valores u órdenes al sistema de control. Dependiendo del principio que les permita emitir una señal pueden ser: mecánicos-neumáticos, eléctricos, electrónico-digitales, etc. Tomando en cuenta la información que permiten ingresar pueden ser: numéricos, alfanuméricos o binarios. (Boix O. et al, 1995, p. 10)

Son Binarios, cuando la información corresponde a estados de 1 (*encendido, cerrado, verdadero, on,...*) o 0 (*apagado, abierto, falso, off,...*). Ejemplos de elementos de entrada binarios son los pulsadores, conmutadores, interruptores, palancas, etc. Los elementos de entrada numéricos son los que permiten el ingreso de números, ejemplos de ellos son los pre-selectores digitales de rueda o botones. Los alfanuméricos son los que permiten el ingreso de números y letras, que se usan

para escribir comandos pre-programados, los más comunes son los teclados de panel. En la figura 4-1 se pueden observar ejemplos de los elementos anteriormente descritos.



**Figura 4-1:** Elementos de entradas de órdenes.  
Realizado por: PATIÑO T.; VILLACÍS M., 2015.

#### 1.1.2.2 Elementos de entrada de información

Los elementos de entrada de información son dispositivos que permiten en base a la medida de una magnitud, emitir una señal que representa dicha medida. Según el tipo de señal se pueden clasificar en:

**Binarios:** Son los que miden una magnitud y emiten una señal a razón de un umbral, es decir que la señal emitida representa, si se ha superado dicho umbral o se permanece bajo él. En resumen, si la medida supera el umbral se obtiene una señal afirmativa (*Verdadera, 1, True, V,...*), en cambio, si no lo supera se obtiene una señal negativa (*Falso, 0, False, F,...*). Normalmente los elementos binarios se usan para el monitoreo de puntos de consigna de variables críticas de un proceso como: presión, temperatura, composición. (Boix O. et al, 1995, p. 11)

**Analógicos:** Proporcionan una señal de tensión eléctrica, en relación proporcional a la magnitud medida. Los rangos de información de los elementos analógicos normalmente son:  $0$  a  $10\text{ V}$ ,  $0$  a  $20\text{ mA}$ ,  $-10$  a  $10\text{ V}$  y  $4$  a  $20\text{ mA}$ , un ejemplo de sensor analógico es una termo-resistencia. (Boix O. et al, 1995, p. 11)

**Numéricos:** Proporcionan un código numérico que corresponde al valor de la medida de una magnitud, a este grupo de elementos se les suele llamar *encoders*<sup>4</sup>. (Boix O. et al, 1995, p. 11)

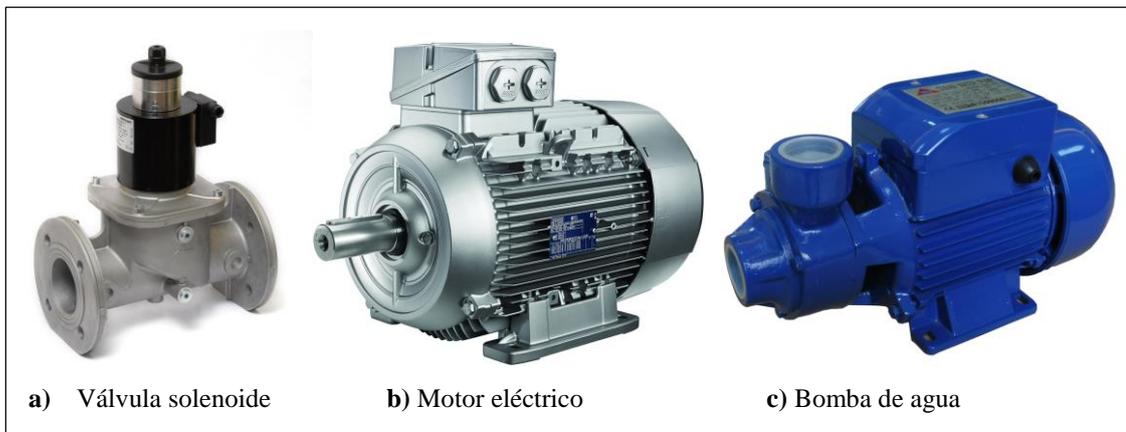
<sup>4</sup> Dispositivo, circuito, transductor, software, algoritmo o persona que convierte información desde en formato a otro.

### 1.1.2.3 Elementos de salida de información

Son dispositivos que se encargan de la comunicación con el usuario u operador, sirven para proporcionar información de forma: visual, auditiva, táctil, etc. Estos dispositivos se pueden clasificar en: binarios, si proporcionan información de estado verdadero/falso (activado/desactivado). Ejemplos de ellos son: piloto visualizador, timbres, sirenas, etc. Los elementos numéricos y alfanuméricos proporcionan información visual de números y texto. Ejemplos de ellos son: displays de segmentos, alfanuméricos o LCD<sup>5</sup>. (Boix O. et al, 1995, p. 12)

### 1.1.2.4 Preaccionadores y accionadores

Los accionadores y preaccionadores son dispositivos encargados de realizar acciones sobre el proceso o las variables manipuladas. En la mayoría de los casos los accionadores no pueden estar conectados directamente al sistema de control, por ello, requieren otros dispositivos a los que se llama preaccionadores, estos pueden ser: contactores, variadores de velocidad, válvulas de distribución, válvulas proporcionales, etc. (Boix O. et al, 1995, p. 13) Estos elementos siguen una clasificación igual a los elementos de entrada de información.



**Figura 5-1:** Ejemplos de accionadores usados en sistemas de control de procesos.  
Realizado por: PATIÑO T.; VILLACÍS M., 2015.

<sup>5</sup> Sigla del inglés: *Liquid Crystal Display* o en español: pantalla de cristal líquido.

### 1.1.3 Controlador PLC (Controlador Lógico Programable)

Los PLC's o Automatas Programables, son equipos electrónicos que buscan facilitar la programación del hardware de control. Fue concebido con la idea de permitir a áreas de la ingeniería que no son especializadas en el diseño de software para control, puedan crear sus propios programas; para luego ser cargados en el PLC. Su diseño está pensado para su uso en la industria, de ahí que se busca la mayor simplicidad y efectividad. (Parr A., 2003, p. 11)



**Figura 6-1:** Ejemplos de PLC (Automatas programables) usados a nivel industrial.  
Realizado por: PATIÑO T.; VILLACÍS M., 2015.

#### 1.1.3.1 Arquitectura de un PLC

La mayoría de los PLC tiene una arquitectura base para el hardware. Las partes que los conforman son simples pero proporcionan las herramientas necesarias para construir un sistema de control robusto. La estructura de un PLC es modular, es decir; si requiere expansión según las necesidades del sistema de control, se pueden agregar usando módulos de expansión de entradas y salidas, las mismas pueden agregar funcionalidades al sistema de control. Esto permite ampliar las capacidades de control en razón de las entradas de un controlador de diseño definido. Es una gran ventaja al compararlo con un controlado PID o un sistema de control por cableado, aunque no proporciona la adaptabilidad necesaria para poder usarse en todo tipo de sistema de control, de ahí que muchos autores sobre automatismo le den un mayor puntaje a los PLC en facilidad de uso, pero posee un puntaje ligeramente superior a los PID, por la rigidez al intentar adaptarse a distintos sistemas de control. (Boix O. et al, 1995, p. 55)

#### 1.1.3.1.1 *Hardware de un PLC*

El hardware de un PLC, la parte electrónica, está constituida de cuatro componentes básicos. La estructura varia si tiene adaptadores de tipo: Ethernet, USB, Ranuras para tarjetas SD, para dispositivos como: pantallas HMI, módulos Wifi, conexiones de red, etc. Los elementos básicos del hardware de un controlador automático programable son:

**Fuente de poder:** Esta puede estar montada dentro del dispositivo PLC o puede ser externa, dependiendo esto del diseño. Los voltajes normales para un automático programable son: 24 V, 110 V y 220 V. (Jack H., 2010, p. 24)

**Unidad central de procesamiento:** Llamado también CPU, comprende la parte electrónica que interpreta las señales de entrada, ejecuta los algoritmos programados en lenguaje Ladder o IL, siendo más usado el lenguaje Ladder por su simplicidad, y al final emite señales hacia los pre-actuadores o actuadores. (Jack H., 2010, p. 24)

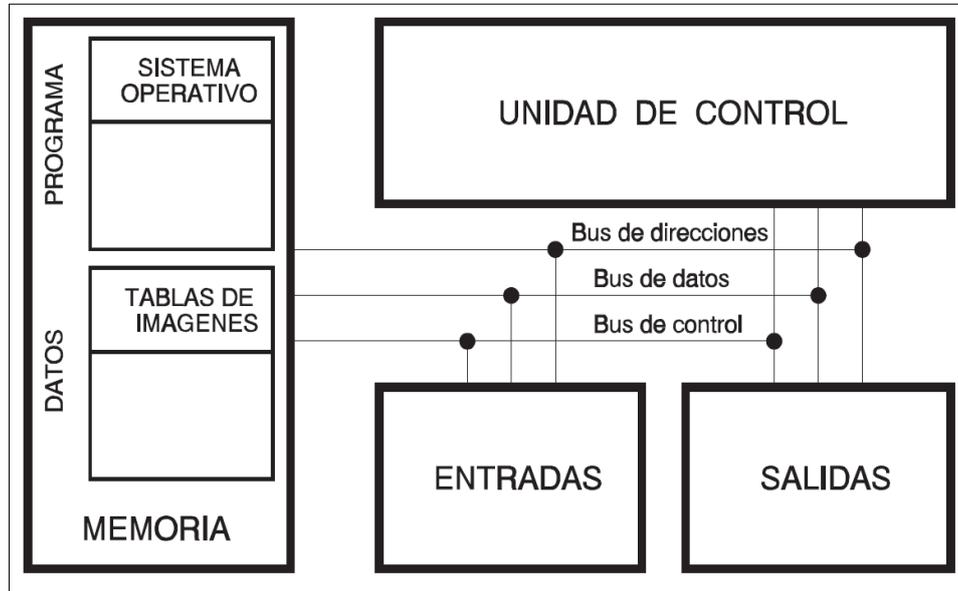
**Entradas/Salidas:** Tiene una estructura semejante a las clemas o borneras, en ellas se conecta los cables que permiten el ingreso o la salida de señales del PLC, desde y hacia el proceso controlado. Para muchos modelos de PLC existen módulos de ampliación de entradas y salidas. (Jack H., 2010, p. 25)

**Luces indicadoras:** En los modelos actuales las luces indicadores según el diseño, son remplazadas por una pantalla LCD, pero estos PLC suelen ser mucho más caros que los que carecen de la pantalla. Estas luces o pantallas permiten verificar si: el PLC está encendido, tiene los algoritmos Ladder cargados o si tiene fallos de tipo programático o de hardware. (Jack H., 2010, p. 25)

Las características de cada uno de los componentes del hardware de los PLC, dependen del fabricante y los modelos que estas producen. Es así que las principales fabricantes y comercializadoras de PLC's (Siemens y Schneider) dan características propias a sus dispositivos, arquitectura, disposición de entradas y salidas, pantalla LCD, hasta los colores. En la figura 6-1, se pueden observar 2 modelos producidos por estos fabricantes. Aun con sus diferencias usan software parecido y los mismos principios de programación, dependiendo de las prestaciones agregadas para cumplir ciertas tareas específicas.

### 1.1.3.2 Funcionamiento

En la figura 5-1, se puede observar la arquitectura de funcionamiento de un PLC, en apartados siguientes se describe cada uno de los elementos del diagrama.



**Figura 7-1:** Elementos de entradas de órdenes.

Fuente: Aragonés O., Automatismos eléctricos programables. Universitat Politècnica de Catalunya

**Memoria:** Sirve para almacenar el programa y los datos del proceso. Dependiendo del modelo o diseño, la memoria puede ser ampliada, según las necesidades de almacenamiento de información. Las memorias de un PLC están constituidas de dos sectores: la tabla de imágenes de entradas y salidas, y el resto de memoria es de uso dinámico dependiendo de los programas usados. El sector de la tabla de entradas y salidas está fijado de fábrica por tanto no es redimensionarle y se debe tomar en cuenta cuando se quiera usar un modelo de PLC en un sistema de control. Existen dos clases de memorias: las volátiles y las no volátiles. Las memorias volátiles permiten la escritura, lectura y modificación de los datos por el propio programa del PLC. Su desventaja al ser usados, es que su información se pierde al ser desconectados de su fuente de corriente eléctrica. Para contrarrestar el problema de su susceptibilidad a los cortes de flujo eléctrico, se suelen usar baterías o condensadores que almacenan carga para alimentar a la memoria. Se suelen llamar memorias RAM *Random Access Memory* (Memoria de acceso aleatorio). A diferencia de las memorias volátiles, las memorias no volátiles mantiene la información cuando no tienen alimentación de una fuente de corriente eléctrica y pueden ser leídas a voluntad; pero tienen métodos diferentes de escritura. Existen varios tipos de memorias no volátiles, a continuación se en listan algunos tipos. (Boix O. et al, 1995, p. 57)

- **ROM *Read Only Memory* (Memoria de sólo lectura):** Es una memoria que se programa en el momento de fabricación y que puede: ser leída pero no escrita ni borrada. (Boix O. et al, 1995, p. 57)
- **PROM *Programmable ROM* (ROM programable):** Es una memoria que se puede programar eléctricamente en cualquier momento pero no se puede borrar (sólo se puede programar una vez). (Boix O. et al, 1995, p. 57)
- **EPROM *Erasable PROM* (PROM borrrable):** Se puede programar eléctricamente y borrar (todo el contenido de golpe) exponiéndola a una luz UV un número muy elevado de veces. (Boix O. et al, 1995, p. 57)
- **EEPROM *Electrically Erasable PROM* (PROM borrrable eléctricamente).** Se programa y se borra (todo el contenido de una vez) eléctricamente. (Boix O. et al, 1995, p. 57)
- **EAROM *Electrically Alterable ROM* (ROM alterable eléctricamente).** Se comporta como una memoria RAM pero los datos no se pierden al cortar la alimentación. Es la única memoria no volátil en que se puede modificar una parte del contenido sin borrarla completamente. (Boix O. et al, 1995, p. 57)

**La Unidad de Control:** También llamada CPU *Central Processing Unit* (unidad central de procesamiento) es la parte de procesamiento de información del autómeta. Sus funciones son: ejecutar las instrucciones del programa, las comunicaciones con los equipos de programación y la gestión de los estados de error. Su elemento base es el microprocesador. La capacidad de cálculo y la velocidad de procesamiento dependen del número y tipo de procesadores que tenga. La mayor parte de los autómetas tienen una CPU con un solo procesador pero cada vez hay más que tienen las funciones descentralizadas entre diversos procesadores a menudo diferentes. (Boix O. et al, 1995, p. 57) La ejecución del programa sigue un ciclo llamado *scan* este consiste en:

- “Lee las entradas y guarda sus estados en la tabla de imágenes de entrada.
- Hace una ejecución del programa cogiendo los datos necesarios de la tabla de entradas, los contadores, los temporizadores, etc. y dejando lo que convenga en la tabla de salidas, contadores, etc.
- Copia la tabla de imágenes de salida sobre las salidas.
- Vuelve a empezar el ciclo leyendo las entradas.” (Boix O. et al, 1995, p. 39)

El uso de las tablas de entradas y salidas es muy importante. Si las entradas se leyeran cada vez que se necesitan y las salidas se escribieran también cada vez, resultaría que una misma entrada que se usa más de una vez dentro de un *scan* de programa tendría estados diferentes con lo que el automatismo no funciona correctamente. El programa se va repitiendo en forma cíclica ya que las

modificaciones que vayan apareciendo en las entradas tienen que ir modificando los estados de los relés internos y las salidas. (Boix O. et al, 1995, p. 40)

**Entradas y Salidas:** Las entradas y salidas son necesarias para el monitoreo y control de un proceso. Las entradas y salidas se pueden clasificar en dos tipos: lógicas y las continuas. Las entradas lógicas tienen dos estados posibles, por tanto, dos formas de señal posible: encendido y apagado. Las entradas y salidas continuas poseen un número finito de valores posibles delimitados por un rango; normalmente mucho mayores a 2 estados. Estas señales pueden tomar distintos valores dentro del rango. Para la mayoría de los casos de automatización se suele emplear, las que presentan un nivel más simple para el sistema de control, por ellos las E/S lógicas se usan en un amplio número de casos de automatización de tipo industrial. (Jack H., 2010, p. 34)

**Buces de comunicación:** Son medios físicos de comunicación entre el procesador y los demás elementos del sistema. Están formados por pistas de circuito impresas en material semiconductor flexible, que permiten diseccionar las conexiones a los elementos requeridos. Los buces pueden ser de direcciones, datos o de control. Los buces de direcciones sirven como vía por donde se envían las direcciones de los elementos con los que el procesador requiere comunicarse para pedir o enviar información. Estas direcciones son de un único receptor. Los buces de datos son bidireccionales, permiten leer y escribir datos en los otros elementos del PLC. Utiliza los buces de dirección para asignar la dirección del elemento al que quiere enviar el procesador los datos. Los buces de control, permiten realizar las operaciones que debe llevar a cabo el procesador, las más comunes son leer y escribir, datos y/o direcciones. (Jack H., 2010, p. 34)

**Sistema operativo:** El sistema operativo se encarga de ejecutar las funciones del autómata, tanto si son en tiempo real como si no. En programas sencillos se ejecutan todas las funciones dentro de un solo ciclo. En programas más complejos nos podemos encontrar que el tiempo de ejecución sea inaceptable. En estos casos a menudo se hace un fraccionamiento del programa en módulos (*subrutinas*) de manera que no todos los módulos se ejecutan en todos los ciclos. Se encuentran también casos en los que se ejecuta una parte de cada módulo en cada ciclo de programa. Este método tiene serios problemas de interpretación de programas y depuración y corrección de errores de los mismos. Algunos autómatas incorporan ya subrutinas de interrupción por tiempo que permiten ejecutar algunas partes de programa cada un cierto tiempo. (Boix O. et al, 1995, p. 39)

#### **1.1.4 Medios de control por pantalla remota**

Existen métodos para poder monitorizar y controlar procesos de manera remota, efectuando una acción mediante un dispositivo que permita mantener bajo control el proceso en una ubicación alejada del sitio donde está implementado el proceso. Los dispositivos más usados para la disposición de este tipo de control suelen ser ordenadores de escritorio o PC portátiles, aunque en la última década tras el creciente desarrollo de dispositivos portátiles como teléfonos inteligentes, tablets y otros dispositivos con tecnología de pantalla táctil, han abierto un sin número de posibilidades para el control a distancia de procesos industriales.

Existen muchos programas informáticos que prestan servicios de conexión entre un PLC y una computadora por medios inalámbricos, en el caso de este trabajo de titulación se optó por la aplicación de una conexión inalámbrica Wireless, es decir, un router permitirá conectarse a una red donde la dirección IP, es la dirección de ubicación del PLC. Esto permite conectar otros dispositivos con comunicación Ethernet y permitir la conexión inalámbrica con el PLC, sin ser necesario módulos de expansión Ethernet para el PLC.

### **1.2 Proceso de evaporación**

La evaporación, es una de las operaciones unitarias claves en la ingeniería química, se utiliza para incrementar la concentración de sólidos de soluciones líquidas; por eliminación de disolvente mediante ebullición. El objetivo de la evaporación es concentrar una solución constituida por uno o varios solutos no volátiles y un solvente volátil; eliminando por diferencia de punto de ebullición el solvente. En la mayoría de los casos, sus aplicaciones industriales consisten en la eliminación de agua de una solución acuosa. La evaporación guarda diferencia con otras operaciones, como: la destilación, porque el vapor está constituido de un único componente (*vapor de agua*) en la mayoría de los casos y de obtenerse una mezcla, el proceso no permite obtener fracciones; de la cristalización porque aunque los dos procedimientos requieren la eliminación de solvente, la evaporación no busca la formación de cristales; del secado porque el producto secado es un sólido; entre otras operaciones.

“Entre las aplicaciones de la evaporación están; la concentración de soluciones acuosas de sal, azúcar, hidróxido de sodio, glicerina, leche y jugo de naranja. Los sistemas de evaporadores industriales normalmente constan de: un intercambiador de calor para aportar calor sensible y latente de evaporación al alimento líquido. Para lograr esto se utiliza generalmente: vapor de agua, un separador en el que el vapor se separa de la fase líquida concentrada, un condensador para condensar el vapor producido y una bomba de vacío. En las plantas de proceso existen muchos

tipos de evaporadores, cuya clasificación generalmente se basa en el diseño de su intercambiador de calor” (Christie, 1999, p. 548)

### **1.2.1 Métodos de operación de evaporadores**

“En cualquier operación de evaporación, el costo más importante del proceso es el vapor de agua consumido. Por lo tanto los métodos que tiendan a reducir este consumo (*o de economía*) son muy atractivos. Cuando se utiliza un solo evaporador, el vapor procedente del líquido en ebullición se condensa y se desecha. Este método recibe el nombre de evaporación de simple efecto. De otra forma; si el calor suministrado en el primer efecto se utiliza para vaporizar al solvente; este vapor, a su vez, se utiliza como medio de calentamiento del siguiente efecto y así sucesivamente, hasta que el vapor generado en el último efecto se envía al condensador, este método de operación de evaporadores en serie es el llamado evaporación de múltiple efecto.” (McCabe W. et al., 2007, p. 482)

El funcionamiento de los evaporadores en disposición de múltiple efecto se puede describir de la siguiente manera: en el primer evaporador (*primer efecto*), se produce el calentamiento y se evapora el solvente del líquido alimentado; siendo, la presión en el evaporador igual o mayor a la atmosférica. El vapor del solvente extraído de la alimentación del primer efecto (si este es vapor de agua) es utilizado en el segundo efecto para calentarlo, dependiendo del diseño del sistema de evaporadores, el vapor de solvente del primer efecto es mezclado con vapor proveniente de sistema de distribución de la planta, a las mismas condiciones para mantener la eficiencia térmica del proceso. (Foust A. et al., 2008) Para los demás efectos el proceso es similar con la diferencia de que la caída de presión va aumentando a medida que haya más efectos en el circuito de evaporadores; por lo tanto, la presión llega a niveles de vacío. Para mantener la eficiencia térmica y facilitar la disposición de los evaporadores es una práctica común diseñar y fabricar los evaporadores con las mismas dimensiones; para homogeneizar la superficie de intercambio de calor en cada efecto. Dadas las características del proceso de evaporación, esta es una de las operaciones que requiere una mayor cantidad de energía. Es por ello que a comparación de la evaporación de simple efecto, la disposición en múltiple efecto es la más utilizada en las industrias químicas por la recirculación del evaporado como flujo de calentamiento.

### **1.2.2 Evaporadores de simple efecto**

Como los evaporadores prácticamente son intercambiadores de calor, con la única diferencia de que en ellos existe un cambio de fase (*liquido-vapor*). Existen una gran variedad de modelos de evaporadores, pero a la mayoría de ellos se los puede agrupar en cuatro tipos o diseños. Estos diseños son: evaporadores tubulares de flujo ascendente, evaporadores tubulares de flujo

descendente, evaporadores de material agitado y los evaporadores de método de intercambio variado. El evaporador de serpentín horizontal que es sujeto de estudio de este trabajo pertenece a los evaporadores de método de intercambio variado, es un evaporador no muy utilizado en la industria a gran escala principalmente la industria de lácteos, porque su capacidad de homogeneizar la distribución del calor es muy baja y suele generar problemas de daño en el producto por las diferencias pronunciadas de calor entre distintos puntos del material a calentarse.

### 1.2.3 Diseño de evaporadores de simple efecto

#### 1.2.3.1 Materia prima

Para poder obtener los parámetros operativos, en relación a la masa, es necesario realizar el balance de materia. En el caso de nuestro trabajo, en el que planteamos realizar cálculos para dos productos, que son: dulce de leche y mermelada. Obtuvimos los rangos de composición y algunas propiedades de la materia prima y productos; de la normativa alimentaria del país. Las normas consultadas son: INEN NTE 0009 2008: Leche cruda. Requisitos, INEN NTE 0010 2012: Leche pasteurizada. Requisitos, NTE INEN 0419 1988: Conservas vegetales. Mermelada de frutas. Requisitos y NTE INEN 0700 2011: Manjar o dulce de leche. Requisitos. Como nuestro objetivo, no es formular una receta para un producto específico, sino más bien, dar al evaporador la capacidad de ajustarse para obtener productos que estén dentro de un rango especificado por las normativas. Realizamos cálculos con composiciones supuestas o teóricas para la leche y el zumo de fruta. (INEN, 1996)

**Tabla 1-1:** Composición de productos lácteos extraídas de las normas técnicas del INEN.

REQUISITOS	UNIDAD	ENTERA		SEMI DESCREMADA		DESCREMADA		CRUDA		DULCE DE LECHE	
Densidad Relativa a 15 C a 20 C	-	1,029	1,033	1,030	1,033	1,031	1,036	1,029	1,033	-	-
	-	1,025	1,032	1,029	1,032	1,03	1,035	1,028	1,032	-	-
Contenido de grasa	%mm	3	-	> 1,0	< 3,0	-	< 1,0	3	-	-	-
Sólidos totales	%mm	11,3	-	8,8	-	8,3	-	11,2	-	25,5	-
Sólidos no grasos	%mm	8,3	-	8,2	-	8,2	-	8,2	-	-	-
Cenizas	%mm	0,65	0,8	0,7	0,8	0,7	0,8	0,65	-	-	-
Proteínas	%mm	2,9	-	2,9	-	2,9	-	2,9	-	-	-
Azúcares Totales	%mm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

**Fuente:** Instituto Ecuatoriano de Normalización. Normas Técnicas.  
**Realizado por:** PATIÑO T.; VILLACÍS M., 2015.

En la tabla 1-1 se extrajeron algunos rangos de propiedades y composición de las normas INEN descritas. En esta tabla solo se toman en cuenta los valores que influyen en los métodos de correlación de propiedades de alimentos mostradas en la sección de cálculos. Estos rangos permiten crear valores teóricos para la composición de muestras de leche, basados en composiciones en bibliografía. (Baudi S., 2006, p. 605) Los mismos que se usaran para aproximar el comportamiento del proceso de evaporación. Se tomó la decisión de emplear este método teórico por la cantidad de muestras de leche a las que se requería aplicar las pruebas de composición química, el costo excesivo que implicaría, y principalmente el objetivo de este trabajo no es determinar las características idóneas de la materia prima, para obtener ciertas características del producto, sino ajustar el proceso de evaporación a distintas condiciones, entre ellas las características de la materia prima.

### **1.3 Diseño y dimensionamiento del sistema de control**

#### ***1.3.1 Parámetros operativos del evaporador con serpentín***

##### *1.3.1.1 Cálculo del volumen máximo operativo para alimentación*

###### *1.3.1.1.1 Volumen total del cilindro*

El volumen es la cantidad de espacio tridimensional que ocupa un cuerpo. Para cuerpos huecos es el espacio vacío entre sus paredes.

$$V_c = \frac{\pi \phi_c h_c}{4} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

$V_c$ : Volumen del total del cilindro [ $m^3$ ]

$\phi_c$ : Diámetro del cilindro del evaporador [ $m$ ]

$h_c$ : Altura hábil del cilindro [ $m$ ]

Esta ecuación calcula el volumen máximo que puede ser ocupado por la materia o solución a ser concentrado por el evaporador. Esta ecuación se aplica para el cálculo del volumen de objetos derivados de formas circulares, al usar el diámetro como variable de referencia.

### 1.3.1.1.2 Volumen del serpentín

El volumen de un conducto corresponde al producto de la longitud por la sección transversal en función del diámetro interno o externo del tubo.

$$L_{Hserp} = 2\pi n \sqrt{\frac{\phi_{hserp}^2}{4} + h_{vserp}^2} \quad \text{Ec. 2}$$

$$A_{serp} = \frac{\pi \phi_{tserp}^2}{4} \quad \text{Ec. 3}$$

$$V_{serp} = A_{serp} L_{Hserp} \quad \text{Ec. 4}$$

Donde:

- $L_{Hserp}$ : Longitud de hélice del serpentín [m]
- $A_{serp}$ : Área de sección transversal del tubo de serpentín [m<sup>2</sup>]
- $V_{serp}$ : Volumen ocupado por el serpentín [m]
- $n$ : Numero de vueltas de la hélice [NA]
- $\phi_{hserp}$ : Diámetro de hélice de serpentín [m]
- $h_{vserp}$ : Separación de paso de la hélice [m]
- $\phi_{tserp}$ : Diámetro externo del tubo del serpentín [m]

Esta ecuación calcula el volumen ocupado por el serpentín, esto permite ajustar de mejor manera el volumen que se puede cargar al cilindro del evaporador.

### 1.3.1.1.3 Altura de fluido perdida por el serpentín

Es la distancia de carga de fluido que se pierde por el volumen ocupado por el cuerpo del serpentín. Esta longitud es la relación entre el volumen referente al diámetro externo del serpentín y la sección transversal del cilindro del evaporador.

$$h_{pserp} = \frac{4 V_{serp}}{\pi \phi_c^2} \quad \text{Ec. 5}$$

Donde:

- $h_{pserp}$ : Altura de fluido perdida por el serpentín [m]
- $V_{serp}$ : Volumen ocupado por el serpentín [m]
- $\phi_c$ : Diámetro del cilindro del evaporador [m]

Esta ecuación retorna el valor de altura de fluido alimentado perdida por el volumen ocupado por el serpentín dentro del cilantro del evaporador.

#### 1.3.1.1.4 *Altura de fluido perdida por factor de seguridad*

Corresponde a la longitud representada como altura del cilindro, que se pierde por el factor de seguridad.

$$h_{fseg} = f_{seg} h_c \quad \text{Ec. 6}$$

Donde:

$h_{fseg}$ : Altura de fluido perdida por factor de seguridad [m]

$f_{seg}$ : Factor de seguridad [NA]

$h_c$ : Altura hábil del cilindro [m]

Esta ecuación nos permite determinar la altura que se toma como margen de seguridad para evitar el derrame de materia prima.

#### 1.3.1.1.5 *Altura de fluido operativa del evaporador*

Es la altura de columna de fluido máxima que se le puede alimentar al evaporador, y se representa como la diferencia de la altura hábil del cilindro menos la altura perdida por el serpentín y el factor de seguridad.

$$h_{op} = h_c - (h_{pserp} + h_{fseg}) \quad \text{Ec. 7}$$

Donde:

$h_{op}$ : Altura de fluido operativa del evaporador [m]

$h_c$ : Altura hábil del cilindro [m]

$h_{pserp}$ : Altura de fluido perdida por el serpentín [m]

$h_{fseg}$ : Altura de fluido perdida por factor de seguridad [m]

Esta ecuación permite determinar la altura máxima de fluido que se puede cargar con materia prima al cilindro. Esta longitud se usara como máximo permisible para otros cálculos.

### 1.3.1.1.6 Volumen máximo operativo del cilindro (marmita)

El volumen máximo operativo corresponde al espacio calculado en función de la altura operativa y la sección transversal interna del cilindro del evaporador.

$$V_{op} = \frac{\pi \phi_c^2 h_{op}}{4} \quad \text{Ec. 8}$$

Donde:

$V_{op}$ : Volumen máximo operativo del evaporador [ $m^3$ ]

$\phi_c$ : Diámetro del cilindro del evaporador [ $m$ ]

$h_{op}$ : Altura de fluido operativa del evaporador [ $m$ ]

Esta ecuación se usa para determinar cuanta materia prima se puede cargar al cilindro, evitando derrames.

### 1.3.1.2 Dimensionamiento de válvulas de control

#### 1.3.1.2.1 Válvula de control de flujo de agua

El coeficiente de caudal de válvulas para flujo de líquidos, corresponde a la cantidad de líquido que pasa a través de la válvula en función de la caída de presión entre la entrada y salida:

$$F = C_v \sqrt{\frac{\Delta P_v}{\gamma}} = C_v \sqrt{\frac{P_2 - P_1}{\gamma}} \quad \text{Ec. 9}$$

$F$ : Caudal del líquido en [ $gal/min$ ]

$\Delta P_v$ : Pérdida de carga en la válvula en [ $psig$ ]

$P_1$ : Presión aguas arriba [ $psia$ ]

$P_2$ : Presión aguas abajo [ $psia$ ]

$\gamma$ : Densidad relativa del líquido respecto del agua a 60 °F

$C_v$ : Coeficiente de caudal de la válvula [ $gpm/psi$ ]

Esta ecuación se aplica para el dimensionamiento de válvulas de control para líquidos. En nuestro trabajo permite la selección bajo catálogo el modelo de válvula de control que se puede usar en la instalación del sistema de control.

### 1.3.1.2.2 Válvula de control de entrada de vapor

El coeficiente de caudal de vapor representa la cantidad másica de vapor que atraviesa la válvula en relación a la caída de presión entre la salida y entrada. Para vapor sobrecalentado se utiliza una correlación con corrección sobre el sobrecalentamiento.

Vapor de agua:

$$F = \frac{2,1 C_v}{1 + 0,0007 T_{hs}} \sqrt{\Delta P_v (P_2 + P_1)} \quad \text{Ec. 10}$$

Gases:

$$F = 1360 C_v \sqrt{\frac{\Delta P_v (P_1 + P_2)}{G T_1}} \quad \text{Ec. 11}$$

Donde:

$F$ : Caudal. Para *vapor* en [lb/h] y para *gases* en [ft<sup>3</sup>/seg] estándar [60 °F y 14.7 psia]

$\Delta P_v$ : Pérdida de carga en la válvula en [psig]

$P_1$ : Presión aguas arriba [psia]

$P_2$ : Presión aguas abajo [psia]

$\gamma$ : Densidad relativa del líquido respecto del agua a 60 °F

$T_{hs}$ : Recalentamiento del vapor respecto de las condiciones de saturación [°F]. Vale cero para vapor saturado.

$G$ : Densidad relativa del gas respecto al aire a [60 °F y 14.7 psia]

$T_1$ : Temperatura del gas a la entrada de la válvula [°F]

$C_v$ : Coeficiente de caudal de la válvula [gpm/psi]

En el caso del evaporador se usará una sola válvula de control de vapor, esta estará ubicada en la entrada de vapor y por las dimensiones del conducto de entrada del evaporador, tendrá un diámetro de media pulgada. Para poder escoger una válvula a partir del catálogo de un fabricante es necesario determinar el coeficiente de flujo ( $K_v$ ).

### 1.3.1.2.3 Conversión de $C_v$ a $K_v$

$K_v$  Es el coeficiente de caudal para dimensionamiento de válvulas en unidades del Sistema Internacional.

$$K_v = 0,86488 C_v$$

Ec. 12

Donde:

$C_v$ : Coeficiente de caudal de válvula [ $gpm/psi$ ]

$K_v$ : Coeficiente de caudal de válvula [ $m^3/h bar$ ]

Esta ecuación se usa para convertir  $C_v$  (Sistema Inglés) a  $K_v$  (Sistema Internacional), que es el sistema de unidades usado para realizar cálculos en este trabajo.

### 1.3.2 Simulación de proceso de evaporación

#### 1.3.2.1 Correlación de propiedades de alimentos

##### 1.3.2.1.1 Correlación de capacidad calorífica de un alimento ( $C_p$ alimentos)

La capacidad calorífica es la cantidad de calor necesario para elevar en un grado de temperatura cierta cantidad de masa. En el caso de alimentos se pueden aplicar métodos para aproximar el  $C_p$ , en relación a la composición y temperatura.

$$C_p \text{ alimentos} \begin{cases} C_p \text{ prote} & = 2,0080 + 1,2089 \times 10^{-3} T - 1,3129 \times 10^{-6} T^2 \\ C_p \text{ lípidos} & = 1,9842 + 1,4733 \times 10^{-3} T - 4,8008 \times 10^{-6} T^2 \\ C_p \text{ carboh} & = 1,5488 + 1,9625 \times 10^{-3} T - 5,9399 \times 10^{-6} T^2 \\ C_p \text{ fibra} & = 1,8459 + 1,9306 \times 10^{-3} T - 4,6509 \times 10^{-6} T^2 \\ C_p \text{ cenizas} & = 1,0926 + 1,8896 \times 10^{-3} T - 3,6817 \times 10^{-6} T^2 \\ C_p \text{ agua} & = 4,1762 + 9,0862 \times 10^{-3} T - 5,4731 \times 10^{-6} T^2 \end{cases} \quad \text{Ec. 13}$$

$$C_p \text{ alimento} = \sum_{i=1}^n C_{pi} x_i \quad \text{Ec. 14}$$

Donde:

$C_{pi}$ : Capacidad Calorífica aportada por el componente i [ $kJ/kgK$ ]

$x_i$ : Fracción en peso del componente i [ $NA$ ]

$T$ : Temperatura a la que se evalúa  $C_p$  [ $^{\circ}C$ ]

Estas ecuaciones sirven para aproximar la capacidad calorífica de un alimento, empleando su composición en fracción de peso y la temperatura. Se emplean como medio para aproximar el  $C_p$  en cálculos de diseño de equipos de procesamiento de alimentos. En este caso se necesita

aproximar el  $C_p$  de lotes de leche o zumo de fruta con una composición dada, a distintos rangos de temperatura.

### 1.3.2.1.2 Correlación de conductividad térmica de un alimento ( $k_{alimentos}$ )

La conductividad térmica representa la cantidad de energía o calor que pasa a través de una longitud o espesor de material por cada grado de temperatura que cae entra las superficies: interior y exterior.

$$k_{alimentos} \begin{cases} k_{prote} & = & 0,1790 + 1,2000 \times 10^{-3} T - 2,7200 \times 10^{-6} T^2 \\ k_{lipidos} & = & 0,1810 - 2,7600 \times 10^{-3} T - 1,7700 \times 10^{-6} T^2 \\ k_{carboh} & = & 0,2010 + 1,3900 \times 10^{-3} T - 4,3300 \times 10^{-6} T^2 \\ k_{fibra} & = & 0,1830 + 1,2500 \times 10^{-3} T - 3,1700 \times 10^{-6} T^2 \\ k_{cenizas} & = & 0,3300 + 1,4000 \times 10^{-3} T - 2,9100 \times 10^{-6} T^2 \\ k_{agua} & = & 0,5710 + 1,7600 \times 10^{-3} T - 6,7000 \times 10^{-6} T^2 \end{cases} \quad \text{Ec. 15}$$

$$k_{alimento} = \sum_{i=1}^n k_i x_i \quad \text{Ec. 16}$$

Donde:

$k_i$ : Conductividad térmica del componente i [ $W/m K$ ]

$x_i$ : Fracción en peso del componente i [ $NA$ ]

$T$ : Temperatura a la que se evalúa  $k$  [ $^{\circ}C$ ]

Este sistema de ecuaciones se usa como aproximación válida para diseño de equipos de procesamiento de alimentos.

### 1.3.2.1.3 Correlación de densidad de un alimento ( $\rho_{alimentos}$ )

La densidad es la relación entre la masa y el volumen que ocupa un cuerpo. En alimentos, esta se puede aproximar en relación a la composición y la temperatura.

$$\rho_{alimentos} \begin{cases} \rho_{prote} & = & 1330 - 0,51840 T \\ \rho_{lipidos} & = & 0,1810 - 0,41757 T \\ \rho_{carboh} & = & 1559,1 - 0,31046 T \\ \rho_{fibra} & = & 1311,5 - 0,36589 T \\ \rho_{cenizas} & = & 0,3300 - 0,28063 T \\ \rho_{agua} & = & 997,18 + 3,1439 \times 10^{-3} T - 3,7574 \times 10^{-3} T^2 \end{cases} \quad \text{Ec. 17}$$

$$\rho_{alimento} = \sum_{i=1}^n \rho_i x_i \quad \text{Ec. 18}$$

Donde:

$\rho_i$ : Densidad del componente i [ $kg/m^3$ ]

$x_i$ : Fracción en peso del componente i [NA]

$T$ : Temperatura a la que se evalúa  $\rho$  [ $^{\circ}C$ ]

Este sistema de ecuaciones se toma como válida para el diseño de equipos de procesamiento de alimentos. Nos permite determinar en la simulación como cambia aproximadamente la densidad en relación a la cantidad de masa de agua evaporada del concentrado.

#### 1.3.2.1.4 Correlación de viscosidad de un alimento ( $\mu$ )

La viscosidad representa la resistencia al movimiento de un fluido. Para alimentos se puede aproximar con varios métodos de correlación que usan la composición y la temperatura.

$$\mu_{alimento} = 2,553 \exp\left(-\frac{T}{60,68}\right) + 1,041 \exp\left(-\frac{T}{153,7}\right) \quad \text{Ec. 19}$$

La ecuación 19 permite aproximar la viscosidad de alimentos muy diluidos, por lo cual su viscosidad tiende a la viscosidad del agua.

$$\log \mu_{leche} = 0,244 - 1,5 \times 10^{-2} T + 5,2 \times 10^{-5} T^2 + \begin{cases} 8 < s_T < 30\% \\ 0,07 < F_g < 7,4\% \\ 0,01 < s_{ng} < 0,04\% \\ 0 < T < 80^{\circ}C \end{cases} \quad \text{Ec. 20}$$

$$(2,549 \times 10^{-2} - 9,8 \times 10^{-5} T + 4,0 \times 10^{-7} T^3) s_T +$$

$$(5,43 \times 10^{-4} - 1,39 \times 10^{-5} T + 1,117 \times 10^{-7} T^2) s_T^2$$

La ecuación 20 permite aproximar la viscosidad de la leche, usando la concentración de sólidos totales y la temperatura.

$$\ln \mu = 3,92 \times 10^{-5} T^2 - 1,951 \times 10^{-2} T + 0,666 + (-9,53 \times 10^{-6} T^2 + 1,674 \times 10^{-3} T - 4,37 \times 10^{-2}) F_g + (9,75 \times 10^{-7} T^2 - 1,739 \times 10^{-4} T + 9,83 \times 10^{-3}) F_g^2 \quad \begin{cases} 0,03 < F_g < 15\% \\ 70 < T < 135\% \end{cases} \quad \text{Ec. 21}$$

La ecuación 21 permite aproximar la viscosidad de la leche, usando la concentración de grasa y la temperatura.

$$\ln \mu = \left( \frac{2731,5}{273,15 + T} \right) + 0,1 F_g - 8,9 \quad \begin{cases} 0,1 < F_g < 30\% \\ 0 < T < 30^\circ\text{C} \end{cases} \quad \text{Ec. 22}$$

La ecuación 22 permite aproximar la viscosidad de la leche, es un método especial empleando la concentración de grasa y la temperatura. Tiene un mayor error de aproximación comparado con la ecuación 21.

$$\begin{aligned} \log \mu &= A_d \left( F_g + F_g^{\frac{5}{3}} \right) + \log \mu_0 \\ A_d &= 1,2876 + 11,07 \times 10^{-4} T \\ \mu_0 &= 0,7687 \left( \frac{1000}{276,15 + T} \right) - 2,437 \end{aligned} \quad \begin{cases} 0 < F_g < 40\% \\ 40 < T < 80^\circ\text{C} \end{cases} \quad \text{Ec. 23}$$

La ecuación 23 permite aproximar la viscosidad de la leche, es un método especial empleando la concentración de grasa y la temperatura.

Donde:

- $T$ : Temperatura a la que se evalúa  $\mu$  [ $^\circ\text{C}$ ]
- $S_T$ : Porcentaje de solidos totales en el alimento [%]
- $F_g$ : Porcentaje en peso de grasa en el alimento [%]
- $\mu$ : Viscosidad del alimento [ $kg/m s$ ]

Todas estas ecuaciones son aplicables como métodos válidos para el diseño de equipos para procesamiento de alimentos. Permiten determinar el cambio de la viscosidad del alimento en función del cambio de composición del concentrado que ocurre por la evaporación de parte de su contenido de agua.

### 1.3.2.2 Cálculos de transferencia de calor

#### 1.3.2.2.1 Correlación de Colebrook para factor de fricción de Darcy

El factor de fricción representa la cantidad de energía perdida por rozamiento del fluido con las imperfecciones propias del material con el que se constituye un conducto.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2,0 \log \left[ \frac{\varepsilon}{3,7 \phi} + \frac{2,51}{N_{Re} \sqrt{f}} \right] \quad \text{Ec. 24}$$

Donde:

- $f$ : Factor de fricción de Darcy [NA]
- $\phi$ : Diámetro de conducto [m]
- $N_{Re}$ : Numero de Reynolds de flujo [NA]
- $\varepsilon$ : Rugosidad relativa de los conductos

Esta ecuación se usa para calcula en función del régimen de flujo y la rugosidad absoluta, un factor que permite calcular las pérdidas de carga por imperfecciones en la superficie interna de conductos.

#### 1.3.2.2.2 Correlación de número de Nusselt para flujo dentro de conductos

El número de Nusselt es un número adimensional que mide el aumento de la transmisión de calor desde una superficie en contacto con un flujo (*Convección*) comparada con la transferencia de calor, si ésta fura únicamente un proceso por conducción.

Flujo laminar  $N_{Re} < 2100$ :

$$Nu = 3.66 \quad \text{Ec. 25}$$

Flujo transitorio  $2100 < N_{Re} < 10^5$ ,  $0.6 < N_{Pr} < 50$ :

- Correlación de *Gnielinski*:

$$Nu = \frac{\left(\frac{f}{8}\right) (N_{Re} - 1000) N_{Pr}}{1 + 12.7 \left(\frac{f}{8}\right)^{0.5} (N_{Pr}^{2/3} - 1)} \quad \text{Ec. 26}$$

- Correlación de factor de fricción de *Darcy* de *Pethukov*:

$$f = (0.79 \ln(N_{Re}) - 1.64)^{-2} \quad \text{Ec. 27}$$

Flujo turbulento  $10^5 < N_{Re} < 10^7$ ,  $N_{Pr} < 500$ :

$$Nu = 0.12 (N_{Re}^{0.87} - 280) N_{Pr}^{0.4} \quad \text{Ec. 28}$$

Donde:

$N_{Re}$ : Numero de Reynolds de flujo [NA]

$N_{Pr}$ : Numero de Prandtl del fluido [NA]

$Nu$ : Número de Nusselt de transferencia de calor [NA]

Se aplica como métodos válidos para el diseño de equipos y procesos de elaboración de alimentos. Estas ecuaciones se usan como base para programar una función en MATLAB, que permite realizar análisis de sensibilidad sobre el proceso de intercambio de calor en el evaporador con serpentín.

#### 1.3.2.2.3 Cálculo del coeficiente de convección para flujo interno en cilindros.

El coeficiente de convección es una correlación simplificada entre el estado del fluido y las condiciones de flujo, por lo cual generalmente se la conoce como una propiedad de flujo. (Help.solidworks.com, 2015)

$$h = \frac{Nu k}{\phi_h} \quad \text{Ec. 29}$$

Donde:

$\phi_h$ : Diámetro hidráulico del conducto [m]

$k$ : Conductividad térmica del material del conducto [W/m C]

$Nu$ : Numero de Nusselt de transferencia de calor [NA]

$h$ : Coeficiente de convección del flujo [W/ m<sup>2</sup> °C]

Esta ecuación determina el coeficiente de convección para procesos de intercambio de calor dentro de conductos cilíndricos o conductos con otra forma geométrica. El coeficiente de convección se usa para determinar las características de intercambio entre el vapor y la superficie interna del serpentín.

#### 1.3.2.2.4 Cálculo de la resistencia a la transferencia de calor en paredes de un cilindro.

La resistencia térmica representa la capacidad de un material a no permitir el flujo de calor, esta depende de la homogeneidad del material, el espesor y la conductividad térmica.

$$R = \frac{\ln\left(\frac{\phi_e}{\phi_i}\right)}{2\pi Lk}$$
Ec. 30

Donde:

- $\phi_e, \phi_i$ : Diámetro externo e interno del conducto [m]
- $k$ : Conductividad térmica del material del conducto [ $W/m\ ^\circ C$ ]
- $L$ : Longitud del conducto [m]
- $R$ : Resistencia a la transferencia de calor de la pared del conducto [ $m\ ^\circ C/W$ ]

Esta ecuación permite calcular la resistencia térmica de la pared del conducto del serpentín que está constituida de acero inoxidable ASTM 304.

#### 1.3.2.2.5 Cálculo de la temperatura de superficie externa en transferencia de calor por conducción.

La temperatura es la medida de la cantidad de energía que tiene un sistema expresada como: energía interna, cinética y potencial. La temperaturas en un proceso de intercambio de calor determinan la capacidad de flujo de calor se transfiere en un proceso.

$$T_e = T_i - qR$$
Ec. 31

Donde:

- $T_e, T_i$ : Temperatura de superficie externa e interna del conducto [ $^\circ C$ ]
- $q$ : Flujo de calor entrante a la pared del conducto [ $kJ/s$ ]
- $R$ : Resistencia a la transferencia de calor de la pared del conducto [ $m^2\ ^\circ C/W$ ]

Esta ecuación permite calcular la temperatura de la superficie externa del serpentín, en función de la conductividad térmica del material que está compuesto el conducto.

#### 1.3.2.2.6 Cálculo de velocidad máxima de flujo entre los conductos de una batería de tubos.

La velocidad es la tasa de cambio de posición de un objeto o cuerpo, en fluido es la tasa de cambio de posición dentro de un conducto. Para sistemas de conductos por los cambio en las distancia entre los tubos se puede observar una proporcionalidad inversa entre la separación de los tubos y la velocidad del fluido. Esta velocidad determina el régimen de flujo que influye en el coeficiente de transferencia de calor por convección.

$$v_{max} = \frac{s_V}{s_V - \phi_e} v_m \quad \text{Ec. 32}$$

Donde:

- $s_V$ : Separación entre los tubos de la batería de tubos [m]
- $\phi_e$ : Diámetro externo de conductos [m]
- $v_m$ : Velocidad media de entrada del fluido a la batería de tubos [m/s]

Esta ecuación permite calcular la velocidad máxima de flujo del concentrado entre los tubos del serpentín, en función de la velocidad de entrada a la batería de conductos.

#### 1.3.2.2.7 Cálculo del número de Reynolds para flujo en batería de tubos.

El número de Reynolds es un número adimensional utilizado en mecánica de fluidos, diseño de reactores y fenómenos de transporte para caracterizar el movimiento de un fluido. (MOTT R., 1996, p. 219)

$$N_{Re} = \frac{\rho v_{max} \phi_e}{\mu} \quad \text{Ec. 33}$$

Donde:

- $N_{Re}$ : Numero de Reynolds de flujo [NA]
- $\rho$ : Densidad del fluido a la entrada de la batería de conductos [ $kg/m^3$ ]
- $\phi_e$ : Diámetro externo de conductos [m]
- $v_{max}$ : Velocidad máxima del fluido [m/s]
- $\mu$ : Viscosidad dinámica del fluido a la entrada de la batería de tubos [ $kg/m s$ ]

Esta ecuación permite determinar el régimen de flujo del concentrado al entrar en la batería de conductos que representa al serpentín.

#### 1.3.2.2.8 Cálculo del número de Nusselt para sistema de tubos alineados

Para sistemas de conductos el número de Nusselt depende del régimen de flujo del fluido que pasa entre las separaciones de los tubos. Existen muchos métodos de correlación que se puede aplicar pero de entre todos ellos, se seleccionó el siguiente conjunto de ecuaciones con su respectivo

factores de corrección, que depende del número de hileras de conductos y de la alineación. (CENGEL Y., 2004, p. 441)

Alineados	$N_{Re}$	Correlación	
	0 – 100	$Nu_D = 0,9 N_{Re}^{0,4} N_{Pr}^{0,36} (N_{Pr}/N_{Prs})^{0,25}$	Ec. 34-a
	100 – $10^3$	$Nu_D = 0,52 N_{Re}^{0,5} N_{Pr}^{0,36} (N_{Pr}/N_{Prs})^{0,25}$	Ec. 34-b
	$10^3 – 2 \times 10^5$	$Nu_D = 0,27 N_{Re}^{0,63} N_{Pr}^{0,36} (N_{Pr}/N_{Prs})^{0,25}$	Ec. 34-c
	$2 \times 10^5 – 2 \times 10^6$	$Nu_D = 0,033 N_{Re}^{0,8} N_{Pr}^{0,4} (N_{Pr}/N_{Prs})^{0,25}$	Ec. 34-d

Factor de corrección F que debe usarse en  $Nu_D = F Nu$ ,  $N_L < 16$  y  $N_{Re} > 1000$ .

**Tabla 2-1:** Factores de corrección de correlación de número de Nusselt para sistemas de conductos.

$N_L$	1	2	3	4	5	7	10	13
<b>Alineados</b>	0,70	0,80	0,86	0,90	0,93	0,96	0,98	0,99

Fuente: CENGEL Y., Transferencia de calor. 2004  
Realizado por: PATIÑO T.; VILLACÍS M., 2015.

Donde:

$N_{Re}$ : Numero de Reynolds de flujo [NA]

$N_{Pr}$ : Numero de Prandlt de flujo [NA]

$N_{Prs}$ : Numero de Prandlt de flujo a la temperatura de superficie [NA]

$Nu_D$ : Numero de Nusselt para transferencia de calor [NA]

Este sistema de ecuaciones permite determinar el número de Nusselt, para el intercambio de calor entre el sistema de conductos y el flujo de concentrados entre ellos. Para poder utilizarlas en MATLAB, se programara una función que en función del número de Reynolds y Prandlt.

#### 1.3.2.2.9 Cálculo de la temperatura del fluido en flujo de calor por convección en placa plana

La temperatura de fluido en procesos de intercambio de calor por convección está en función de la temperatura de la superficie que intercambia calor y las condiciones de intercambio. Se usa las propiedades del fluido a la temperatura de la superficie del sistema de conductos.

$$T_{\infty} = T_2 - (T_2 - T_i) \exp\left(-\frac{h s_e}{\dot{m} C_p}\right) \quad \text{Ec. 35}$$

Donde:

$T_{\infty}$ : Temperatura del fluido [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$T_2$ : Temperatura de superficie de convección [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$T_i$ : Temperatura de entrada en contacto con superficie de intercambio [NA]

$h$ : Coeficiente de convección [ $\text{W}/\text{m}^2 \text{C}$ ]

$s_e$ : Superficie de intercambio de calor [ $\text{m}^2$ ]

$\dot{m}$ : Flujo de masa en contacto con la superficie de intercambio [ $\text{kg}/\text{s}$ ]

$C_p$ : Capacidad calorífica del fluido [ $\text{kJ}/\text{kg C}$ ]

Esta ecuación permite calcular la temperatura que tendría el concentrado tras cruzar el sistema de conductos.

#### 1.3.2.2.10 Cálculo del número de Reynolds para placa plana

El número de Reynolds determina el carácter de flujo, dependiendo de la geometría de la superficie sobre la que se desplaza el fluido. Cuando se habla de placa plana se determina la geometría de la superficie como plana y lisa, sin pérdidas por rugosidad.

$$N_{Re} = \frac{\rho v_m L}{\mu} \quad \text{Ec. 36}$$

Donde:

$N_{Re}$ : Numero de Reynolds para flujo [NA]

$\rho$ : Densidad del fluido [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$v_m$ : Velocidad media de flujo sobre capa plana [ $\text{m}/\text{s}$ ]

$L$ : Longitud de capa plana [ $\text{m}$ ]

$\mu$ : Viscosidad dinámica de fluido [ $\text{kg}/\text{m s}$ ]

Esta ecuación se usa para determinar el régimen de flujo sobre la pared del serpentín, que fue simplificada a una pared plana.

#### 1.3.2.2.11 Cálculo del número de Nusselt para placa o pared plana

El número de Nusselt promedio para el caso de capa plana se necesita conocer el número de Reynolds y Prandtl, que caracterizan el flujo de concentrado y las condiciones de transferencia de calor.

$$Nu_m = 0.664 N_{Re}^{0.5} N_{Pr}^{0.333} \begin{cases} \text{Flujo laminar} \\ 0.6 \leq N_{Pr} \leq 50 \\ N_{Re} < 2100 \end{cases} \quad \text{Ec. 37-a}$$

$$Nu_m = 0.037 N_{Re}^{0.8} N_{Pr}^{0.333} \begin{cases} \text{Fujo Turbulento} \\ 0.6 \leq N_{Pr} \leq 50 \\ 10^5 < N_{Re} < 10^7 \end{cases} \quad \text{Ec. 37-b}$$

Donde:

$N_{Re}$ : Numero de Reynolds para flujo [NA]

$N_{Pr}$ : Numero de Prandlt del fluido [NA]

$Nu_m$ : Numero de Nusselt de transferencia de calor [NA]

Estas ecuaciones permiten determinar el número de Nusselt para el flujo de concentrado sobre la superficie del cilindro del evaporador, el que se toma como una pared plana. Estas ecuaciones se usaran para programar una función en MATLAB, que permitirá realizar análisis de sensibilidad.

#### 1.3.2.2.12 Cálculo de coeficiente de convección para pared plana

El coeficiente de convección es una correlación simplificada sobre el carácter de trasferencia de calor. Para capas o paredes planas, se usa en lugar del diámetro hidráulico la longitud de la capa plana.

$$h = \frac{Nu_m k}{L} \quad \text{Ec. 38}$$

Donde:

$h$ : Coeficiente de convección para capa plana [ $W / m^2 C$ ]

$k$ : Conductividad térmica del fluido [ $W/m ^\circ C$ ]

$Nu_m$ : Numero de Nusselt de transferencia de calor [NA]

Esta ecuación permite calcular el coeficiente de transferencia de calor por convección entre el concentrado y la superficie interna del cilindro del evaporador. Para efectos de cálculo por el gran diámetro que tiene el cilindro se lo toma como si fuese una pared plana, más otras de simplificaciones.

### 1.3.2.2.13 Cálculo de la resistencia térmica de pared plana para transferencia por conducción.

La resistencia térmica en paredes planas representa la capacidad del material para no permitir el flujo de calor. Esta resistencia está definida por la conductividad térmica del material y la distancia entre la superficie interna y externa.

$$R = \frac{e}{s k} \quad \text{Ec. 39}$$

Donde:

Donde:

$e$ : Espesor de pared de capa plana [m]

$k$ : Conductividad térmica del fluido [W/m C]

$s$ : Superficie de capa plana de intercambio [NA]

$R$ : Resistencia térmica de pared de capa plana [m<sup>2</sup> °C/ W]

Esta ecuación se usa para calcular la resistencia térmica de la pared del cilindro del evaporador. Con esta ecuación permite determinar la temperatura externa de la pared del cilindro.

### 1.3.2.2.14 Cálculo de la temperatura media logarítmica

La diferencia media logarítmica es la representación de la media de temperaturas entre entradas y salidas de flujos másicos y de energía. Se obtiene a partir de la resolución de la ecuación diferencial resultado del balance de energía de procesos de transferencia de calor.

$$\Delta T_{ml} = \frac{(T_s - T_e) - (T_s - T_i)}{\ln \left( \frac{T_s - T_e}{T_s - T_i} \right)} \quad \text{Ec. 40}$$

Donde:

$\Delta T_{ml}$ : Diferencia media logarítmica de la temperatura [°C]

$T_s$ : Temperatura de superficie de intercambio [W/m C]

$T_e, T_i$ : Temperatura de salida y entrada del fluido sobre capa plana de intercambio [NA]

Esta ecuación permite determinar la media logarítmica de la diferencia entre las temperaturas de entrada y salida de flujo de masa y la temperatura de la superficie en procesos de transferencia de calor por convección.

### 1.3.2.2.15 Resistencia total para los sistemas de intercambio de calor

La resistencia térmica global es la suma de todas las resistencias a la transferencia de calor, que pueden ser por convección y conducción.

$$R_t = \frac{1}{h_1 s_1} + R_{c1} + \dots + R_{cn} + \frac{1}{h_n s_n} \quad \text{Ec. 41}$$

Donde:

- $R_t$ : Resistencia total del sistema de transferencia de calor [ $m^2 \text{ }^\circ\text{C}/W$ ]
- $h_n$ : Coeficiente de convección para n-ésimo proceso de intercambio [ $W/m^2 \text{ }^\circ\text{C}$ ]
- $s_n$ : Superficie de intercambio para n-ésimo proceso de intercambio [ $m^2$ ]
- $R_{cn}$ : Resistencia por conducción de la n-ésimo proceso de intercambio [ $m^2 \text{ }^\circ\text{C}/W$ ]

Esta ecuación permite determinar la resistencia total o global para la transferencia de calor, e debe tomar en cuenta todas las resistencias presentes en el camino del flujo de calor. En nuestro trabajo se suman todas las resistencias por convección y las resistencias por conducción de las paredes del tubo del serpentín y la pared del cilindro.

### 1.3.2.2.16 Cálculo de coeficiente global en función de superficie

El coeficiente global de transferencia de calor está definido en función de la mayor superficie de intercambio de calor. Representa la cantidad de potencia que pasa a través de una sección transversal, que genera un cambio de temperatura igual a un grado.

$$U_i = \frac{1}{R_t s_i} \quad \text{Ec. 42}$$

Donde:

- $U_i$ : Coeficiente global de transferencia de calor en función la superficie  $i$  [ $W/m \text{ }^\circ\text{C}$ ]
- $R_t$ : Resistencia total del sistema de transferencia de calor [ $m^2 \text{ }^\circ\text{C}/W$ ]
- $s_i$ : Superficie  $i$  de intercambio de calor [ $m^2$ ]

Esta ecuación permite calcular el coeficiente global de transferencia de calor para el evaporador con serpentín. Esto permite determinar la pérdida de calor hacia el ambiente.

### 1.3.2.2.17 Cálculo de la eficiencia de intercambio de calor

La eficiencia térmica es la relación entre la cantidad de energía aprovechada y la energía alimentada al proceso.

$$\xi_c = \frac{q_g - q_p}{q_g} \times 100 \quad \text{Ec. 43}$$

Donde:

$\xi_c$ : Eficiencia de intercambio de calor [%]

$q_g$ : Calor entrante al sistema de intercambio de calor [W]

$q_p$ : Calor perdido durante el proceso de intercambio de calor [W]

Esta ecuación permite determinar la eficiencia térmica porcentual. Representa la capacidad de aprovechamiento del calor comunicado por el vapor para el proceso de evaporación.

### 1.3.3 Modelo matemático de proceso de evaporación

La evaporación es un proceso que comprende dos etapas térmicas definidas. Las cuales son el proceso de calentamiento del líquido a evaporarse y el proceso de evaporación, es decir que el modelo matemático de un proceso de evaporación comprende dos estados. En los apartados siguientes se dará una descripción más detallada de cada estado y se plantearán las ecuaciones que son necesarias para construir la aproximación matemática del comportamiento del proceso.

#### 1.3.3.1 Etapa de calentamiento (elevación de temperatura hasta el punto de ebullición)

En esta parte del proceso de evaporación, el líquido a evaporarse absorbe calor para aumentar su temperatura desde la temperatura de alimentación  $T_F$  hasta la temperatura de ebullición  $T_{bF}$ . La temperatura de ebullición depende de las características propias del líquido en las que interviene la composición y factores propios del sistema como presión y temperatura. Normalmente para simplificar el cálculo se estiman algunas propiedades como constantes y el líquido como homogéneo y se promedia las propiedades en relación al rango de temperaturas de trabajo o bien se toma una temperatura media. La ecuación que permite describir el comportamiento medio del fluido al calentarse es la siguiente:

$$q = m_f \overline{C_{pf}} (T_{bF} - T_F) \quad \text{Ec. 44-a}$$

$$\overline{C_{pf}} = \frac{\sum_{i=1}^n C_p(T_j)}{n} = \sum_{j=1}^n a + bT_j + cT_j/n \quad \text{Ec. 44-b}$$

Donde:

- $q$ : Flujo de calor de calentamiento [kJ/s]
- $m_f$ : Flujo másico o masa a calentarse [kg/s]
- $\overline{C_{pf}}$ : Capacidad calorífica media entre  $T_{bF}$  y  $T_F$  [kJ/kg °C]
- $T_{bF}$ : Temperatura de ebullición [°C]
- $T_F$ : Temperatura de alimentación [°C]
- $T_j$ : Valores de temperatura entre  $T_{bF} - T_F$
- $n$ : Numero de temperaturas entre  $T_{bF} - T_F$

Para el modelo implementado, se va a recalculer  $C_{pf}$  a cada paso de la simulación, por tanto las ecuaciones para obtener el  $C_{pf}$  i será la siguiente:

$$q = m_f C_{pf}(t) (T_b(t) - T(t)) \quad \text{Ec. 44-c}$$

$$C_{pf}(t) = a + b T(t) + cT^2(t) \quad \text{Ec. 44-d}$$

Donde:

- $m_f$ : Flujo másico o masa a calentarse [kg/s]
- $C_{pf}(t)$ : Capacidad calorífica en el instante  $t$  [kJ/kg °C]
- $T_b(t)$ : Temperatura de ebullición en el instante  $t$  [°C]
- $T(t)$ : Temperatura en el instante  $t$  [°C]

La temperatura de ebullición  $T_{bF}$  incrementa al disminuir la cantidad de agua en una solución, esto hace necesario que en cada paso de la simulación se actualice la temperatura de ebullición en función de los cambios de composición. Para el caso usaremos una correlación simple para soluciones concentradas, para determinar el incremento ebulloscopio:

$$\Delta T_b(t) = 0,33 \exp(4x_{st}) \quad \text{Ec. 45-a}$$

$$T_b(t) = T_{b0} + \Delta T_b(t) \quad \text{Ec. 45-b}$$

Donde:

- $\Delta T_b(t)$ : Incremento ebulloscópico en el instante  $t$  [°C]
- $x_{st}$ : Fracción masa de azúcares totales en el instante  $t$  [kg/s]

$T_b(t)$ : Temperatura de ebullición en el instante  $t$  [°C]

$T_{b0}$ : Temperatura de ebullición en condiciones iniciales [°C]

La ecuación completa para la etapa de calentamiento es la siguiente:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{m_f(t) C_{pf}(t)} [P(t) - U s_v (T(t) - T_a)] \quad \text{Ec. 46}$$

Donde:

$\frac{dT}{dt}$ : Gradiente de temperatura del fluido en función del tiempo [°C/s]

$P(t)$ : Potencia suministrada al fluido a evaporarse [kJ/s]

$T(t)$ : Temperatura del fluido [°C]

$T_a$ : Temperatura del ambiente [°C]

$m_f(t)$ : Masa del fluido en el instante  $t$  [kg]

$C_{pf}(t)$ : Capacidad calorífica del fluido en el instante  $t$  [kJ/kg °C]

$U$ : Coeficiente global de transferencia de calor [ $W/m^2 C$ ]

$s_v$ : Superficie de intercambio de calor [ $m^2$ ]

### 1.3.3.2 Deducción de modelo matemático de proceso de calentamiento.

El balance de masa es el mismo para las dos etapas del proceso de evaporación, por tanto la ecuación 46, es útil para la etapa de evaporación y la etapa de calentamiento. Pero se la especifica como modelo de la etapa de evaporación, porque es la ecuación que gobierna el proceso en el periodo de tiempo que tarda el proceso hasta formar la primera gota o cantidad de vapor, proveniente del concentrado. El origen de la ecuación 46 es el balance de energía del proceso de evaporación. El proceso para obtener la ecuación 46 es el siguiente:

Primero establecemos el modelo básico del balance de energía no estacionario.

$$\sum E - \sum S + G = A \quad \text{Ec. 47}$$

Donde:

$E$ : Flujo de entrada de energía [kJ/s]

$S$ : Flujos de salida de energía, incluyendo pérdidas [kJ/s]

- G: Generación de energía [ kJ/s]  
 A: Acumulación de energía en el sistema[ kJ/s]

Si se toma como nula la generación de energía  $G = 0$ , la acumulación es dependiente de los flujos de entrada y salida. Expresada en función de flujo de material como ecuación diferencial se obtiene:

$$m_i C_{pi} T_i(t) - m_f C_{pf}(t) T_f(t) - UA[T_f(t) - T_a] = m_f C_p \frac{dT_f}{dt} \quad \text{Ec. 48}$$

La ecuación 48, es ideal para un proceso con flujos de entrada y salida continuos, pero en el caso del proceso de evaporación estudiado, que es un proceso batch es decir que se podría resumir como: carga-procesa-descarga. Para ajustar esta ecuación a un proceso batch, se debe eliminar el flujo de salida, convertir el flujo de entrada de energía de una potencia comunicada por material entrante al sistema a solamente energía comunicada por procesos de transferencia  $P(t)$ . La ecuación resultado de estas operaciones es la siguiente:

$$P(t) - U_{sV}[T(t) - T_a] = m_f(t) C_{pf}(t) \frac{dT}{dt}$$

Los factores  $m(t)$ ,  $C_p(t)$  no se estimaron constantes en el tiempo por características propias del proceso debido a que estos cambian con la composición y la temperatura del sistema. El factor  $s_V$ , se utiliza para representar la superficie de intercambio de calor del evaporador. Para obtener la ecuación 48, solo es necesario despejar el término diferencia de la temperatura del concentrado  $\frac{dT(t)}{dt}$ .

### 1.3.3.3 Etapa de evaporación del líquido (absorción de calor latente)

Para los proceso de evaporación de alimentos se emplea como medio de transporte y transferencia de energía térmica el vapor de agua. Esto se debe a la homogeneidad de la distribución de la energía que ejerce un volumen de vapor, a comparación del uso de arcos eléctricos o superficies de intercambio por contacto, que crean puntos de acumulación local del calor. La necesidad de homogeneizar el flujo de calor, se debe a la necesidad de mantener ciertas características, en todas partes del producto alimenticio, preservando de esta manera, la mayor cantidad de las sustancias nutritivas de la materia prima.

En la etapa de evaporación tenemos una pérdida de masa en forma de flujo de vapor, emitido desde el líquido que se está concentrando. Este depende específicamente de las propiedades del sistema térmico. La presión atmosférica o la operativa, si el sistema es cerrado, determina el punto de ebullición de la mezcla, que representa el líquido a concentrarse, también intervienen la composición y las reacciones físico-químicas de los componentes. En este punto para simplificar el sistema de ecuaciones se aplican las mismas ecuaciones subsidiarias, presentadas en el apartado de correlaciones de propiedades de alimentos, para las dos etapas del proceso (calentamiento y evaporación). En esta etapa también se contemplan la pérdida de calor hacia el ambiente y la pérdida generada por el vapor proveniente de líquido a concentrarse. Igualmente para simplificar el cálculo, se toma como constante el coeficiente global de transferencia de calor.

La ecuación que permite determinar la masa de evaporado es la siguiente:

$$\frac{dM_E}{dt} = \frac{P(t)}{H_v} - \frac{U s_v (T(t) - T_a)}{H_v} \quad \text{Ec. 49}$$

Donde:

$\frac{dM_E}{dt}$ : Gradiente de masa evaporada del fluido en función del tiempo [kg/s]

$P(t)$ : Potencia suministrada al fluido a evaporarse [kJ/s]

$T(t)$ : Temperatura del fluido [°C]

$T_a$ : Temperatura del ambiente [°C]

$H_v$ : Calor latente de vaporización del fluido [kJ/kg]

$U$ : Coeficiente global de transferencia de calor [W/m<sup>2</sup> C]

$s_v$ : Superficie de intercambio de calor [m<sup>2</sup>]

Para la ecuación 49, se emplea el principio de Newton del enfriamiento tomando en cuenta las pérdidas de calor hacia el ambiente. Las variables de entrada  $P(t)$  y  $T(t)$ , mantienen los valores de la última iteración del proceso de simulación.

#### 1.3.3.4 Dedución del modelo matemático del proceso de evaporación

Para poder deducir la ecuación 49, se tiene que arreglar la ecuación de balance de energía del proceso de evaporación. Para ello primero planteamos la ecuación base del balance de materia, que es la misma expresión de la ecuación 47.

Con la diferencia de que las entradas y salidas, son flujos de masa. Para un proceso batch se debe tomar en cuenta que el flujo de entrada no es continuo, sino que se carga una cantidad de materia al inicio del proceso y luego esta se procesa. También debemos aclarar que para un proceso de evaporación el balance de masa está vinculado a la potencia comunicada desde el serpentín. Una vez calentado la solución hasta la temperatura de ebullición, la mezcla empieza a absorber energía para cambiar de fase el agua no ligada de la leche o el zumo de frutas. La energía que necesita para evaporar dicha cantidad de agua es la entalpía de vaporización del agua a las condiciones del proceso  $H_v$ . Para aproximar más el proceso al comportamiento real, se toman en cuenta las pérdidas de energía hacia el ambiente, expresándolas como la cantidad de masa que no cambia de estado.

$$m_E = m_{EP} - m_{NP} \quad \text{Ec. 50}$$

$m_E$ : Masa evaporada [kg]

$m_{EP}$ : Masa que debería evaporarse por la potencia entrante [kg]

$m_{NP}$ : Masa que no se evapora por energía perdida [kg]

Para estructurar la ecuación diferencial de balance de materia, se debe expresar en función de las variables de entrada del proceso. La masa evaporada  $m_E$ , es la parte diferencial de la ecuación. La masa evaporada por la potencia comunicada al proceso, es el cociente de la potencia y la entalpía de vaporización  $\frac{P(t)}{H_v}$ . Y la masa no evaporada es el cociente de la energía perdida por transferencia de calor hacia el ambiente  $\frac{U s_v (T(t)-T_a)}{H_v}$ .

#### 1.3.3.5 Modelo matemático de las válvulas de control

El comportamiento de las válvulas de control depende del diseño de las mismas, en nuestro caso se usara válvulas cerradas por defecto, y de apertura y cierre completo. Las válvulas completamente abiertas o cerradas reciben una señal eléctrica con la que abren completamente el paso del fluido, es decir, permiten el flujo máximo a través de ellas. Si se corta la señal eléctrica

estas cierran el paso al flujo de material. La ecuación que describiría este comportamiento sería la siguiente:

$$m_G(t) = K_v \varphi(t) \sqrt{\Delta P} \quad \text{Ec. 51}$$

Donde:

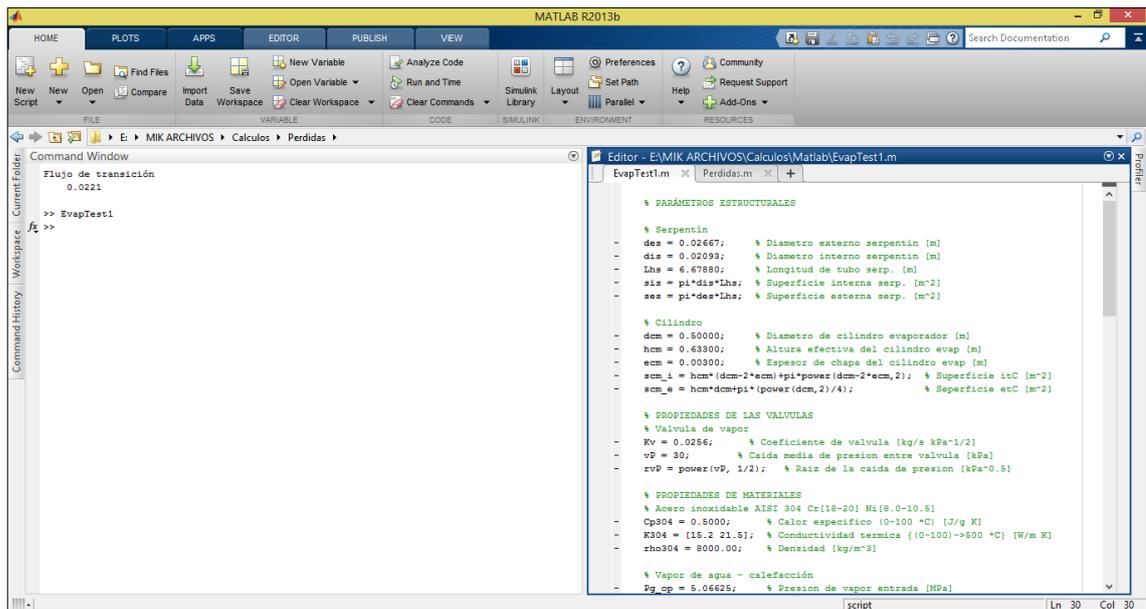
- $m_G(t)$ : Flujo másico de vapor o agua [ $kg/s$ ]
- $K_v$ : Coeficiente de flujo de la válvula [ $kg/kPa s$ ]
- $\varphi(t)$ : Fracción de apertura de la válvula [ $NA$ ]
- $\Delta P$ : Caída de presión en la válvula de control [ $kPa$ ]

Para el caso de las válvulas completamente abiertas o cerradas, la entrada  $\varphi(t)$  toma valores de 0 o 1, dependiendo si se cierra o abre la válvula respectivamente.

### ***1.3.4 Aplicación de simulación de proceso de evaporación***

#### ***1.3.4.1.1 Matlab/Simulink***

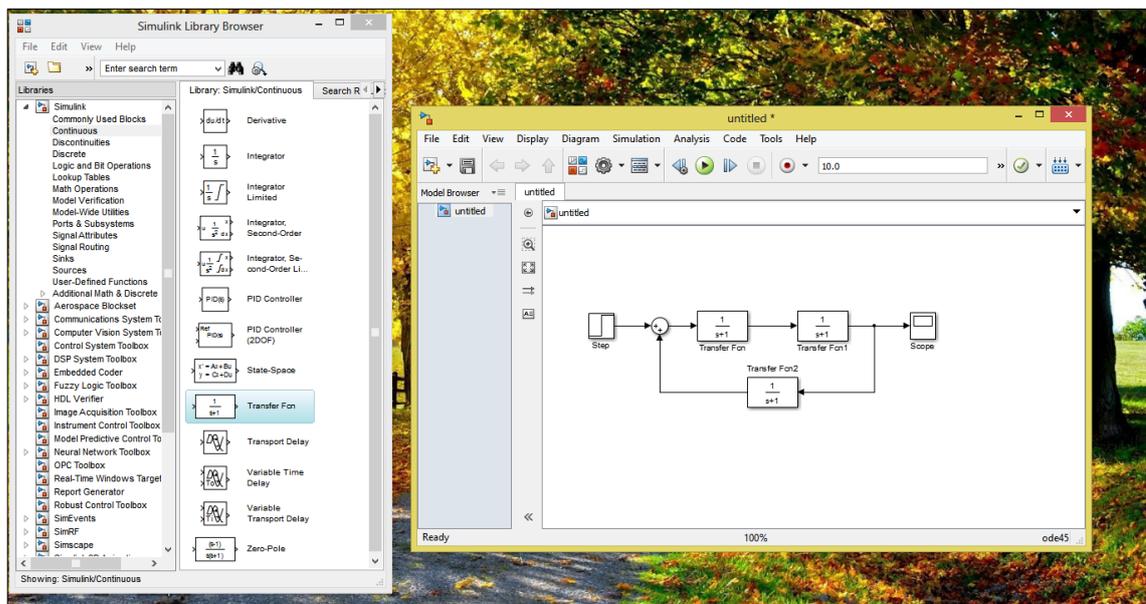
Matlab es una herramienta de cálculo aplicada para áreas de la ciencia y la ingeniería desarrollada por MathWorks Inc., muchos no lo definen como un lenguaje de programación en sí, sino como un conjunto de herramientas de cálculo que permiten resolver una gran cantidad de problemas matemáticos. Matlab aplica el cálculo matricial como base para cálculos complejos, es decir, que permite construir matrices y aplicar sus operaciones para resolver de manera simple, sistemas complejos de ecuaciones. Posee su propio lenguaje de expresión de sentencias, que a su vez se basa en la definición de: tipos de variables; estructuras de control de procesamiento; operaciones: lógicas, matemáticas, etc.; objetos o clases y herramientas o aplicaciones que automatizan cálculos complejos.



**Figura 8-1:** Entorno de programación de Matlab 2013b versión de prueba.

Fuente: Captura de pantalla de entorno de MATLAB.

Simulink es una herramienta del entorno Matlab que permite expresar de manera gráfica operaciones matemáticas. Por ello, es mucho más fácil trabajar con diagramas de bloques que representan los sistemas de control. Como es de esperar Matlab es una herramienta de cálculo con licencia de pago, por ello para este trabajo se usó la versión de prueba de Matlab 2013, que tiene lo básico para resolver los cálculos.



**Figura 9-1:** Entorno Simulink de Matlab 2013b versión de prueba.

Fuente: Captura de pantalla de MATLAB.

## CAPITULO II

### 2 MARCO METODOLÓGICO

#### 2.1 Muestreo

Para evaluar el evaporador en relación a la eficiencia del proceso, se empleó la toma de datos de temperatura de la marmita, usando sensores de temperatura, con los que se pudo aproximar el coeficiente global de transferencia. Además, siendo la eficiencia también dependiente del tiempo de residencia del proceso, se comparó con el tiempo medio de residencia proveniente de los datos tomados de la evaluación del sistema de control, con el tiempo presentado en la tesis de diseño y construcción del evaporador.

El rendimiento se comparó por la validación del equipo con los datos obtenidos de rendimiento, usando el sistema de control automático. Además se plantearon realizar cuatro pruebas de funcionamiento en las cuales se va a producir: mermelada, dulce de leche, jarabe de menta y uva, y en la última evaluación se lo uso como intercambiador de calor.

#### 2.2 Metodología

##### 2.2.1 *Métodos*

Los métodos empleados en el presente proyecto, están fundamentados en la base bibliográfica consultada, de la cual derivan los conceptos, definiciones, técnicas, y demás principios científicos necesarios para la consecución de los objetivos planteados. Así como, de la información aportada por la toma de datos experimentales, usando los procedimientos que se describirán en este capítulo.

### 2.2.1.1 *Método Inductivo*

Por medio del tratamiento de los datos obtenidos por procedimientos experimentales durante el proceso de evaluación del equipo y el sistema de control, se partió de los procesos más simples implicados en la evaporación. Las etapas del proceso de evaporación corresponden al calentamiento y evaporación. Usando la información experimental se construyó mediante balances de masa parciales en cada etapa, los modelos matemáticos individuales. Luego se analizó los resultados individuales y construyó el modelo general del proceso de evaporación, que se resolvió usando Simulink/MATLAB.

### 2.2.1.2 *Método Deductivo*

Con el modelo matemático global del proceso de evaporación se obtuvo las características de la temperatura y tiempo de operación. Con estos datos obtenidos de la simulación y los resultados del diagnóstico de funcionalidad y control del proceso de evaporación, se definieron las características del sistema de control, así como se dimensionaron las válvulas. La calibración del controlador y el planteamiento de la guía de operación, se aplicaron prácticas de validación para la producción de alimentos concentrados. Se partió del modelo global simulado y del diagnóstico del proceso para diseñar y dimensionar cada elemento del sistema de control.

## 2.2.2 *Técnicas*

Se hizo uso de las siguientes técnicas de recolección de información:

**Evaluación de funcionalidad y control:** Se usaron matrices cualitativas y cuantitativas para determinar las fallas y facilidades de aplicación del sistema de control, y determinar las variables que serán sujeto de control.

**Muestreo de Temperatura:** Se empleó un circuito básico con: sensores de temperatura, termoresistencias y una tarjeta de adquisición de datos libre, en la toma de información de temperaturas, para calcular pérdidas de calor por la superficie de la marmita.

**Simulación operativa:** Se presenta el algoritmo del proceso de operación del evaporador, donde se especifica: paradas, ciclos de calentamiento y enfriamiento, periodo de extracción del producto y alimentación de materia prima.

### 2.2.3 Diagnóstico de funcionalidad y control

**Tabla 1-2:** Diagnostico de funcionalidad y control del evaporador

FUNDAMENTO	MATERIALES	TECNICA	CÁLCULO
<p>El objetivo del diagnóstico es determinar cuáles son las condiciones iniciales del evaporador: fallas, facilidades y las variables que pueden ser sujetas a control.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Matrices de análisis cualitativos y cuantitativos ANEXO XVII y ANEXO XVIII.</li> <li>• Hojas de cálculo de Excel</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Toma de fotografías para calificación de cualidades del evaporador</li> <li>• Calificación usando matriz cuantitativa</li> <li>• Determinación de variables sujetas a control mediante matriz cualitativa</li> </ul>	<p>Para el uso de las matrices cuantitativas se emplea la operación de suma de los valores determinados como calificaciones para cada variable.</p> $Calif_{total} = \sum Calif_{parcial}$ <p>Donde:</p> <p><i>Calif<sub>total</sub></i>: Calificación total</p> <p><i>Calif<sub>parcial</sub></i>: Calificación parcial</p>

Realizado por: PATIÑO T.; VILLACÍS M., 2015.

### 2.2.4 Muestreo de temperatura

**Tabla 2-2:** Muestreo de temperaturas para cálculo de transferencia de calor del evaporador con serpentín.

FUNDAMENTO	MATERIALES	TÉCNICA	CÁLCULO
<p>Para poder construir el modelo matemático de proceso de evaporación, se requieren los coeficientes globales de trasferencia de calor así como las temperaturas de las superficies de intercambio de calor.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tarjeta de adquisición de datos Arduino UNO R3 Front</li> <li>• Sensores de temperatura tipo LM35 lineal-proporcional</li> <li>• Termo resistencia tipo PT100 sumergible.</li> <li>• Resistencia eléctricas de 330 Ω.</li> <li>• Resistencias eléctrica de 100 Ω.</li> <li>• Cable eléctrico de 0.5 mm<sup>2</sup>.</li> <li>• Cable USB 1,5m CAB-RLM-USB2-R001015.</li> <li>• Protoboard</li> <li>• Ordenador con sistema operativo Windows 7</li> <li>• IDE Arduino C++ y Labview</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Armar el circuito, diagrama ANEXO XIX.</li> <li>• Conectar tarjeta Arduino Uno con el ordenador.</li> <li>• Obtener datos con el programa Labview y procesar los datos con MS Excel 2013.</li> <li>• Validar el coeficiente con simulación Térmica.</li> </ul>	$\frac{hA}{\rho V C_p} \int_{t_0}^t dt = \int_{T_i}^{T(t)} \frac{d(T - T_\infty)}{(T - T_\infty)}$ <p>Donde:</p> <p><math>T_i</math>: Temperatura del fluido en el tiempo <math>t_i</math>.</p> <p><math>T(t)</math>: Temperatura del fluido en el tiempo <math>t</math>.</p> <p><math>T_\infty</math>: Temperatura de la superficie.</p> <p><math>h</math>: Coeficiente de convección.</p> <p><math>A</math>: Superficie de transferencia de calor.</p> <p><math>\rho</math>: Densidad cuerpo sólido.</p> <p><math>V</math>: Volumen que ocupa el sólido.</p> <p><math>C_p</math>: Capacidad calorífica del sólido.</p>

Realizado por: PATIÑO T.; VILLACÍS M., 2015.

### 2.2.5 Elaboración de dulce de leche (práctica de validación)

**Tabla 3-2:** Técnica para la elaboración de dulce de leche.

FUNDAMENTO	MATERIALES	TÉCNICA	CÁLCULO
Para poder determinar el correcto funcionamiento y poder evaluar las mejoras obtenidas con la implementación del equipo de evaporación se realizarán prácticas de prueba.	<p><b>Sustancias y Reactivos</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Leche</li> <li>Azúcar</li> <li>Pectina. (0,5%)</li> <li>Agua.</li> <li>Sorbato de potasio (0,02%)</li> <li>Canela en polvo</li> </ul> <p><b>Materiales y Equipos</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Balanza</li> <li>Termómetro</li> <li>Evaporador de simple Efecto</li> <li>Vaso de precipitación de 1000 ml</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Realizar la limpieza a fondo del equipo</li> <li>Homogenizar la materia prima, para después realizar un tamizado que retenga aquellas impurezas.</li> <li>Alimentar el equipo y encender la agitación.</li> <li>Abrir la llave procedente de un caldero para alimentar al serpentín del elemento calefactor.</li> <li>Estar pendiente del valor que registran tanto el manómetro como del termómetro.</li> <li>Cuando en el termómetro se registran los 60°C, se empieza a añadir el azúcar; por cada 10 litros de leche 2 kg de azúcar.</li> <li>Después de 10 minutos de la adición de la azúcar, añadir el Sorbato de potasio.</li> <li>Luego de 10 minutos se añade la pectina y canela en polvo para que tome el color deseado.</li> <li>El manjar se obtendrá cuando al realizar la prueba del punto de caramelo (92°C), donde la muestra no se diluya en el agua.</li> <li>Inmediatamente finalizada la elaboración, el dulce de leche obtenido se enfría a 60°C para realizar el envasado.</li> </ul>	<p><b>Balance de masa:</b></p> $F = S + E$ $E = F - S$ <p><b>Balance de energía:</b></p> $q_F + q_W = q_E + q_S + q_C + q_p$ $W = \frac{E H_E + S h_S - F h_F}{\lambda_W}$ <p><b>Fracción de componentes:</b></p> $F X_{FL} = S X_{SL} + E X_{EL}$ <p><b>Donde:</b></p> <p><math>F</math>: Alimentación [kg]  <math>S</math>: Concentrado [kg]  <math>E</math>: Evaporado [kg]  <math>W</math>: Vapor [kg]  <math>q_i</math>: Flujo de calor <math>i</math> [kJ/kg]  <math>H_i, h_i</math>: Entalpía de vapor y condensado [kJ/kg]  <math>x_i</math>: Fracción de componente <math>i</math> [NA]</p>

Realizado por: PATIÑO T.; VILLACÍS M., 2015.

## 2.2.6 Elaboración de mermelada (práctica de validación)

**Tabla 4-2:** Procedimiento para la elaboración de mermelada.

FUNDAMENTO	MATERIALES	TÉCNICA	CÁLCULO
Para poder determinar el correcto funcionamiento y poder evaluar las mejoras obtenidas con la implementación del equipo de evaporación se realizan prácticas prueba.	<p><b>Sustancias y Reactivos:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Pectina (1%)</li> <li>• Ácido cítrico (0,05%)</li> <li>• Sorbato de potasio (0,1%)</li> <li>• Azúcar (1: 1)</li> <li>• Agua (1: 2)</li> <li>• Fruta</li> </ul> <p><b>NOTA:</b> los porcentajes de materia prima son con respecto a la fruta o pulpa.</p> <p><b>Materiales y Equipos:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Evaporador</li> <li>• Cernidor</li> <li>• Licuadora</li> <li>• Cucharón</li> <li>• Cuchillos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Recepción de la materia prima:</b> La fruta se receipta previo muestreo e inspección y almacena hasta el momento de la elaboración.</li> <li>• <b>Selección:</b> Se descarta las frutas que presentan daños físicos, químicos y biológicos.</li> <li>• <b>Lavado:</b> Con agua potable, sirve para eliminar las partículas extrañas adheridas a la fruta. Luego del lavado las frutas se desinfectan con una solución de agua con cinco gotas de solución de cloro por litro.</li> <li>• <b>Pelado y desmillado:</b> Se utiliza cuchillos de acero inoxidable o peladoras mecánicas.</li> <li>• <b>Blanqueado térmico:</b> Se realiza colocando las frutas en agua caliente, entre 85 a 90°C durante 3 a 5 min. Esta operación sirve para inactivar las enzimas que oscurecen la fruta y cambian el sabor. Asimismo acentúa el color natural de la fruta.</li> <li>• <b>Pesado:</b> Se pesa la fruta que se va a utilizar para la elaboración de la mermelada.</li> </ul>	<p><b>Balance de masa:</b></p> $F = S + E$ $E = F - S$ <p><b>Balance de energía:</b></p> $q_F + q_W = q_E + q_S + q_C + q_p$ $W = \frac{E H_E + S h_S - F h_F}{\lambda_W}$ <p><b>Fración de componentes:</b></p> $F X_{FL} = S X_{SL} + E X_{EL}$ <p><b>Donde:</b></p> <p><i>F:</i> Alimentación [kg]  <i>S:</i> Concentrado [kg]  <i>E:</i> Evaporado [kg]  <i>W:</i> Vapor [kg]  <i>q<sub>i</sub>:</i> Flujo de calor i [kJ/kg]  <i>H<sub>i</sub>, h<sub>i</sub>:</i> Entalpia de vapor y condensado [kJ/kg]</p>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Refractómetro</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Acondicionamiento de la pulpa:</b> La fruta se corta en pedazos pequeños de 1 <i>cm</i> x 1 <i>cm</i>. Una parte de ella se licúa y otra parte se ralla con un rallador.</li> <li>• <b>Cocción:</b> La fruta se calienta en un evaporador de simple efecto de acero inoxidable hasta una temperatura de 60°C donde se añade el 10% del azúcar y la cantidad de ácido cítrico que necesitamos en el proceso. <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Al alcanzar los 80°C se agrega un 30% más de azúcar.</li> <li>▪ Cuando se alcance los 85°C agregar 30% más de azúcar.</li> <li>▪ Cuando la temperatura llegue a los 92°C, agregar el 30% del azúcar restante, el sorbato de potasio y la cantidad de pectina necesaria para el proceso.</li> </ul> </li> <li>• <b>Envasado:</b> El envasado se realiza entre (70 – 85)°C, en envases previamente esterilizados por acción de vapor de agua sobrecalentado o agua en ebullición. Se deja un espacio de 1 <i>cm</i>. Desde el borde del frasco.</li> <li>• <b>Sellado:</b> Inmediatamente después del envasado los frascos se cierran herméticamente, procediendo a colocarlo en forma invertida para asegurar el cierre hermético.</li> </ul>	$x_i$ : Fracción de componente i [NA]
--	---	---	--

Realizado por: PATIÑO T.; VILLACÍS M., 2015.

### 2.2.7 Elaboración de jarabe de uva (práctica de validación)

**Tabla 5-2:** Procedimiento para la elaboración de jarabe de uva.

FUNDAMENTO	MATERIALES	TÉCNICA	CÁLCULO
Para poder determinar el correcto funcionamiento y poder evaluar las mejoras obtenidas con la implementación del equipo de evaporación se realizan prácticas prueba.	<p><b>Sustancias y Reactivos</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Uvas</li> <li>• Azúcar</li> <li>• Agua.</li> <li>• Sorbato de potasio (0.1%)</li> <li>• Ácido cítrico (0,05%)</li> </ul> <p><b>Materiales y Equipos</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Balanza</li> <li>• Evaporador de simple Efecto.</li> <li>• Probeta de 1000 ml</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lavar las uvas con cuidado bajo el grifo para no estropearlas.</li> <li>• Quitar los rabos y se apartan los granos pequeños.</li> <li>• Machacar la uva en un recipiente.</li> <li>• Utilizar un paño blanco para después estrujar con fuerza el paño y aprovechar todo el jugo exprimido.</li> <li>• Encender el evaporador y después agregar el jugo de la uva.</li> <li>• Calcular la cantidad de azúcar, a razón de un kilo por cada litro de agua; así como también, las cantidades necesarias de ácido cítrico.</li> <li>• Cuando se alcance una temperatura de 60°C agregar el azúcar y el ácido cítrico necesario en el proceso.</li> <li>• Al alcanzar una temperatura de 90°C pesar y agregar el Sorbato de potasio.</li> <li>• Dejamos reducir (¾ partes), medir los grados brix y luego agregar la menta.</li> </ul>	<p><b>Balance de masa:</b></p> $F = S + E$ $E = F - S$ <p><b>Balance de energía:</b></p> $q_F + q_W = q_E + q_S + q_C + q_P$ $W = \frac{E H_E + S h_S - F h_F}{\lambda_W}$ <p><b>Fracción de componentes:</b></p> $F X_{FL} = S X_{SL} + E X_{EL}$ <p><b>Donde:</b></p> <p><i>F</i>: Alimentación [kg]  <i>S</i>: Concentrado [kg]  <i>E</i>: Evaporado [kg]  <i>W</i>: Vapor [kg]  <i>q<sub>i</sub></i>: Flujo de calor i [kJ/kg]  <i>H<sub>i</sub>, h<sub>i</sub></i>: Entalpia de vapor y condensado [kJ/kg]  <i>x<sub>i</sub></i>: Fracción de componente i [NA]</p>

Realizado por: PATIÑO T.; VILLACÍS M., 2015.

## 2.2.8 Elaboración de jarabe de menta (práctica de validación)

**Tabla 6-2:** Procedimiento para la elaboración de jarabe de menta.

FUNDAMENTO	MATERIALES	TÉCNICA	CÁLCULO
Para poder determinar el correcto funcionamiento y poder evaluar las mejoras obtenidas con la implementación del equipo de evaporación se realizan prácticas prueba.	<p><b>Sustancias y Reactivos</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Uvas</li> <li>• Azúcar</li> <li>• Agua.</li> <li>• Sorbato de potasio (0.1%)</li> <li>• Ácido cítrico (0,05%)</li> </ul> <p><b>Materiales y Equipos</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Balanza</li> <li>• Evaporador de simple Efecto.</li> <li>• Probeta de 1000 ml</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lavar la menta con agua para quitar la suciedad que esta pueda tener.</li> <li>• Pesar la cantidad de menta que se va a utilizar para realizar el jarabe.</li> <li>• Limpiar el evaporador para poder empezar el proceso.</li> <li>• Añadir agua purificada necesaria para el proceso en el evaporador.</li> <li>• Encender el evaporador para iniciar el proceso.</li> <li>• Calcular la cantidad de azúcar, a razón de un 10 kilo por cada 15 litro de agua; así como también, las cantidades necesarias de ácido cítrico.</li> <li>• Cuando se alcance una temperatura de 60°C agregar el azúcar y el ácido cítrico necesario en el proceso.</li> <li>• Al alcanzar una temperatura de 90°C pesar y agregar el Sorbato de potasio.</li> <li>• Dejamos reducir (¾ partes), medir los grados brix y luego agregar la menta.</li> </ul>	<p><b>Balance de masa:</b></p> $F = S + E$ $E = F - S$ <p><b>Balance de energía:</b></p> $q_F + q_W = q_E + q_S + q_C + q_P$ $W = \frac{E H_E + S h_S - F h_F}{\lambda_W}$ <p><b>Fracción de componentes:</b></p> $F X_{FL} = S X_{SL} + E X_{EL}$ <p><b>Donde:</b></p> <p><i>F</i>: Alimentación [kg]  <i>S</i>: Concentrado [kg]  <i>E</i>: Evaporado [kg]  <i>W</i>: Vapor [kg]  <i>q<sub>i</sub></i>: Flujo de calor i [kJ/kg]  <i>H<sub>i</sub>, h<sub>i</sub></i>: Entalpia de vapor y condensado [kJ/kg]  <i>x<sub>i</sub></i>: Fracción de componente i [NA]</p>

Realizado por: PATIÑO T.; VILLACÍS M., 2015.

## 2.3 Datos experimentales

### 2.3.1 Medidas estructurales del evaporador de simple efecto con serpentín.

**Tabla 7-2:** Medidas tomadas del equipo evaporador para planos.

Sección	Subsección	Magnitud	Variable	Medida [m]
Cilindro	Base	radio	r_bc	0,2500
		perímetro	p_bc	1,5708
		espesor chapa	e_bc	0,0030
	Pared	espesor chapa	e_pc	0,0030
	Refuerzo	espesor chapa	e_rc	0,0110
		altura	h_rc	0,0250
	Base soporte de motor	espesor chapa	e_bm	0,0030
		largo	l_bm	0,2000
		ancho	w_bm	0,0800
		distancia 1 orificio	do1_bm	0,0200
		distancia 2 orificio	do2_bm	0,1000
		diámetro orificio	phio_bm	0,0833
	Dispensador	espesor chapa	e_dm	0,0030
		ancho	w_dm	0,1800
		altura	h_dm	0,0670
		profundidad	z_dm	0,1150
		redondeo	rr_dm	0,0050
	Eje	espesor chapa	e_ec	0,0030
		ancho	w_ec	0,1150
		alto	h_ec	0,1150
		refuerzo ancho	w_re	0,0250
		refuerzo alto	h_re	0,0290
		radio eje	r_ec	0,01275
		largo eje	l_ec	0,1000
		distancia 1 orificio 1	d1o1_ec	0,0200
		distancia 2 orificio 1	d2o1_ec	0,01275
		radio orificio 1	ro1_ec	0,0030
		distancia 1 orificio 2	d1o2_ec	0,0128
		radio orificio 2	ro2_ec	0,0020
	base agitador	radio menor	r1_se	0,0250
		radio mayor	r2_se	0,0030
		radio orificio	ro_se	0,0150
		profundidad orificio	ho_se	0,0150
entrada sensor	distancia vertical	d1_es	0,0900	
	distancia horizontal	d2_es	0,2000	
	radio orificio	ro_es	0,0045	
	radio externo tubería	re_ts	0,008573	

		espesor tubería	e_ts	0,001118
		largo tubería	l_ts	0,0400
Agitador	Eje	Radio	r_ea	0,0150
		Altura	h_ea	0,7500
	Paleta izq.	Espesor	e_pi	0,0100
		Altura	h_pi	0,4000
		Ancho	w_pi	0,1450
		ancho vertical	wv_pi	0,0300
		ancho horizontal	wh_pi	0,0200
		distancia base	db_pi	0,0500
	Paleta der.	Espesor	e_pd	0,0010
		Altura	h_pd	0,1500
		Ancho	w_pd	0,1650
		ancho vertical	wv_pd	0,0300
ancho horizontal		wh_pd	0,0200	
distancia base		db_pd	0,0700	
Soporte	Vigas tipo C	espesor chapa	evc_s	0,0030
		Ancho	wvc_s	0,0620
		Alto	hvc_s	0,0250
		ancho pliegue	wpv_s	0,0130
		Redondeo	rvc_s	0,0020
	bases forma de A	ancho mayor	w1_bs	0,2800
		ancho menor	w2_bs	0,7350
		Altura	h_bs	0,5500
		altura parante intermedio	hp_bs	0,1000
		radio orificios sujeción	ro_bs	0,0050
		distancia línea ref.1	d1_bs	0,0410
		distancia línea ref.2	d2_bs	0,0675
		separación orificios	eo_bs	0,0980
	uniones	longitud viga	lpd_bs	0,6920
		espacio líneaE/p.Horizontal	sp_bs	0,2000
		longitud parante trasero	lpt_bs	0,5680
	anillo sujeción	Ancho	w_as	0,0250
		Alto	h_as	0,0200
		Profundidad	z_as	0,0250
		distancia 1 orificio	d1_as	0,0125
		distancia 2 orificio	d2_as	0,0125
		radio orificio	r_as	0,0030
		Redondeo	rr_as	0,0020
Serpentín	Hélice	altura	h_hs	0,1634
		Radio	r_hs	0,2100
		espacio entre giros	e_hs	0,0331
	Tubería hélice	diámetro externo	de_th	0,0267
		diámetro interno	di_th	0,0209

SopORTE del motor	Tuberías salidas	diámetro externo	de_ts	0,0213
		diámetro interno	di_ts	0,0158
	Base	separación vigas	sv_bsm	0,0470
		ancho de vigas	wv_bsm	0,1590
		Distancia sopt. A/ref1	sr_bsm	0,1900
		Separación sopts.	ss_bsm	0,1860
		radio orificios sujeción	ro_bsm	0,0030
		Distancia 1 orif. Ref	d1_bsm	0,0100
		Distancia 2 orif. Ref	d2_bsm	0,0795
		Barras sujeción motor	Altura	hb_bsm
	Ancho		wb_bsm	0,0200
	espesor		eb_bsm	0,0100
	radio orificios		rob_bsm	0,0050
	Distancia 1 orif. Ref		d1b_bsm	0,0100
	Distancia 2 orif. Ref		d2b_bsm	0,0200
	separación entre orificios		sob_bsm	0,05
	numero de orificios		nob_bsm	2,0000
	base triangular		bt_bsm	0,0400

Realizado por: PATIÑO T.; VILLACÍS M., 2015.

**NOTA:** La mayoría de estos datos no se usan para cálculos de diseño del sistema de control, sino que se emplean para la construcción de modelos 3D y planos del equipo realizados en SolidWorks 2013 versión de prueba. Por tanto los nombres de variables asignadas a las magnitudes no son los mismos a los usados en los cálculos de diseño.

### 2.3.2 *Parámetros del proceso de evaporación para simulación y cálculo del coeficiente de transferencia de calor.*

**Tabla 8-2:** Parámetros para simulación del proceso de evaporación.

Parámetros	Magnitud	Variable	Unidades	Valor
Temperaturas	Temperatura de entrada alim.	T_f	°C	20
	Temperatura de ebullición	T_b	°C	99,97
	Temperatura mínima PLC	T_min	°C	98
	Temperatura máxima PLC	T_max	°C	101
	Temperatura enfriamiento	T_enf	°C	45
	Temperatura media del vapor	Tmg	°C	114,5
Tiempos	Tiempo de evaporación	t_evap	s	3600
	Tiempo de enfriamiento	t_enf	s	3600
Flujos	Volumen inicial concentrado	Vop	m <sup>3</sup>	0,07
	Flujo de vapor	Mg	kg/s	8,58 × 10 <sup>-3</sup>

Realizado por: PATIÑO T.; VILLACÍS M., 2015.

## 2.4 Datos adicionales

### 2.4.1 Medidas estructurales del evaporador usadas en cálculo de coeficiente de transferencia de calor.

**Tabla 9-2:** Medidas tomadas del equipo evaporador para simulación.

Objeto	Magnitud	Variable	Unidades	Valor
Serpentín	Diámetro externo	des	<i>m</i>	0,02667
	Diámetro interno	dis	<i>m</i>	0,02093
	Longitud	Lhs	<i>m</i>	6,6788
	Área interna	sis	<i>m</i> <sup>2</sup>	0,4392
	Área externa	ses	<i>m</i> <sup>2</sup>	0,5592
Cilindro	Diámetro	dcm	<i>m</i>	0,5000
	Atura	hcm	<i>m</i>	0,6330
	Espesor de chapa	ecm	<i>m</i>	0,0030
	Área interna	scmi	<i>m</i> <sup>2</sup>	0,5044
	Área externa	scme	<i>m</i> <sup>2</sup>	0,5128

Realizado por: PATIÑO T.; VILLACÍS M., 2015.

### 2.4.2 Datos de válvulas de control para simulación

**Tabla 10-2:** Datos para simulación de válvulas de control.

Válvula	Magnitud	Variable	Unidades	Valor
Vapor	Coeficiente de caudal	Kvg	<i>m</i> <sup>3</sup> / <i>h bar</i> <sup>0.5</sup>	17,297662
	Calidad de presión	vP	<i>bar</i>	3,102640
Agua	Coeficiente de caudal	Kvg	<i>m</i> <sup>3</sup> / <i>h bar</i> <sup>0.5</sup>	5.36227524
	Calidad de presión	vP	<i>bar</i>	0.068947573

Realizado por: PATIÑO T.; VILLACÍS M., 2015.

### 2.4.3 Propiedades de materiales solidos del evaporador.

**Tabla 11-2:** Propiedades de los materiales del evaporador.

Material	Magnitud	Variable	Unidades	Valor
Acero ASTM 304	Calor específico	Cp304	<i>kJ/kg °C</i>	0,5
	Conductividad térmica	k304	<i>W/m °C</i>	21,5
	Densidad	rho304	<i>kg/m</i> <sup>3</sup>	8000

Realizado por: PATIÑO T.; VILLACÍS M., 2015.

2.4.4 *Propiedades de flujos de suministros de vapor y agua para simulación y coeficiente de transferencia de calor.*

**Tabla 12-2:** Parámetros para simulación del proceso de evaporación.

Suministro	Magnitud	Variable	Unidades	Valor
Vapor de calefacción	Presión media	P_g	psi	45
	Entalpia	Hg	kJ/kg	2731,742
	Densidad	rhog	kg/m <sup>3</sup>	0,562369
	Calor especifico	Cpg	kJ/kg °C	1,89079
	Conductividad térmica	Kg	W/m °C	0,0254504
	Difusividad térmica	alpg	m <sup>2</sup> /s	2,36 × 10 <sup>-5</sup>
	Viscosidad dinámica	mug	kg/m s	1,32 × 10 <sup>-5</sup>
	Viscosidad cinemática	visg	m <sup>2</sup> /s	2,31 × 10 <sup>-5</sup>
	Numero de Prandlt	Nprg	NA	9,80 × 10 <sup>-1</sup>
	Temperatura entrada	Tg1	°C	137
	Temperatura salida	Tg2	°C	92
	Entalpia de vaporización	Hvl	kJ/kg	2,22 × 10 <sup>-3</sup>
Agua saturada	Densidad liquido	rho <sub>fl</sub>	kg/m <sup>3</sup>	969,2085
	Densidad vapor	rho <sub>fg</sub>	kg/m <sup>3</sup>	0,33559
	Entalpia de vaporización	h <sub>fgf</sub>	kJ/kg	2299,8948
	Calor especifico liquido	C <sub>pfl</sub>	kJ/kg °C	4,2022
	Calor especifico vapor	C <sub>pfg</sub>	kJ/kg °C	1,9725
	Conductividad térmica liquido	k <sub>fl</sub>	W/m °C	0,67210
	Conductividad térmica vapor	k <sub>fg</sub>	W/m °C	0,02335
	Viscosidad dinámica liquido	mu <sub>fl</sub>	kg/m s	3,39 × 10 <sup>-5</sup>
	Viscosidad dinámica vapor	mu <sub>fg</sub>	kg/m s	1,17 × 10 <sup>-5</sup>
	Numero de Prandlt liquido	N <sub>prfl</sub>	NA	2.1219
	Numero de Prandlt vapor	N <sub>prfg</sub>	NA	1
	Coficiente de expansión t.	beta <sub>f</sub>	1/K	6,65 × 10 <sup>-4</sup>
Agua a Ts2s	Numero de Pradlt líquido a Ts2s	N <sub>prfl1</sub>	NA	1.26493
	Numero de Pradlt vapor a Ts2s	N <sub>prfl2</sub>	NA	1,02

Realizado por: PATIÑO T.; VILLACÍS M., 2015.

## 2.5 Construcción de modelo matemático de proceso de evaporación

### 2.5.1 Implementación de modelo matemático de evaporación

El proceso de evaporación está compuesto de dos etapas la de calentamiento de una solución o mezcla líquida y la evaporación en sí. Las ecuaciones generales que describen el proceso se presentaron en la parte teórica de este trabajo. Ahora es necesario poder aplicar esas ecuaciones para poder obtener resultados que se aproximen al comportamiento real del proceso. Para ello se aplicaran las ecuaciones usando Simulink/Matlab, y se valorará el proceso de manera dinámica. A continuación describiremos el procedimiento realizado para implementar el modelo matemático.

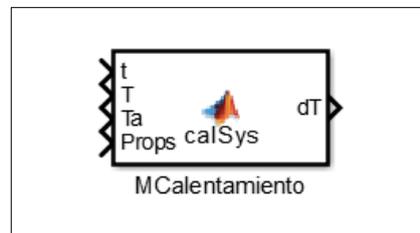
#### 2.5.1.1 Implementación de modelo matemático del proceso de calentamiento

Usando la ecuación 46 en Simulink en un bloque de MATLAB Funtion, para definir la ecuación como una función con las entradas respectivas. A continuación se presenta una tabla con las entradas, salidas y el código implementado.

**Tabla 13-2:** Tabla de entradas y salidas del bloque función calSys.

E/S	Variable	Nombre	Descripción
Entradas	T	tiempo	Tiempo de iteración de proceso de simulación
	T	Temperatura	Temperatura de iteración anterior
	Ta	Temperatura ambiente	Temperatura ambiente (constante)
	Props	Propiedades fluido	Matriz 5x1 con propiedades del fluido
Salidas	dT	Cambio de temperatura	Variación de temperatura/tiempo

Realizado por: PATIÑO T.; VILLACÍS M., 2015.



**Figura 1-2:** Bloque función calSys.

Realizado por: PATIÑO T.; VILLACÍS M., 2015.

### Código implementado

```

1 function dT = calSys(t, T, Ta, Props)
2 %#eml
3     a = zeros(1,5);
4     a(1) = Props(1);    % Potencia
5     a(2) = Props(2);    % Masa
6     a(3) = Props(3);    % Calor específico
7     a(4) = Props(4);    % Coeficiente TC Global
8     a(5) = Props(5);    % Superficie de TC pérdidas
9
10    dT = (1/(a(2)*a(3)))*(a(1)-(a(4)*a(5)*(T-Ta)));

```

En la línea 1 de código se define la función con el comando *function*, luego se asigna el nombre de la variable de salida *dT*, después se aplica el operador “=” para asignar el nombre con el que será llamada la función, en este caso *calSys*. Entre paréntesis se ingresa los nombres de las variables de entrada (*t, T, Ta, Props*). En la línea 2, se aplica el comando *%#eml* para activar el analizador de código MATLAB M- Lint y comprobar en el código de la función errores y recomendar correcciones. En la línea 3, se crea una matriz de 1x5 dimensiones en la que reasignara los valores de la entrada *Props*. Desde la línea 4-8, se asignan al vector *a* todas los valores del vector de entrada *Props*. En la línea 10, se aplica la ecuación 46. Como resultado se obtiene *dT* que se envía por el puerto de salida del bloque MATLAB Funtion, como se observa en la figura 1-2.

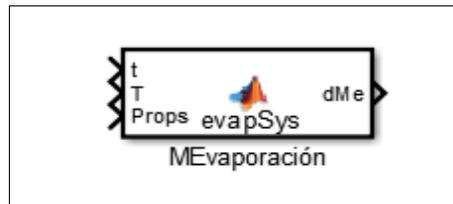
#### 2.5.1.2 Implementación del modelo del proceso de evaporación

Haciendo uso de la ecuación 47, se crea usando un bloque MATLAB Function la función que permite aplicar la ecuación diferencial para obtener la cantidad de masa evaporada, desde el instante en que la temperatura del fluido supera su temperatura de ebullición. A continuación se presenta una tabla con las entradas, salidas y el código implementado.

**Tabla 14-2:** Tabla de entradas y salidas del bloque función *evapSys*.

E/S	Variable	Nombre	Descripción
Entradas	T	tiempo	Tiempo de iteración de proceso de simulación
	T	Temperatura	Temperatura de iteración anterior
	Props	Propiedades fluido	Matriz 5x1 con propiedades del fluido
Salidas	dMe	Masa evaporada	Masa evaporada/tiempo

Realizado por: PATIÑO T.; VILLACÍS M., 2015.



**Figura 2-2:** Bloque función evapSys.  
Realizado por: PATIÑO T.; VILLACÍS M., 2015.

### Código implementado

```

1  function dMe = evapSys(t, T, Props)
2  %#codegen
3      a = zeros(1,6);
4      a(1) = Props(1);    % Potencia
5      a(2) = Props(2);    % Calor de vaporización
6      a(3) = Props(3);    % Temperatura de ebullición
7      a(4) = Props(4);    % Coeficiente TC Global
8      a(5) = Props(5);    % Superficie de TC pérdidas
9      a(6) = Props(6);    % Temperatura ambiente
10
11     if all(T < a(3))
12         dMe = 0;
13     else
14         dMe = abs((1/a(2)) * (a(1) - (a(4) * a(5) * (a(3) - a(6)))));
15     end

```

En la línea 1 de código, se define la función. Para ello se utiliza el comando *function*, seguido del nombre de la variable de salida *dMe*, el operador “=” y el nombre de la función, es este caso es *evapSys*. Luego se especifican entre paréntesis las variables de entrada de la función (*t*, *T*, *Props*). En la línea 2, se aplica el comando *%#codegen* que es una directiva de compilación que sirve para indicar que tienes la intención de generar código para el algoritmo de MATLAB. La adición de esta directiva indica al analizador de código de MATLAB que debe ayudar a diagnosticar y corregir violaciones que darían lugar a errores durante la generación de código. En la línea 3, se crea una matriz que permitirá guarda los valores de las propiedades que se encuentran en la variable de ingreso *Props*. Desde la línea 4 hasta la 9, se asignan los valores de ingreso del vector *Props*. Desde la línea 11 hasta la 15, se aplica un control lógico que permite asignar los valores de *dMe*. Cuando la Temperatura (*T*) inferior a la temperatura de ebullición del concentrado, este es igual a cero, caso contrario *dMe* es igual al resultado obtenido de la operación de la ecuación 47, presentada en la parte teórica de este trabajo. Esto permite que el modelo matemático del proceso de calentamiento controle la temperatura del fluido y el modelo del proceso de evaporación controla la cantidad de masa evaporada.

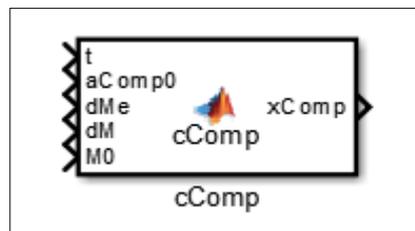
### 2.5.1.3 Implementación de ecuación de cálculo de composición del concentrado.

Como existe una pérdida de agua en forma de vapor, la composición de la solución o mezcla líquida a concentrarse cambia. Por tanto, para poder recalculer las propiedades usando las ecuaciones de correlación de propiedades de un alimento, es necesario actualizar para la nueva iteración de la simulación la composición en función de la masa de agua perdida. A continuación se muestra la tabla de entradas, salidas y el código implementado, para construir este bloque en Simulink.

**Tabla 15-2:** Tabla de entradas y salidas del bloque función cComp.

E/S	Variable	Nombre	Descripción
Entradas	T	tiempo	Tiempo de iteración de proceso de simulación
	aComp0	Composición inicial	Matriz 5x1 con la composición inicial
	dMe	Masa evaporada	Masa de agua evaporada actual
	dM	Masa actual	Masa de líquido actual
	M0	Masa inicial	Masa de líquido en el instante 0 s.
Salidas	xComp	Composición actual	Matriz 5x1 con la composición actual

Realizado por: PATIÑO T.; VILLACÍS M., 2015.



**Figura 3-2:** Bloque función cComp.  
Realizado por: PATIÑO T.; VILLACÍS M., 2015.

### Código implementado

```

1 function xComp = cComp(t, aComp0, dMe, dM, M0)
2     %#codegen
3     % aComp0[0] -> Fracción en peso proteína
4     % aComp0[1] -> Fracción en peso grasa
5     % aComp0[2] -> Fracción en peso carbohidratos
6     % aComp0[3] -> Fracción en peso fibra
7     % aComp0[4] -> Fracción en peso cenizas
8     % aComp0[5] -> Fracción en peso agua
9
10    a = zeros(1,6);
11    a(1) = aComp0(1);    % Proteína
12    a(2) = aComp0(2);    % Grasa
13    a(3) = aComp0(3);    % Carbohidratos
14    a(4) = aComp0(4);    % Fibra
15    a(5) = aComp0(5);    % Cenizas

```

```

16     a(6) = aComp0(6);    % Agua
17
18     xP = ((M0*a(1))/dM);
19     xL = ((M0*a(2))/dM);
20     xC = ((M0*a(3))/dM);
21     xF = ((M0*a(4))/dM);
22     xCz = ((M0*a(5))/dM);
23     xW = (((M0*a(6))-dMe)/dM);
24     xComp = [xP, xL, xC, xF, xCz, xW];

```

En la línea de código 1, se define la función que representa el cálculo de la composición del concentrado. Para esto se usa el comando *function*, de manera similar a las funciones anteriores. El nombre de la variable de salida es *xComp*, y representa un vector o matriz con los valores de la fracción en peso que representan los componentes (*proteínas, grasa, fibra, cenizas, carbohidratos*). El nombre asignado a la función es *cComp*, y las variables de entrada son: *t* – tiempo de simulación, *aComp0* – vector con la composición inicial, *dMe* – Masa evaporada/tiempo, *dM* – Masa de líquido actual, *M0* – Masa de líquido inicial. Desde la línea 2 hasta la 8, corresponden a los comentarios sobre cómo está compuesto el vector de entrada de composición *aComp0*. Desde la línea 10 hasta 16, se asigna una matriz *a*, en el que se reasignan los valores del vector de entrada *aComp0*. Desde la línea 18 hasta la 23, se calcula la composición para cada uno de los componentes. Finalmente en la línea 24 se asigna a *xComp* como la expresión de un vector con todas las fracciones calculadas.

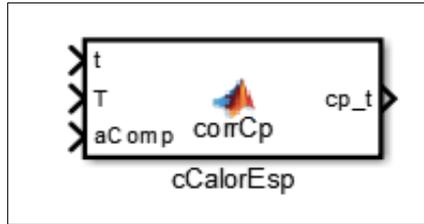
#### 2.5.1.4 Implementación de ecuación de cálculo de capacidad calorífica del concentrado.

Entre las propiedades que son importantes tomar en cuenta dentro de un proceso de evaporación de alimentos, se encuentra la capacidad calorífica o calor específico. Que es la cantidad de calor necesario para incrementar la temperatura de una determinada cantidad de masa de sustancia en 1 grado, según la escala de temperatura que se utilice. El calor específico cambia en razón de la composición de la solución o mezcla líquida, y la temperatura. Es por esto que haciendo uso del sistema de ecuaciones 13 y la ecuación sumatoria 14, se puede aproximar este valor para alimentos.

**Tabla 16-2:** Tabla de entradas y salidas del bloque función corrCp.

E/S	Variable	Nombre	Descripción
Entradas	T	tiempo	Tiempo de iteración de proceso de simulación
	aComp	Composición actual	Matiz 5x1 con la composición del fluido
	T	Temperatura del liquido	Temperatura actual del concentrado
Salidas	cp_t	Cap. Calorífica actual	Cap. Calorífica en función de la composición

Realizado por: PATIÑO T.; VILLACÍS M., 2015.



**Figura 4-2:** Bloque función *corrCp*.  
Realizado por: PATIÑO T.; VILLACÍS M., 2015.

### Código implementado

```

1 function cp_t = corrCp(t, T, aComp)
2     %#codegen
3     % Los parámetros deben tener las siguientes unidades:
4     % T : Temperatura [degC]
5     % aComp : Matriz de Composición [fracción peso/1]
6     % cp_total : Capacidad Calorífica [kJ/kg degC]
7
8     const1 = [2.0082, 1.2089e-3, -1.3129e-6];
9     const2 = [1.9842, 1.4733e-3, -4.8008e-6];
10    const3 = [1.5488, 1.9625e-3, -5.9399e-6];
11    const4 = [1.8459, 1.9306e-3, -4.6509e-6];
12    const5 = [1.0926, 1.8896e-3, -3.6817e-6];
13    const6 = [4.1762, 9.0862e-5, -5.4731e-6];
14    aTemp = T.^(0:2);
15
16    cp1 = sum(const1.*aTemp);
17    cp2 = sum(const2.*aTemp);
18    cp3 = sum(const3.*aTemp);
19    cp4 = sum(const4.*aTemp);
20    cp5 = sum(const5.*aTemp);
21    cp6 = sum(const6.*aTemp);
22
23    cps = [cp1, cp2, cp3, cp4, cp5, cp6];
24
25    cp_t = sum(cps.*aComp);

```

En la línea 1, se define la función con el nombre *corrCp*, y se asigna nombres a la variable de salida *cp\_t* y las variables de entrada (*t*, *T*, *aComp*). Desde la línea 2 hasta 6, son comentarios referentes a la función. Desde la línea 8 hasta 13, se asigna a vectores los coeficientes del sistema de ecuaciones 13, esto se hace para poder aplicar cálculo matricial. En la línea 14, se crea un vector con los valores de la temperatura (*T*), elevados a la (0, 1, 2) potencia. Desde la línea 16 hasta 21, se aplica la suma del producto vectorial, que resulta de multiplicar las filas del vector *aTemp* por las filas de los vectores: *const1*, *const2*, etc., para obtener el vector *cp1*, *cp2*,..., respectivamente. En la línea 23, se asigna al vector *cps* todos los valores de *cp* calculados. Finalmente en la línea 25, se realiza el producto vectorial entre *cps* y *aComp*, que equivale a multiplicar el calor específico aportado por cada componente por su respectiva fracción en peso en el concentrado.

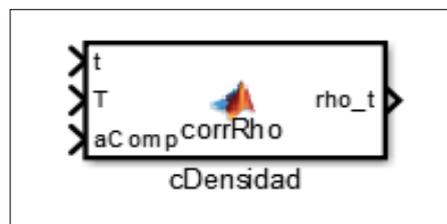
### 2.5.1.5 Implementación de ecuación de cálculo de densidad de concentrado

La densidad es otra propiedad que se toma en cuenta en el proceso de evaporación, esta permite aproximar de mejor manera el volumen existente de concentrado. Para el caso de alimentos se emplea el sistema de ecuaciones 17 y la ecuación sumatoria 18. Estas ecuaciones permiten aproximar la densidad en función de la composición y la temperatura de la solución o mezcla líquida. Estas ecuaciones fueron implementadas para el bloque MATLAB Function de Simulink, a continuación se presenta una tabla con las entradas y salidas, así como el código implementado.

**Tabla 17-2:** Tabla de entradas y salidas del bloque función corrRho.

E/S	Variable	Nombre	Descripción
Entradas	T	tiempo	Tiempo de iteración de proceso de simulación
	aComp	Composición actual	Matiz 5x1 con la composición del fluido
	T	Temperatura del liquido	Temperatura actual del concentrado
Salidas	rho_t	Densidad actual	Densidad en función de la composición

Realizado por: PATIÑO T.; VILLACÍS M., 2015.



**Figura 5-2:** Bloque función corrRho.  
Realizado por: PATIÑO T.; VILLACÍS M., 2015.

### Código implementado

```

1 function rho_t = corrRho(t, T, aComp)
2 %#codegen
3     % T: Temperatura [degC]
4     % rho_total: Densidad [kg/m^3]
5
6     const1 = [1330.0, -0.5184000, 0];
7     const2 = [925.59, -0.4175700, 0];
8     const3 = [1559.1, -0.3104600, 0];
9     const4 = [1311.5, -0.3658900, 0];
10    const5 = [2423.8, -0.2806300, 0];
11    const6 = [997.18, 0.0031439, -0.0037574];
12    aTemp = T.^(0:2);
13
14    rho1 = sum(const1.*aTemp);
15    rho2 = sum(const2.*aTemp);
16    rho3 = sum(const3.*aTemp);
17    rho4 = sum(const4.*aTemp);
18    rho5 = sum(const5.*aTemp);
19    rho6 = sum(const6.*aTemp);

```

```

20
21     rhos = [rho1, rho2, rho3, rho4, rho5, rho6];
22
23     rho_t = sum(rhos.*aComp);

```

En la línea 1 del código, se define la función de la misma manera que en los anteriores bloques, el nombre de la función es: *corrRho*, la variable de salida: *rho\_t* y las variables de entrada son: *t*, *T*, *aComp*. En la línea 2, se escribe la misma directiva de corrección al compilador. Desde la línea 6 hasta 11, se asignan a varios vectores, los coeficientes de las ecuaciones del sistema de ecuaciones 19. En la línea 12, se realiza la operación vectorial de potencia y se obtiene como resultado, un vector con la temperatura (*T*) elevada a las potencias (0, 1, 2). Desde la línea 14 hasta 19, se realiza la suma del producto vectorial de los vectores: *const1*, *const2*, *const3*,..., con el vector *aTemp*. Los resultados son guardados en el vector *rhos*, como se observa en la línea 21. Finalmente en la línea 23, se realiza la suma del producto vectorial entre *rhos* y *aComp*. Esto permite obtener la densidad actual en función de la composición y la temperatura actualizada del proceso de simulación.

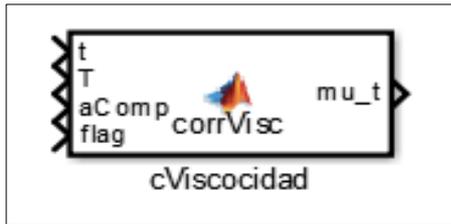
#### 2.5.1.6 Implementación de ecuación de cálculo de viscosidad dinámica del concentrado

Es necesario para poder determinar si la capacidad del motor puede ejercer la fuerza cortante para poder desplazar el fluido, mediante el agitador. Para ello es necesario conocer la viscosidad del concentrado. Como es de esperarse esta propiedad varía con la concentración y la temperatura, por ello que usando el sistema de ecuaciones 19 y la ecuación sumatoria 20, se puede aproximar la viscosidad dinámica en función de la concentración de los sólidos totales y la temperatura.

**Tabla 18-2:** Tabla de entradas y salidas del bloque función *corrVisc*.

E/S	Variable	Nombre	Descripción
Entradas	T	tiempo	Tiempo de iteración de proceso de simulación
	aComp	Composición actual	Matriz 5x1 con la composición actual
	T	Temperatura del liquido	Temperatura actual del concentrado
	flag	Marcador de método	Elige que método de cálculo a aplicar
Salidas	mu_t	Viscosidad actual	Viscosidad en función de la composición

Realizado por: PATIÑO T.; VILLACÍS M., 2015.



**Figura 6-2:** Bloque función corrVisc.  
Realizado por: PATIÑO T.; VILLACÍS M., 2015.

### Código implementado

```

1 function mu_t = corrVisc(t, T, aComp, flag)
2 %#codegen
3     % T: Temperatura [degC]
4     % rho_total: Densidad [kg/m^3]
5
6     % Funciones de correlación de viscosidad de la leche
7     % T (Temperatura) [C]
8     % aComp[0] -> Fracción en peso proteína
9     % aComp[1] -> Fracción en peso grasa
10    % aComp[2] -> Fracción en peso carbohidratos
11    % aComp[3] -> Fracción en peso fibra
12    % aComp[4] -> Fracción en peso cenizas
13    % aComp[5] -> Fracción en peso agua
14
15    if all(flag == 0);
16        % Aproximación a la viscosidad del agua
17        % T (Temperatura) [C]
18        mu_t = (2.553 * exp(-(T/60.68))) + (1.041 * exp(-
19 (T/155.7)));
20
21    else
22        % Método-leche por sólidos totales y temperatura
23        sumComp = sum(aComp(:,1:5));
24
25        sumComp = sumComp * 100;
26
27        const1 = [0.249 -1.3e-2 5.2e-5];
28        const2 = [2.549e-2 -9.8e-5 4e-7];
29        const3 = [5.43e-4 -1.39e-5 1.117e-7];
30        aTemp = T.^(0:2);
31        aSumComp = sumComp.^(0:2);
32
33        mu1 = sum(const1.*aTemp);
34        mu2 = sum(const2.*aTemp);
35        mu3 = sum(const3.*aTemp);
36
37        mus = [mu1 mu2 mu3];
38
39        logmu = sum(mus.*aSumComp);
40
41        mu_t = power(10, logmu);
42    end

```

En la línea 1, se define la función, sus variables de entrada y salida. La diferencia con otras funciones es la aparición de una variable *flag* o marcador. Esta variable sirve para escoger o configurar de alguna manera la forma de cálculo, en este caso permite seleccionar, entre los métodos de cálculo de la viscosidad que se pueden aplicar. La línea 2, es la directiva al compilador. Desde la línea 3 hasta 13, son comentarios con información referente a la función. Desde la línea 15 hasta la 42, comprende una estructura lógica *if*, que permite seleccionar según la variable *flag*, el método de correlación de la viscosidad. Si *flag* es 0, se aplica el método que aproxima la viscosidad del agua, esto es aplicable para alimentos muy diluidos. Si *flag* es diferente de 0, se aplica el método de correlación de viscosidad de la leche mostrado en la sección de ecuaciones, este método es aplicable para leche y usa la concentración de sólidos totales y la temperatura. La variable de salida *mu\_t* corresponde a la viscosidad del líquido según las características del mismo.

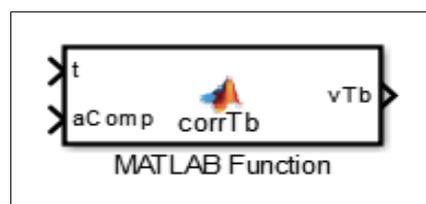
### 2.5.1.7 Implementación de ecuación de correlación de aumento ebulloscópico

La temperatura de ebullición de una solución o mezcla de componentes químicos depende es de su composición, en el caso de alimentos concentrados, durante el proceso de evaporación la disminución de la cantidad de agua genera un aumento de la temperatura de ebullición. Existen muchas correlaciones empíricas para aproximar el incremento ebulloscópico, pero para alimentos aplicaremos la ecuación 45-a y 45-b. Para ello se ha implementado usando un bloque MATLAB Function. A continuación se presenta la tabla de entrada y salidas del bloque, así como el código implementado para su funcionamiento.

**Tabla 19-2:** Tabla de entradas y salidas del bloque función corrTb.

E/S	Variable	Nombre	Descripción
Entradas	T	tiempo	Tiempo de iteración de proceso de simulación
	aComp	Composición actual	Matiz 5x1 con la composición del fluido
	rho	Densidad actual	Temperatura actual del concentrado
Salidas	vTb	Var. Temp. Ebullición	Var. Tb en función de la composición

Realizado por: PATIÑO T.; VILLACÍS M., 2015.



**Figura 7-2:** Bloque función corrTb.

Realizado por: PATIÑO T.; VILLACÍS M., 2015.

## Código implementado

```
1 function vTb = corrTb(t, aComp)
2 %#codegen
3 % Fracción de sólidos totales y temperatura
4 sumComp = sum(aComp(:,1:5));
5
6 vTb = 0.33*exp(4*sumComp);
```

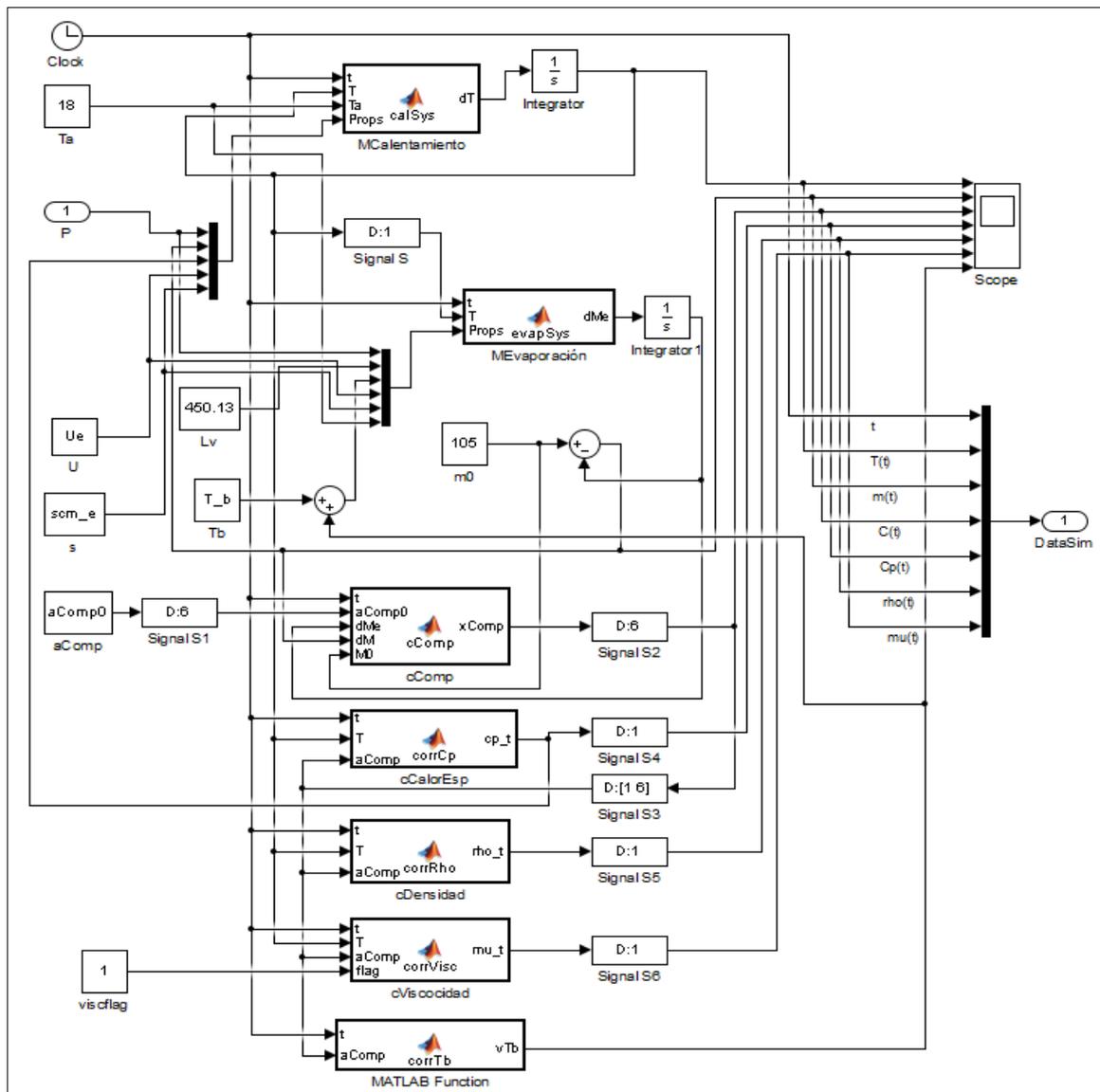
En la línea 1, se define la *función*: *corrTb*, variables de entrada y salida. En la línea 2, se ingresa la directiva al compilador para corregir errores en la generación de código. En la línea 4, se obtiene la fracción de sólidos totales, por suma de los valores del vector *aComp*. Finalmente en la línea 6, se aplica la ecuación 45-a para calcular el incremento de temperatura de ebullición.

### 2.5.1.8 Conexión de bloques de modelo de evaporación

Para completar el modelo del proceso de evaporación es necesario recopilar toda la información necesaria para poder utilizarlos en MATLAB. En las tablas 2-2, 3-2, 4-2, 5-2, 6-2, se puede encontrar toda la información necesaria para el cálculo.

Como es los bloques antes mencionados tienen variables de entradas comunes y en algunos casos las variables de salida de unos son las entradas de otros. Es necesario conectarlos dentro del entorno Simulink, para de esta manera poder realizar la validación del modelo matemático. Una vez terminado la conexión de los bloques e resultado se puede observar en la figura 8-2.

En la figura 8-2, se puede observar el diagrama de bloques completo, para el modelo de evaporación. Se puede observar que aparte de los bloques de funciones anteriormente descritos, un grupo de bloques constantes, donde se asignan los valores constantes desde el *workspace* de MATLAB, valores para constantes como: *Ue*, *scm\_e*, *aComp0*, *viscflag*, *T\_b*, son declaradas. Otros bloques que están en el diagrama son los de operaciones de suma y los bloques integradores. Los bloques integradores aplican el método más idóneo para la resolución de las ecuaciones diferenciales que representan los bloques: *MCalentamiento* y *MEvaporación*. Además de un bloque de entrada *P*, y el bloque de salida *DataSim*, que devuelve un vector con todos los resultados de las operaciones de simulación. La variable de entrada que requiere el modelo matemático es la potencia térmica generada por el serpentín. Para la validación del modelo matemático sin el sistema de control, se supondrá una potencia en base a la tasa teórica de flujo de vapor y las condiciones medias del vapor proveniente de caldera.



**Figura 8-2:** Diagrama de bloques para modelo matemático de evaporación, subsistema *MCEvaporador*.

Realizado por: PATIÑO T.; VILLACÍS M., 2015.

### 2.5.2 Implementación modelo matemático del PLC (Programmable Logic Controller)

Un PLC, es un controlador que funciona en base a comparaciones o condicionamientos para el procesamiento de las señales de entrada y la emisión de las señales de salida. Es por eso, que en Simulink/Matlab, se usó un bloque que permitía la construcción de un modelo matemático para un sistema de control en base a espacios de estado. Esto quiere decir, que en tiempo real se puede simular las respuestas que tendría un PLC. Como las funciones que cumplirá el PLC en el proceso real son varias, entre las cuales existen algunas que se podrían considerar subsidiarias o secundarias, y poco intervinientes en los fenómenos físico químicos del proceso de evaporación. Se construyó el modelo del PLC con las funciones de control de: apertura y cierre de válvulas de control, y encendido/apagado de la bomba y el motor eléctrico.

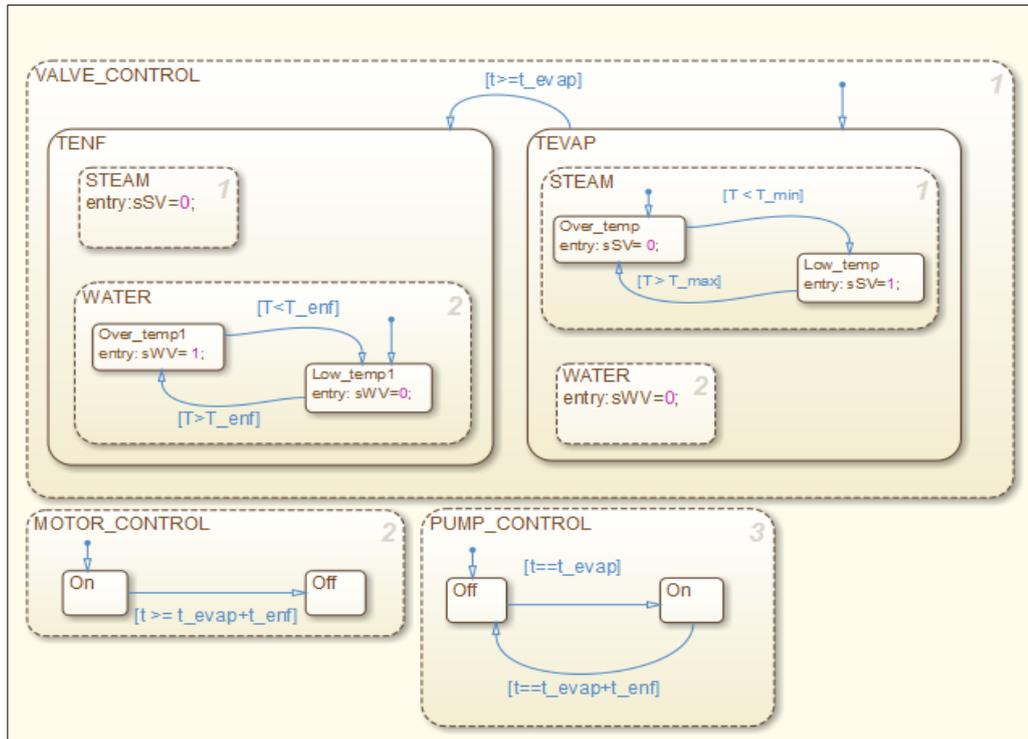
Para poder construir el modelo del PLC, se deben definir las acciones realizadas por el mismo. La primera función es el control de temperatura, usando valores de temperatura que servirán como puntos de consigna. Dadas las características buscadas para el control de temperatura, no se usará un ajuste PID, sino que se buscará que oscilen entre una temperatura máxima  $T_{max}$  y una temperatura mínima  $T_{min}$ . Siendo el intervalo entre estas temperaturas, muy pequeño. Para poder controlar la temperatura del proceso se debe determinar cuándo se deben abrir o cerrar las válvulas de vapor y agua. Para poder abrir o cerrar las válvulas el PLC debe emitir señales direccionadas a las válvulas, estas señales en el modelo matemático llevan los nombres de sSV para la válvula de vapor y para las válvulas de agua sWV, estas señales son de tipo binario.

Otra función que debe cumplir el PLC, es el control del funcionamiento del agitador del evaporador, en este caso se debe controlar el flujo de corriente eléctrica hacia el motor eléctrico que acciona el agitador. Esta función solo controlaría el encendido o apagado del motor en función del tiempo total del proceso, que es el resultado de la suma del tiempo de evaporación  $t_{evap}$  y el tiempo de enfriamiento  $t_{enf}$ .

La última función es el control del encendido o apagado de la bomba de agua, esta solo se debe encender una vez terminado el proceso de evaporación, y funcionar hasta cumplir el tiempo de enfriamiento.

#### 2.5.2.1 Descripción del modelo matemático del PLC.

En la figura 9-2, se muestra el diagrama de bloques dentro del entorno StateFlow de Simulink, en él, se plantearon 3 funciones o estados principales los cuales se ejecutan simultáneamente, los estados fueron nombrados como: *VALVE\_CONTROL*, *MOTOR\_CONTROL* y *PUMP\_CONTROL*, estos estados se ejecutan directamente al inicio del proceso de simulación. Dentro del estado *VALVE\_CONTROL*, se dispuso dos estados, los cuales se relacionan con el tiempo asignado para el proceso de evaporación, los estados representan las etapas de: evaporación *TEVAP* y enfriamiento *TENF*. Para que ocurra la transición de *TEVAP* a *TENF*, se debe cumplir la condición  $[t \geq t_{evap}]$ , es decir, si el tiempo de simulación  $t$  es igual o mayor al tiempo asignado para el proceso de evaporación  $t_{evap}$ .



**Figura 9-2:** Diagrama de bloques State Flow, modelo lógico que representa al PLC.  
 Realizado por: PATIÑO T.; VILLACÍS M., 2015.

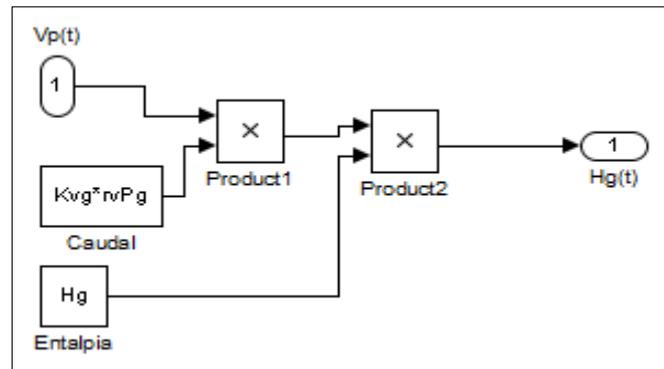
Una vez inicializado el bloque *VALVE\_CONTROL*, el siguiente bloque en iniciarse es el *TEVAP*, y a su vez dentro de este se ejecutan dos estados *STEAM* y *WATER*. Estos estados envían una señal para el control de las válvulas de agua y vapor. El valor de la señal para la válvula de vapor depende de la temperatura enviada por el sensor desde el proceso, si supera la temperatura máxima asignada  $T_{max}$ , la señal es  $sSV = 0$  (cierra la válvula). Si la temperatura del proceso está bajo la temperatura mínima  $T_{min}$ , la señal es  $sSV = 1$  (abre la válvula).

Cuando el tiempo de simulación  $t$  supera el tiempo estimado para la etapa de evaporación *TEVAP*, hay un cambio de estado hacia la etapa de enfriado *TENF*. En este estado se cierra la válvula de vapor, enviándole una señal  $sSV=0$ . En el caso de la señal de la válvula de agua esta depende del valor de la temperatura del proceso  $T$  en relación a la temperatura de enfriado  $T_{enf}$ . Si la temperatura  $T$  es mayor que la temperatura  $T_{enf}$ , la señal emitida hacia la válvula de agua es  $sWV=1$  (válvula abierta); si esto no se cumple la señal es  $sWV=0$  (válvula cerrada).

En el estado *MOTOR\_CONTROL*, el motor eléctrico se enciende una vez iniciado el proceso de simulación y termina una vez cumplido el tiempo total del proceso. Lo mismo para el estado *PUMP\_CONTROL*, con la diferencia de que la bomba se enciende una vez terminada la etapa de evaporación.

### 2.5.3 Implementación de modelo matemático de las válvulas de control

Para construir el modelo matemático de las válvulas de control se usa la ecuación 48, y se la implementa como un subsistema de Simulink, para mayor facilidad se ha decidido que del bloque que representa las válvulas se obtenga como resultado directamente la potencia suministrada o absorbida del proceso de evaporación. Se estimaron a las válvulas como sistemas adiabáticos y las propiedades de los suministros de vapor y agua con propiedades constantes en el tiempo.

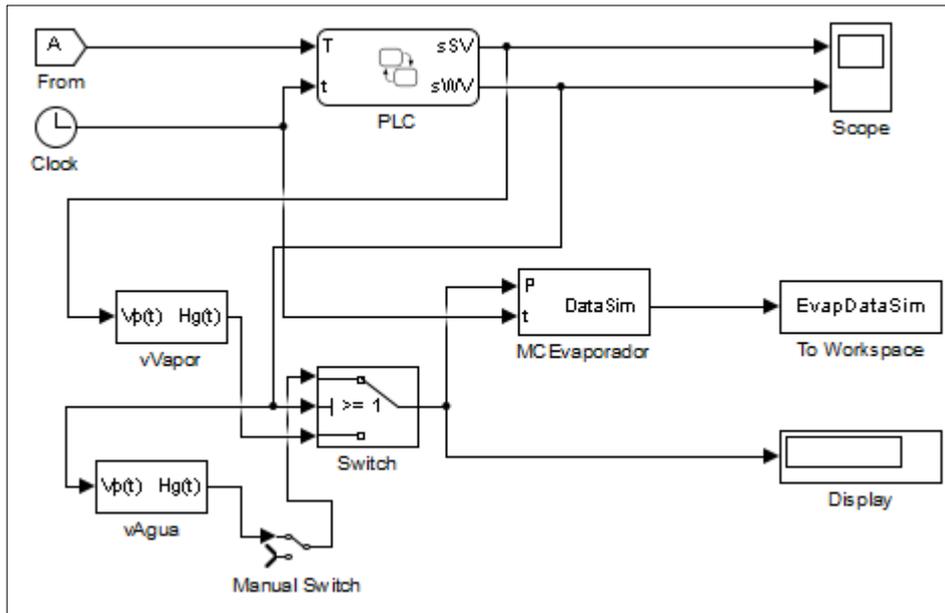


**Figura 10-2:** Diagrama de bloques, modelo de válvulas.  
Realizado por: PATIÑO T.; VILLACÍS M., 2015.

### 2.5.4 Conexión de modelos matemáticos para simulación de sistema de control.

Una vez terminados todos los modelos intervinientes en la simulación, estos se deben conectar de tal manera que se pueda correr la simulación sin ningún problema. El diagrama completo del sistema de control se muestra en la figura 11-2. Se puede diferenciar en la figura, el bloque que representa el modelo del PLC, es un bloque StateFlow, con dos entradas el tiempo de simulación y la temperatura proveniente del proceso *MCEvaporador*. *MCEvaporador* ya fue descrito anteriormente, las entradas de este bloque son la potencia suministrada desde el serpentín y el tiempo de simulación. Para los bloques de las válvulas se ingresa desde el PLC la señal binaria de apertura o cierre de las válvulas  $Vp(t)$ . Se ha colocado un switch manual a la salida del bloque *vAgua*, que es la válvula de agua la entrada. Solo se ha colocado la válvula de entrada, porque las dos válvulas que se instalaron, se abren de manera simultánea.

Para poder comunicar al bloque de proceso *MCEvaporador* la potencia correspondiente a cada etapa del proceso, potencia positiva cuando se calienta y potencia negativa cuando se enfría, se usó un bloque de Switch con un variable de referencia que es la señal del PLC, que indica la apertura de la válvula de agua.



**Figura 11-2:** Diagrama de bloques, para proceso de evaporación automatizado.  
Realizado por: PATIÑO T.; VILLACÍS M., 2015.

## 2.6 Determinación de coeficientes de transferencia de calor para el equipo de evaporación

Como las ecuaciones del modelo matemático del proceso de evaporación requieren el coeficiente de transferencia de calor para el proceso, se debe determinar esta propiedad en base a condiciones normales ambientales y de proceso. Para el cálculo de estos coeficientes se hizo uso de las ecuaciones presentadas en la parte teórica sobre cálculos de transferencia de calor. En la figura 12-2, se describe el diagrama de resistencias térmicas para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor. Para poder resolver el conjunto de ecuaciones para el cálculo del coeficiente global de transferencia de calor, se hicieron algunas simplificaciones y presunciones. En la tabla 14-2, se muestran las simplificaciones y presunciones realizadas.

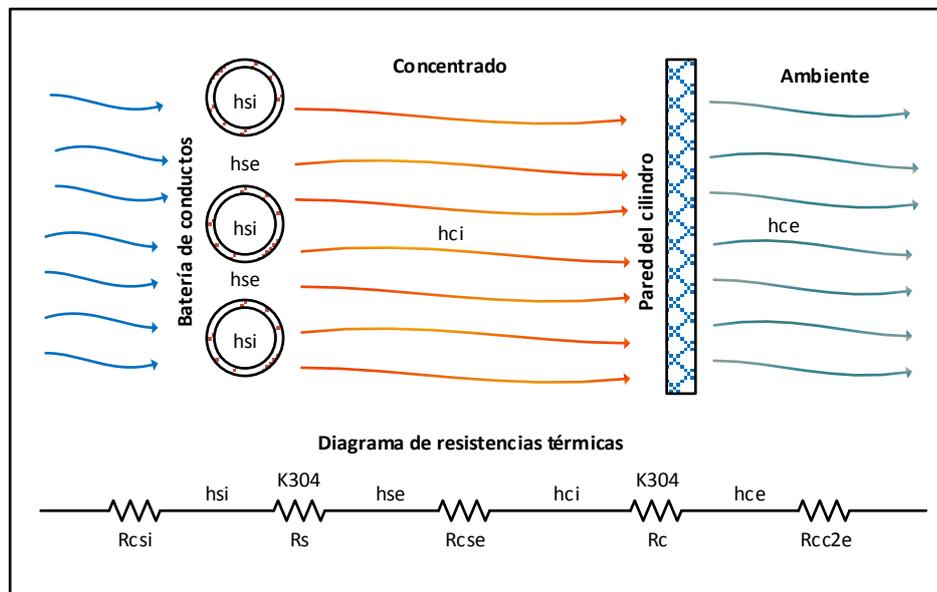
**Tabla 20-2:** Tabla de simplificaciones para resolución de transferencia de calor.

Ubicación	Simplificación	Descripción
Flujo de vapor	Propiedades constantes	Las propiedades del vapor como calor específico, viscosidad, conductividad térmica del vapor no cambian en el tiempo.
	Tasa de flujo estacionaria	Se atribuye como si la caída de presión no altera el flujo de vapor de entrada.
	Condensación completa del fluido	Todo el vapor que entra en el serpentín se condensa
Serpentín	Batería de tubos	Se describe al serpentín como una batería de 5 tubos, con las mismas dimensiones. Siendo la suma de la longitud de los 5 tubos igual a la longitud del serpentín.

<b>Cilindro</b>	Pared plana	Se toma a la superficie del cilindro, por su tamaño como una superficie plana sobre la que se da transferencia de calor por convección.
<b>Convección en el concentrado</b>	Perfil de velocidad	Se atribuye como constante, el perfil de velocidad del fluido a concentrarse generado por el agitador. La velocidad calculada por simulación es de 0,05 m/s, en la entrada y salida de la batería de tubos.

Realizado por: PATIÑO T.; VILLACÍS M., 2015.

Para calcular el coeficiente global de transferencia de calor se hizo uso de un script de MATLAB, mas la programación de las funciones necesarias para realizar todos los cálculos y toma de decisiones sobre las correlaciones idoneas.



**Figura 12-2:** Diagrama de resistencia térmica del evaporador con serpentín.

Realizado por: PATIÑO T.; VILLACÍS M., 2015.

En la figura 12-2, se representan las simplificaciones que se realizaron para resolver el sistema complejo de ecuaciones que se obtendría del proceso, de no tomarse al serpentín como un sistema de conductos, linealizar el flujo de evaporado hasta chocar con la pared del cilindro, tomar al cilindro como una pared plana y determinar como constantes y homogéneas las propiedades de todos los fluidos y materiales intervinientes. La secuencia de resistencias se calcularon usando MATLAB.

### 2.6.1 Programación de script de MATLAB para el cálculo del coeficiente global de transferencia de calor.

La decisión de usar un script de MATLAB para realizar los cálculos, fue tomada por la facilidad que presta, a la modificación de las variables intervinientes en el cálculo, la programación de funciones y la generación de gráficas. A continuación se presenta el script usado para realizar el cálculo.

#### Código implementado – Perdidas.m

```
1  % CÁLCULOS DE PERDIDAS DE CALOR
2
3  % Serpentin
4  des = 0.02667;      % Diámetro externo serpentín [m]
5  dis = 0.02093;      % Diámetro interno serpentín [m]
6  Lhs = 6.67880;      % Longitud de tubo serp. [m]
7  svs = 0.03312;      % Separación de tubos [m]
8  es = 0.0030;        % Espesor de tubo [m]
9  nvs = 5;            % Numero de tubos batería
10 sis = pi*dis*Lhs;   % Superficie interna serp. [m^2]
11 ses = pi*des*Lhs;   % Superficie externa serp. [m^2]
12
13 % Cilindro
14 dcm = 0.50000;      % Diámetro de cilindro evaporador [m]
15 hcm = 0.63300;      % Altura efectiva del cilindro evap [m]
16 ecm = 0.00300;      % Espesor de chapa del cilindro evap [m]
17 scm_i = hcm*(dcm-2*ecm)+(pi*power(dcm-2*ecm,2)/4); % Superficie
18 itC [m^2]
19 scm_e = hcm*dcm+pi*(power(dcm,2)/4); % Superficie etC [m^2]
20
21 % PROPIEDADES DE MATERIALES
22 % Acero inoxidable AISI 304 Cr[18-20] Ni[8.0-10.5]
23 Cp304 = 0.5000;      % Calor específico (0-100 *C) [J/g K]
24 K304 = [15.2 21.5]; % Conductividad térmica 500 *C [W/m K]
25 rho304 = 8000.00;    % Densidad [kg/m^3]
26
27 % VAPOR SATURADO
28 % El vapor - presión media de 45 psi y 114.50 Celsius
29 Hg = 2731.74273;     % Entalpía de vapor sobrecalentado [kJ/kg]
30 rhog = 0.562369312; % Densidad vapor a Tmg [kg/m3]
31 Cpg = 1890.7999/1000;% Capacidad calorífica vapor a Tmg [J/kg K]
32 kg = 0.025450431;    % Conductividad térmica a Tmg[W/m K]
33 alpg = 2.35975e-05;  % Difusividad térmica vapor a Tmg [m2/s]
34 mug = 1.31966e-05;  % Viscosidad dinámica del vapor a Tmg [kg/m
35 s]
36 visg = 2.31456e-05; % Viscosidad cinemática del vapor a Tmg
37 [m2/s]
38 Nprg = 0.97966778;   % Número de Prandlt del vapor a Tmg [ND]
39 Tg1 = 137.23;        % Temperatura de entrada de vapor [degC]
40 Tg2 = 92.00;         % Temperatura de salida de vapor [degC]
41 Hv1 = 2217.85;      % Entalpía de vaporización [kJ/kg]
42
43 % AGUA SATURADA
44 % El agua a 83,502 Celsius
45 rhof1 = 969.2085;    % Densidad agua [Kg/m3]
```

```

46 rhofg = 0.33559;           % Densidad vapor [Kg/m3]
47 hfgf = 2299.8948;         % Entalpía de vaporización [kJ/kg]
48 Cpfl = 4202.2016/1000;    % Capacidad calorífica agua [J/kg K]
49 Cpfg = 1972.506/1000;     % Capacidad calorífica vapor [J/kg K]
50 kfl = 0.67210;           % Conductividad térmica agua [W/m K]
51 kfg = 0.02335;           % Conductividad térmica vapor [W/m K]
52 mufl = 0.339591e-3;      % Viscosidad dinámica agua [kg/m s]
53 muvg = 1.170906e-5;      % Viscosidad dinámica vapor [kg/ m s]
54 Nprfl = 2.1219;          % Número de Prandlt agua [ND]
55 Nprfg = 1.00;            % Número de Prandlt vapor [ND]
56 Betaf = 0.664906e-3;     % Coeficiente de expansión térmica [1/K]
57
58 % Propiedades a Ts2s
59 Nprfl1 = 1.26493;        % Numero de Prandlt agua
60 Nprfg1 = 1.01723;       % Numero de Prandlt vapor
61
62 %Intercambio 1 - Flujo Interno en el serpentín
63 Mg = 8.58194e-3;         % Flujo másico de vapor [Kg/s]
64 Qg = Mg/rhog;           % Caudal de vapor [m3/h]
65 vg = (4*Qg/(pi*power(dis,2))); % Velocidad de vapor [m/s]
66 Nreg = (vg*dis*rhog)/(mug); % Número de Reynolds vapor [ND]
67 Nug = NusseltCorrFICC(Nreg, Nprg, 'ficc'); % Número de Nusselt
68 vapor [ND]
69 hg = (Nug*kg)/dis;       % Coeficiente de convección [W/m2 K]
70 Tmg = (Tg1 + Tg2)/2;    % Temperatura media vapor [degC]
71 qg = Mg*Cpg*(Tg2-Tg1); % Calor perdido condensación [kJ/s]
72 Ts1s = TsAproxConvection(Mg, Cpg, hg, sis, Tg1, Tg2); %
73 Temperatura superficie interna [degC]
74
75 % Intercambio 2 - Conducción a través del tubo serpentín
76 Rs1 = (log(des/dis)/(2*pi*Lhs*K304(2))); % Resistencia serpentín
77 [degC/W]
78 Ts2s = Ts1s-abs(qg)*Rs1; % Temp. sup. ext. serp. [degC]
79
80 % Intercambio 3 - Flujo Externo sobre serpentín (Batería de
81 conductos alineados)
82 % El perfil de velocidad se obtuvo bajo simulación en COMSOL
83 Multiphysics para 24 rpm del agitador y agua a 24 Celsius
84 % Datos experimentales
85 Tfer = 83.50;            % Temperatura medida del fluido
86 Tfir = 25.00;
87
88 Mf = -qg/(Cpfl*(Tfer-Tfir)); % Flujo másico atreves de los tubos
89 [kg/s]
90 vmf = Mf/(rhofl*(Lhs*svs)); % Velocidad de entrada [m/s]
91 % Cálculos
92 Vmaxf = (svs/(svs-des))*vmf; % Velocidad max flujo entre tubos
93 [m/s]
94 Qmaxf = ((Lhs*svs)*Vmaxf); % Caudal máximo entre tubos [m3/s]
95 Mmaxf = Qmaxf/rhofl;     % Flujo másico entre tubos [kg/s]
96 Nrefl = (rhofl*Vmaxf*des)/mufl; % Número de Reynolds fluido
97 Nuf1 = NusseltCorrFECC(Nrefl, Nprfl, {'fecc', 'alin', 1, Nprfl1});
98
99 % Numero de Nusselt
100 hf1 = (Nuf1*kfl)/des;    % Coeficiente de convección [W/m2 K]
101 Tfet = TeAproxConvection(Mf, Cpfl, hf1, ses, Tfir, Ts2s);
102
103 qperfl = Mf*Cpfl*(Tfet-Tfer); % Calor perdido evaporación [kJ/s]
104 Mevapfl = qperfl/hfgf;    % Masa Evaporada [kg/s]
105 Ef = abs(qperfl/qg)*100; % Eficiencia en transferencia de calor
106

```

```

107 % Intercambio 4 - Convección pared cilindro
108 Tfer2 = 82.00;
109 Nref2 = (rho_f1*vmf*(pi*dcm))/mu_f1;
110 Nuf2 = NusseltCorrFPP(Nref2, Npr_f1);
111 hf2 = (Nuf2*k_f1)/(pi*dcm);
112 Ts1c = TsAproxConvection(Mf, Cp_f1, hf2, scm_i, Tfer, Tfer2);
113 qf2 = abs(qg)-qper_f1;
114
115 % Intercambio 5 - Conducción a través de la pared del cilindro
116 Rc1 = (ecm)/(K304(2)*scm_i); % Res. pared cil.
117 Ts2c = Ts1c-qf2*Rc1; % Temp. sup. ext. cil. [degC]
118
119 % Intercambio 6 - Convección cilindro - ambiente.
120 % Se estima convección natural con aire
121 Ta = 23.06; % Temperatura ambiente a 10cm de sup.cil.
122 hn_aire = 5; % Coeficiente de convección natural aire [W/m2 K]
123 qa = hn_aire*scm_e*(Ts2c-Ta); % Calor transferido ambiente
124
125 % CÁLCULO DE COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR
126 Rcv1 = 1/(hg*sis);
127 Rcv2 = 1/(hf1*ses);
128 Rcv3 = 1/(hf2*scm_i);
129 Rcv4 = 1/(hn_aire*scm_e);
130 Rt = Rcv1+Rs1+Rcv2+Rcv3+Rc1+Rcv4;
131 Ui = 1/(Rt*scm_i); % Cara interior del cilindro
132 Ue = 1/(Rt*scm_e); % Cara exterior del cilindro
133
134 % CÁLCULO DE PERDIDAS DE CALOR Y EFICIENCIA
135 qtPerdido = qper_f1+qa;
136 et1_equipo = abs((abs(qg)-qtPerdido)/qg)*100;
137 et2_equipo = abs((abs(qg)-qa)/qg)*100;
138

```

En este script de MATLAB, se definen las variables mostradas en las tablas de datos adicionales 2-2, 3-2, 4-2, 5-2 y 6-2 desde la línea 4 hasta la 60. Desde la línea 63 hasta 72, se realizan las operaciones respectivas para el primer proceso de intercambio de calor que es una convección forzada por flujo interno en un conducto cilíndrico. Desde la línea 76 hasta 78, se determina la temperatura de la superficie externa del tubo de serpentín, para ello se emplea la ecuación de transferencia por conducción en cilindros. Desde la línea 85 hasta 105 se resuelve las ecuaciones del proceso de convección forzada por flujo externo sobre baterías de tubos. Desde la línea 108 hasta 113, se realiza el cálculo del proceso de convección entre el concentrado y la pared del cilindro del evaporador, que se toma como una pared plana. Las líneas 116 y 117, determinan la temperatura de la superficie externa del cilindro, mediante la ecuación de conducción en capas planas. Desde la línea 122 hasta 124, se realiza los cálculos para convección natural entre la pared del cilindro y el aire ambiental. Finalmente desde la línea 126 hasta 137, se calculan el coeficiente global de transferencia de calor en función de la superficie interna y externa del cilindro del evaporador, se determina la cantidad de calor perdido al ambiente y la eficiencia térmica como intercambiador de calor y como evaporador.

## 2.6.2 Funciones programadas para cálculo de coeficiente global de transferencia de calor

### 2.6.2.1 Función para el cálculo del factor de fricción de Darcy.

El factor de fricción de Darcy, es un número adimensional que correlaciona el carácter de flujo de un fluido a través de un conducto y la rugosidad absoluta del material del que está fabricado el conducto. La correlación más aceptada para este factor es la de Coolebrook, con esta correlación se construye el diagrama de Moody. En este caso la ecuaciones de Coolebrook es explícita logarítmica, muy difícil de resolver por método analítico, para resolverla es necesario apelar a métodos numéricos. En este caso se emplea un método de linealización y se obtienen un método que aproxima en tres pasos, el valor del factor de fricción.

#### Código implementado – DarcyFF.m

```
1 function [ f ] = DarcyFF( e, diam, Re )
2
3 if Re < 2300; % Caso de flujo laminar o transición
4     f = 64/Re;
5 elseif Re >= 2300;
6     f = corrColebrook(e, diam, Re);
7 end
8
9 end
10
11 function [ f ] = corrColebrook( e, diam, Re)
12
13 K=(e/diam);
14 R = Re;
15 % Inicialización.
16 X1 = K .* R * 0.123968186335417556; % X1<-K*R*log(10)/18.574.
17 X2 = log(R) - 0.779397488455682028; % X2<-log(R*log(10)/5.02)
18 % Estimación inicial
19 F = X2 - 0.2;
20
21 % Primera iteración.
22 E = ( log(X1+F) - 0.2 ) ./ ( 1 + X1 + F );
23 F = F - (1+X1+F+0.5*E) .* E .* (X1+F) ./ (1+X1+F+E.*(1+E/3));
24
25 % Segunda iteración (exactitud moderada).
26 E = ( log(X1+F) + F - X2 ) ./ ( 1 + X1 + F );
27 F = F - (1+X1+F+0.5*E) .* E .* (X1+F) ./ (1+X1+F+E.*(1+E/3));
28
29 % Solución final.
30 F = 1.151292546497022842 ./ F; % F <- 0.5 * log(10) / F;
31 F = F .* F; % F <- Factor de fricción
32 f = F;
33 end
```

### 2.6.2.2 Función de correlación de número de Nusselt en convección forzada para flujo interno en conductos.

Para poder determinar el número de Nusselt, se debe conocer las características del flujo como: el carácter del flujo y varias propiedades a temperatura media como el número de Prandtl. En función de los números de Reynolds y Prandtl, se determina que correlación conviene aplicar, esto depende de la bibliografía porque existen muchos métodos de aproximación. En el siguiente script de MATLAB, se aplicó el algoritmo para calcular el número de Nusselt para flujo interno en conductos.

#### Código implementado – NusseltcorrFIC.m

```
1 function [ Nu ] = NusseltCorrFICC(Nre, Npr, flag)
2
3 if strcmp(flag, 'ficc') % Flujo interno cilindros circulares
4
5     if (Nre<= 2100 && Npr>0.6 && Npr < 50)
6         disp('Flujo Laminar');
7         Nu = 3.66;
8     elseif (Nre>2100 && Nre <= 10e5 && Npr>0.6 && Npr < 50)
9         disp('Flujo de transición');
10        % Correlación Pethukov f: 3000<Nre<5e6
11        f = power((0.79*log(Nre)-1.64), -2);
12        disp(f);
13        % Correlación de Gnielinski Nu: 0.5<Npr<2000;
14 2300<Nre<1e4
15        Nu = ((f/8)*(Nre-
16 1000)*Npr)/(1+12.7*power(f/8,0.5)*...
17            (power(Npr,2/3)-1));
18
19     elseif (Nre>10e5 && Nre<=10e7 && Npr<=500)
20         disp('Flujo Turbulento');
21         Nu = 0.12*(power(Nre,0.87)-280)*power(Npr,0.4);
22     else
23         disp('Flujo subre Turbulento')
24     end
25
26 elseif strcmp(flag, 'fecc') % Flujo externo sobre cilindros no
27 circulares
28     disp('No implementado')
29
30 end
```

### 2.6.2.3 Función de correlación de número de Nusselt en convección forzada para flujo externo en batería de conductos.

Para un sistema de conductos se calcula el número de Nusselt en función de la velocidad máxima del fluido, ajustando el valor con un factor de corrección, dependiente del número de columnas de tubos dispuestas de forma perpendicular al flujo externo. El siguiente script permite decidir cuál es la mejor ecuación de correlación, así como cuál es el factor de corrección correspondiente, en función del número de Reynolds, Prandtl y las condiciones de la batería de conductos.

#### Código implementado – NusseltcorrFECC.m

```
1 function [ Nu ] = NusseltCorrFECC( Nre, Npr, flag )
2 % Batería de tuberías
3 % flag es un Cell con las siguientes entradas
4 % flag{1}: Indicador de geometría de tuberías ['fecc', 'feco']
5 % flag{2}: Indicador de alineación de tub. ['alin', 'esca']
6 % flag{3}: Es el número de líneas de tub. [entero]
7 % flag{4}: Numero de Prandlt a Temp. superficie [ND]
8
9 if strcmp(flag{1}, 'fecc') % Tuberias circulares
10     if strcmp(flag{2}, 'alin') % T. Alineadas
11         if (Nre>=0 && Nre<100)
12             Nul = 0.9*power(Nre,0.4)*...
13                 power(Npr,0.36)*power(Npr/flag{4},0.25);
14         elseif (Nre>=100 && Nre<1000)
15             Nul = 0.52*power(Nre,0.5)*...
16                 power(Npr,0.36)*power(Npr/flag{4},0.25);
17         elseif (Nre>=1000 && Nre<2e5)
18             Nul = 0.52*power(Nre,0.63)*...
19                 power(Npr,0.36)*power(Npr/flag{4},0.25);
20         elseif (Nre>=2e5 && Nre<2e6)
21             Nul = 0.52*power(Nre,0.8)*...
22                 power(Npr,0.4)*power(Npr/flag{4},0.25);
23         end
24     elseif strcmp(flag{2}, 'esca') % T. Escalonadas
25         disp('No implementado')
26     end
27
28     if (flag{3} < 16)
29         if (flag{3} == 1)
30             Nu = Nul *0.7;
31         elseif (flag{3} == 2)
32             Nu = Nul * 0.8;
33         elseif (flag{3} == 3)
34             Nu = Nul*0.86;
35         elseif (flag{3} == 4)
36             Nu = Nul*0.90;
37         elseif (flag{3} == 5)
38             Nu = Nul*0.93;
39         elseif (flag{3} == 7)
40             Nu = Nul*0.96;
41         elseif (flag{3} == 10)
42             Nu = Nul*0.98;
43         elseif (flag{3} == 13)
44             Nu = Nul*0.99;
```

```

45     end
46     else
47         disp('No implementado')
48     end
49 elseif strcmp(flag{2}, 'feco') % Otras tuberías
50     disp('No implementado')
51 end

```

#### 2.6.2.4 Función de correlación de número de Nusselt en convección forzada para flujo sobre placas planas.

Para calcular el número de Nusselt para flujo sobre capas planas, se implementó el siguiente script de MATLAB. En él se decide cual ecuación de correlación usar en función del número de Reynolds y Prandtl.

#### **Código implementado – NusseltcorrFPP.m\***

```

function [ Nu ] = NusseltCorrFPP(Nre, Npr)
1     if (Nre<5e5 && Npr>0.6)
2         Nu = 0.664*power(Nre, 0.5)*power(Npr,1/3);
3     elseif (Nre>=5e5 && Nre<1e7 && Npr>=0.6 && Npr<=60)
4         Nu = 0.037*power(Nre, 0.8)*power(Npr, 1/3);
5     end
6 end

```

## 2.7 Implementación del sistema de control automático

En la etapa de implementación se realizaron varios análisis al evaporador, mediante los que se determina: los dispositivos a ser instalados y el algoritmo de control del proceso. Delimitar el sistema de control es la primera parte de la implementación. En esta sección se describirá los análisis realizados para implementar el sistema de control, así como la construcción del panel de control y la instalación de los dispositivos.

### 2.7.1 Dispositivos seleccionados para el sistema de control

**Tabla 21-2:** Dispositivos y materiales usados para construcción del sistema de control.

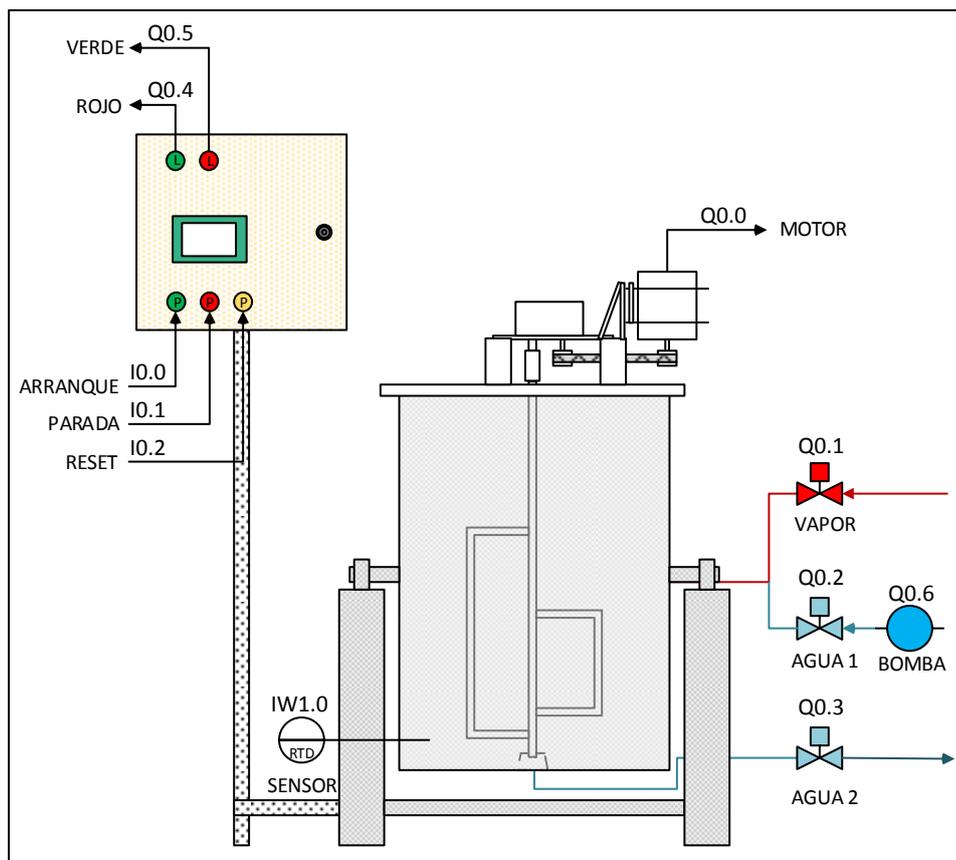
Elementos	Cant.	Detalle
PLC Twido TWDLCAA16DRF	1	CPU extensible Twido - alimentación 100-240 V CA - 9 E 24 V CC - 7 S y relé
Pantalla Brainchild HMI 450	1	Táctil, Procesador, velocidad CPU ARM Cortex-A8, 667Mhz, Ethernet 10/100 Mbps, RJ45
Variador de frecuencia Modelo Sinamics G110 220V, SIEMENS	1	Procedencia: Alemania Frecuencia de Red: 47Hz a 63Hz. Frecuencia de Salida: 0Hz a 650Hz. Entradas Digitales: 3 Programables Salidas Analógicas: 1 programable (0 a 20 mA) Temperatura de Servicio: 10° a + 50° C.
Válvula solenoide 2L-170-15 para vapor	1	Latón Presión: Presión media Temperatura de medios: Temperatura media Medios: Vapor Potencia: Solenoide Tamaño del Puerto: 1/2" Estándar o no estándar: Sterling Silver Fish Hook size: 1/2" voltage: 12,24,110,220v
Válvula de agua,	2	Nombre de la marca: XCPC Material: Latón Presión: Presión media Temperatura de medios: Temperatura media Medios: Agua Potencia: Solenoide Tamaño del Puerto: 3/8" Estándar o no estándar: Sterling Silver Fish Hook Standard Voltage: 24V DC ,110V AC ,220V AC
Motor eléctrico, SIEMENS 1LA7	1	IP55 (Índice de protección). Clase F (Temperatura de trabajo). F.S. 1.10 (Factor de servicio). Potencias desde 0.5 HP

Realizado por: PATIÑO T.; VILLACÍS M., 2015.

### 2.7.2 Diagrama de ambiente del sistema de control

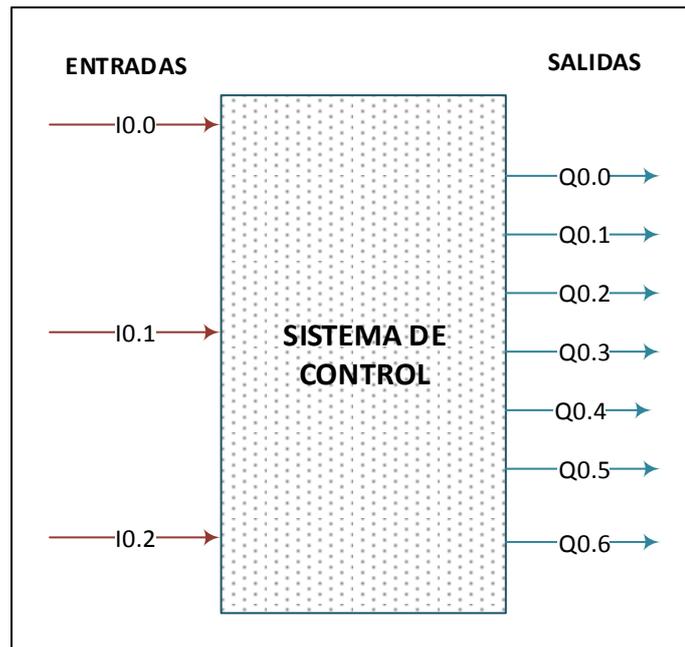
El primer paso para poder implementar un sistema de control usando un PLC como controlador es describir el sistema de control usando la relación dispositivo/acción de control. Para el proceso de evaporación se usaran 3 pulsadores dos abierto por defecto y 1 cerrado, están disponibles las mismas funciones en la pantalla HMI y en el panel remoto en Lookout. El sensor RTD envía la señal al PLC para abrir o cerrar la válvula de vapor dependiendo de la temperatura.

El variador de frecuencia y el switch, permiten regular la frecuencia del motor eléctrico que acciona el agitador y apagarlo o encenderlo. La figura 13-2 representa la disposición planificada para el sistema de control, aunque esta distribución solo presenta la posición del panel de control. Este diagrama sirve como referencia para conocer los elementos de control relacionados con el PLC. La nomenclatura de las variables es igual a los símbolos aplicados en el software de programación del PLC Twido del fabricante Schneider. Las entradas se nombran con la letra inicial “I”, las salidas con “Q” y las entradas analógicas con “IW”.



**Figura 13-2:** Diagrama de elementos del sistema de control con variables asignadas.  
Realizado por: PATIÑO T.; VILLACÍS M., 2015.

El diagrama de la figura 13-2, se puede simplificar de mejor manera ya presenta solo las entradas con su símbolo respectivo, esto es igual para las salidas. La simplificación la figura 13-2, se puede observar en la figura 14-2, donde solo se muestran las entradas y salidas con su respectivo símbolo. En el panel de control se dispondrá de una interface hombre maquina por pantalla HMI táctil, dentro de esta pantalla se dispondrán las mismas funciones dispuestas por los pulsadores. Las dimensiones del soporte del panel de control, se encuentran en los planos que se entregaran junto con otros documentos a los responsables del laboratorio de procesos industriales.



**Figura 14-2:** Diagrama de ambiente del sistema de control.  
**Realizado por:** PATIÑO T.; VILLACÍS M., 2015

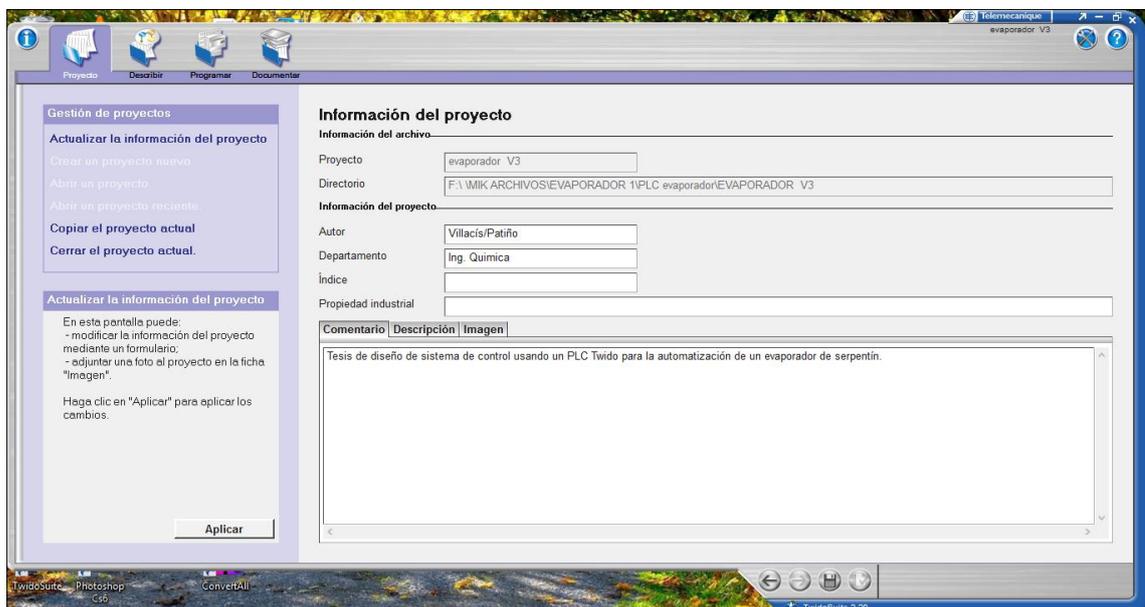
El diagrama de la figura 14-2, facilita el proceso para elaborar el diagrama FASCET, que permite describir el proceso de control que se implementara en el software de programación del PLC TwidoSuite 2.20. En el diagrama se observa las entradas: I0.0, I0.1, I0.2, estas representan los pulsadores del panel de control del otro lado se encuentran las salidas: Q0.0, Q0.1, Q0.2, Q0.3, Q0.4, Q0.5 y Q0.6, que representan las luces indicadoras, el motor eléctrico, la bomba y las válvulas.

### 2.7.3 Diagrama Ladder de programación del PLC Twido

El diagrama Ladder que permite programar el PLC, se realizó en el software TwidoSuite 2.20. Este trabajo lo realizó un ingeniero electrónico, al igual que la construcción e instalación del panel de control, el diagrama Ladder se encuentra en el anexo 3. Además se pidió que nos entregue el diagrama eléctrico correspondiente sobre la conexión y disposición de los elementos electrónicos, sensores y actuadores.

El proceso para programar el PLC, comienza con la descarga del software correcto para el modelo de PLC utilizado. En el caso de nuestro trabajo se usó un PLC Twido TWDLCA24DRF del Fabricante Schneider. El proceso de programación es el siguiente:

El primer paso para programar el PLC Twido es crear un proyecto, en PLC Twido donde se muestre la información relevante, la dirección donde se guardara por defecto, autores, logotipo, etc. Para el caso de nuestro proyecto se le nombró EVAPORADOR V3, y se puede observar en la figura 15-2, en esta ventana en la que se puede establecer la información que se imprimirá en la documentación autogenerada.

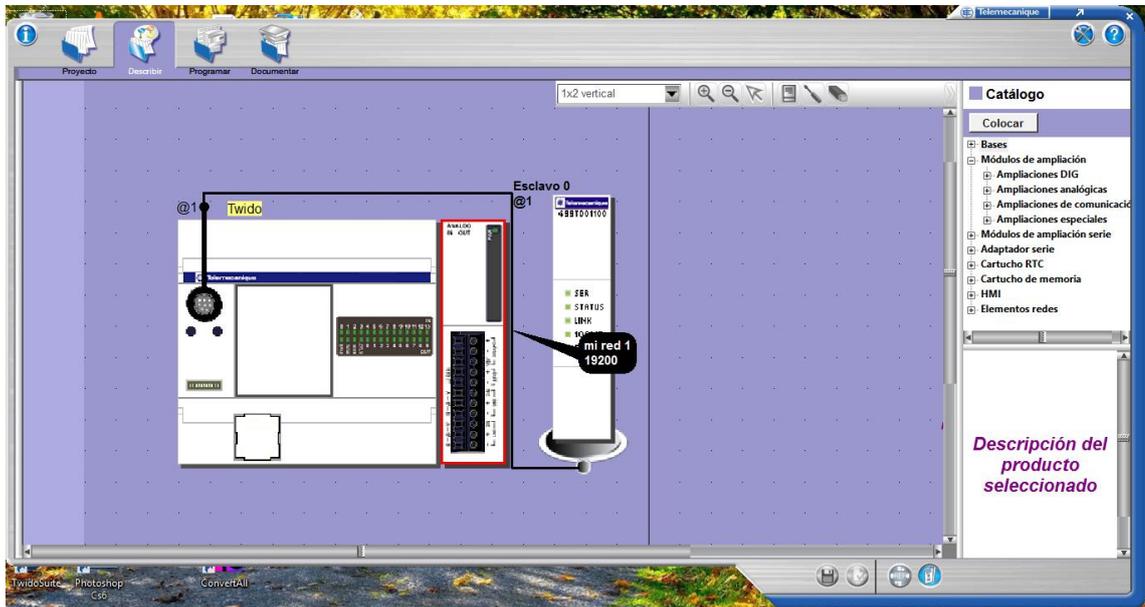


**Figura 15-2:** Pestaña de creación de proyecto de Twido Suite 2.20.

**Fuente:** captura de pantalla de Twido Suite 2.20.

Una vez creado el proyecto, se describe el hardware usado para construir el sistema de control. En el caso de nuestro trabajo, aparte del PLC Twido se usó: el modulo E/S analógico TM2ALM3LT, con entradas para sensores de temperatura RTD, PT100. Además se le agrego un

módulo de comunicación Ethernet 499TD01100, en la figura 16-2, se muestra la distribución del PLC y los módulos.



**Figura 16-2:** Diagrama de ambiente del sistema de control.

Fuente: captura de pantalla de Twido Suite 2.20

En la misma pestaña se puede configurar cada uno de las piezas del hardware. Haciendo clic derecho sobre el PLC, y seleccionando la opción configurar del menú emergente. En la pestaña “Configuración del material”, se obtiene dos tablas con las entradas y salidas posibles de usar en el PLC. El modelo de Twido se tiene 14 entradas digitales y 10 salidas digitales. De las cuales se usó 3 entradas y 7 salidas.

Configuración del módulo Aplicar Cancelar

Entradas/Salidas

Tabla de entradas

Uso	Dirección	Símbolo	Utilizado por	Filtrado	Guardado
<input checked="" type="checkbox"/>	%I0.0	START	Lógica aplicación	3 ms	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	%I0.1	STOP	Lógica aplicación	3 ms	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	%I0.2	P_TEST_PLC	Lógica aplicación	3 ms	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	%I0.3			3 ms	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	%I0.4			3 ms	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	%I0.5			3 ms	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	%I0.6			3 ms	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	%I0.7			3 ms	<input type="checkbox"/>

**Figura 17-2:** Tabla de entradas digitales usadas en PLC.

Fuente: captura de pantalla de Twido Suite 2.20

Tabla de salidas				
Uso	Dirección	Símbolo	Estado	Utilizado por
<input checked="" type="checkbox"/>	%Q0.0	MOTOR	<input checked="" type="checkbox"/>	Lógica aplicación
<input checked="" type="checkbox"/>	%Q0.1	VAPOR	<input type="checkbox"/>	Lógica aplicación
<input checked="" type="checkbox"/>	%Q0.2	AGUA_1	<input type="checkbox"/>	Lógica aplicación
<input checked="" type="checkbox"/>	%Q0.3	AGUA_2	<input type="checkbox"/>	Lógica aplicación
<input checked="" type="checkbox"/>	%Q0.4	VERDE	<input type="checkbox"/>	Lógica aplicación
<input checked="" type="checkbox"/>	%Q0.5	ROJO	<input type="checkbox"/>	Lógica aplicación
<input checked="" type="checkbox"/>	%Q0.6	BOMBA	<input type="checkbox"/>	Lógica aplicación
<input type="checkbox"/>	%Q0.7		<input type="checkbox"/>	
<input type="checkbox"/>	%Q0.8		<input type="checkbox"/>	
<input type="checkbox"/>	%Q0.9		<input type="checkbox"/>	

**Figura 18-2:** Tabla de salidas digitales usadas en PLC.

Fuente: captura de pantalla de Twido Suite 2.20

En las figuras 17-2, 18-2, se muestran la tabla de entradas digitales y la tabla de salidas digitales, usadas en el programa del PLC. En la figura 19-2, se presenta la configuración del módulo de entradas analógicas, donde se especifica la entrada codificada %IW1.0 para la medida tomadas de temperatura RTD e escala Celsius, con mínimo de  $-1000$  y máximo  $5000$ , con intervalos de medida de  $0.1$  °C.

Configuración del módulo							
		Aplicar		Cancelar			
Tabla de entradas y salidas							
Uso	Dirección	Símbolo	Tipo	Ampliada	Mínimo	Máximo	Unidades
<input checked="" type="checkbox"/>	%IW1.0	TEMPERATURA	PT 100	Celsius	-1000	5000	0,1 °C
<input type="checkbox"/>	%IW1.1		No utilizado	Normal	0	4095	Ninguno
<input type="checkbox"/>	%QW1.0		No utilizado	Normal	0	4095	Ninguno

**Figura 19-2:** Tabla de configuración de entradas analógicas, usadas en PLC.

Fuente: captura de pantalla de Twido Suite 2.20

En la figura 20-1, se muestra la configuración del módulo Ethernet para poder acceder al PLC por medio de cable Ethernet o conectarlo a medios automáticos mediante Wifi u otro dispositivo inalámbrico.

Elemento	
Nombre	Esclavo 0
Redes Ethernet	
Configuración dirección IP	
Dirección IP:	192 . 168 . 0 . 2
Máscara de subred:	255 . 255 . 255 . 0
Dirección de la pasarela:	192 . 168 . 0 . 1
<input type="button" value="Aceptar"/> <input type="button" value="Cancelar"/>	

**Figura 20-2:** Configuración de módulo de conexión Ethernet.

Fuente: captura de pantalla de Twido Suite 2.20

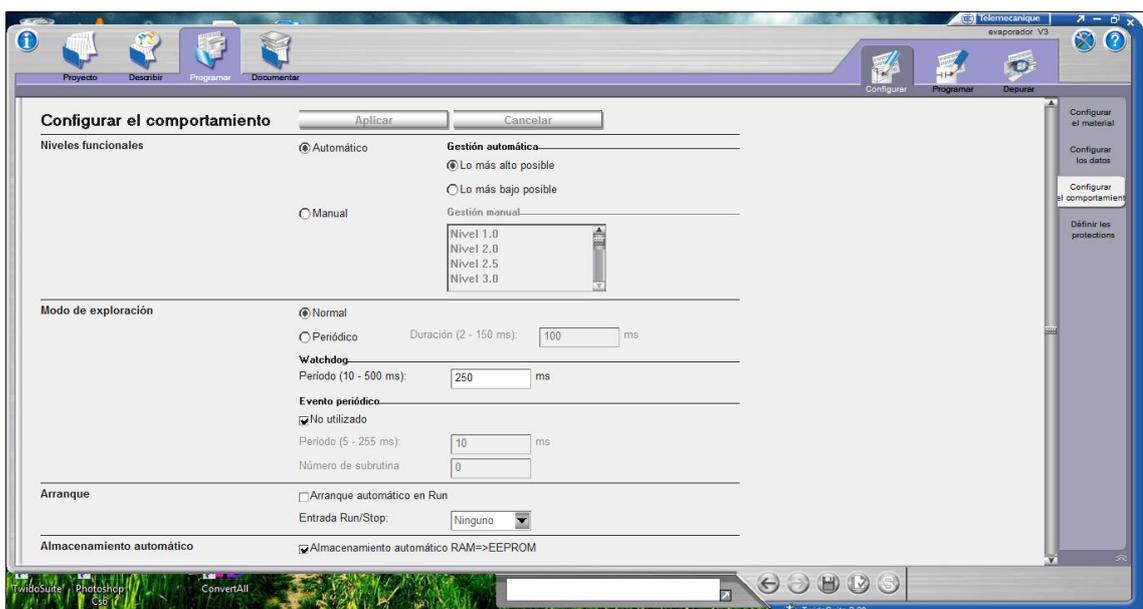
El nombre de la conexión se mantuvo en el nombre por defecto “Esclavo 0”, La dirección IP: 192.168.0.2, Mascara de subred: 255.255.255.0 y la dirección de la pasarela 192.168.0.1. El ruta necesaria para poder conectarse al PLC; es la dirección IP con esta dirección se realizara una conexión a un router que permite conectar la pantalla HMI y la pantalla remota.

Uso	%M	Símbolo
<input checked="" type="checkbox"/>	%M0	M0
<input checked="" type="checkbox"/>	%M1	M1
<input checked="" type="checkbox"/>	%M2	M2
<input checked="" type="checkbox"/>	%M3	M3
<input checked="" type="checkbox"/>	%M4	M4
<input checked="" type="checkbox"/>	%M5	M5
<input checked="" type="checkbox"/>	%M6	M6
<input checked="" type="checkbox"/>	%M7	M7
<input checked="" type="checkbox"/>	%M8	M8
<input type="checkbox"/>	%M9	
<input checked="" type="checkbox"/>	%M10	HMI_START
<input checked="" type="checkbox"/>	%M11	HMI_STOP
<input type="checkbox"/>	%M12	HMI_TEST_VAPOR
<input type="checkbox"/>	%M13	HMI_TEST_AGUA_1
<input checked="" type="checkbox"/>	%M14	HMI_TEST
<input type="checkbox"/>	%M15	HMI_TEST_MOTOR
<input checked="" type="checkbox"/>	%M16	HMI_RESET
<input checked="" type="checkbox"/>	%M17	M17
<input checked="" type="checkbox"/>	%M18	

En la figura 20-2, se muestra la pestaña de configuración de datos específicamente la tabla de marcas de memoria del PLC, son equivalentes a los estados de un diagrama GRAFCET, con diferencia de las marcas utilizadas para comunicarse con las acciones realizadas desde la pantalla HMI. Por ejemplo la marca %M0, comprende el estado inicial, es decir, que se relaciona esta marca como condicional para ejecutar funciones como encender la bomba, abrir las válvulas, etc. En esta tabla se direcciona los espacios de memoria que sirve para ejecutar las acciones necesarias para el control de los dispositivos de salida y las operaciones necesarias.

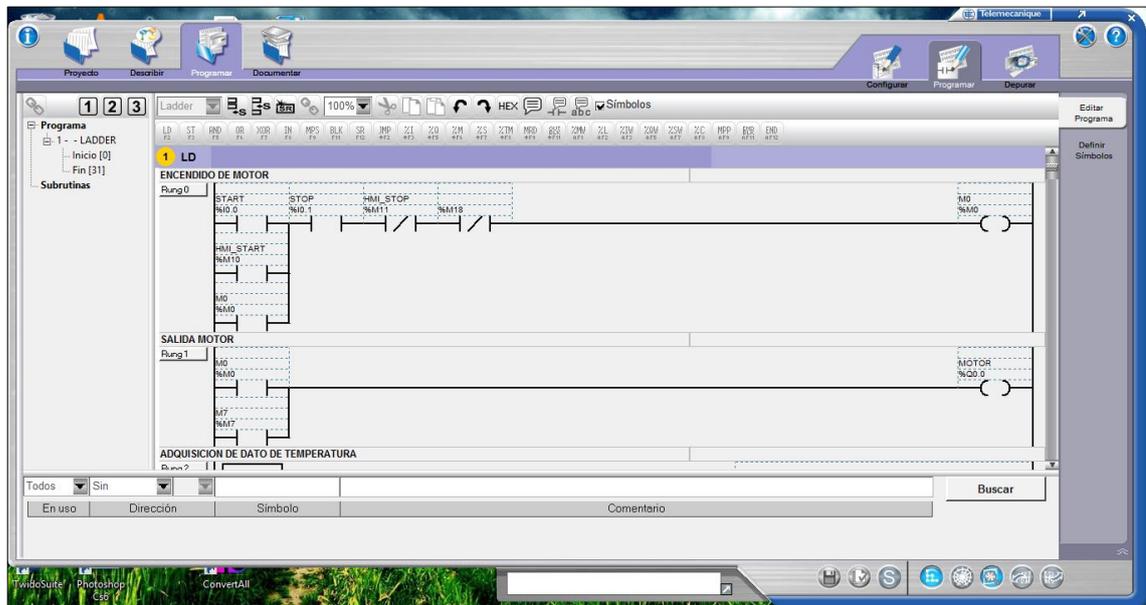
**Figura 21-2:** Tabla marcas de memoria.  
Fuente: captura de pantalla de Twido Suite 2.20

Donde se define el nivel de funcionamiento bajo asignación automática, el modo de exploración como normal y el watchdog con un periodo de 250ms. No se especificó tiempo para evento periódico ni condiciones de arranque. El almacenamiento como RAM=>EEPROM.



**Figura 22-2:** Ventana de configuración de comportamiento del PLC.  
Fuente: captura de pantalla de Twido Suite 2.20

Para finalizar se hace uso del editor de diagramas Ladder, en él se construye la programación necesaria para ejecutar el algoritmo de control. En la figura 23-2, se muestra el entorno de programación de Twido Suite 2.20. El diagrama Ladder completo se encuentra en el anexo VII, VIII y IX.



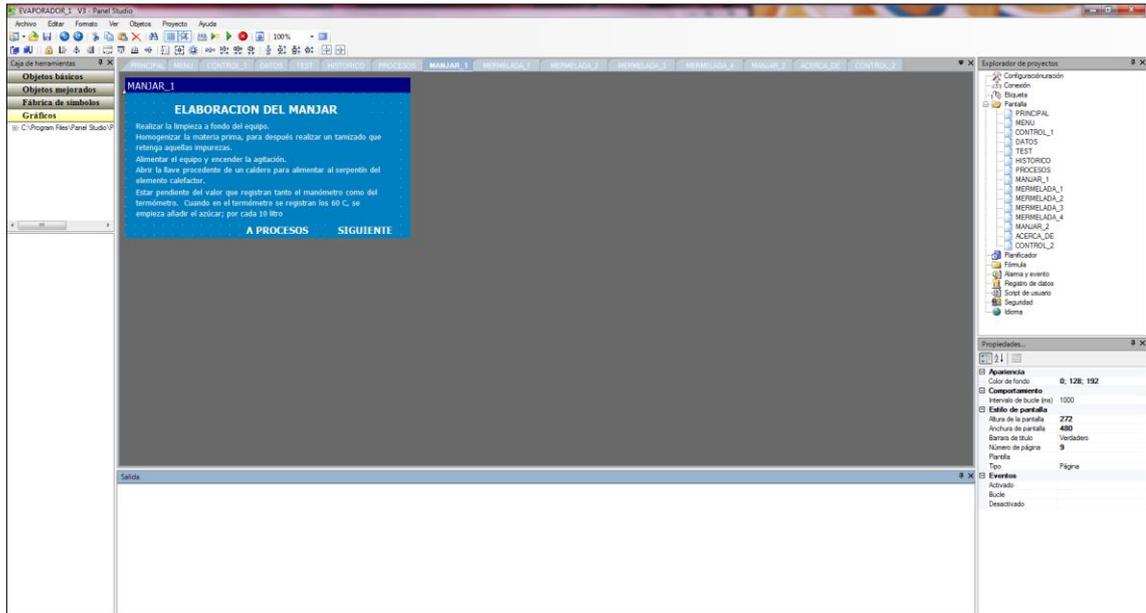
**Figura 23-2:** Ventana de edición de diagramas Ladder del PLC.

Fuente: captura de pantalla de Twido Suite 2.20

#### 2.7.4 Configuración de HMI

Para poder usar la pantalla táctil, es necesario configurar y crear las pantallas que conformaran las pantallas para los controles e indicadores de la interface hombre-máquina. Para la pantalla usada: HMI Brainschild 4.3”, se emplea el software del fabricante PanelStudio. En la figura 24-2 se muestra la distribución de las herramientas del entorno de PanelStudio 1.34.

En este trabajo no se va a profundizar en el uso del software, ni los procedimientos de configuración de la pantalla. El objetivo que se busca al implementar esta vía de acceso al sistema de control, es proveer un medio para de manera fácil arrancar, parar o resetear el proceso. El reseteo del proceso es la eliminación de las condiciones operativas y la re-inicialización. Las pantallas creadas suman 15, las mismas se presentan en la sección de anexos.



**Figura 24-2:** Entorno de edición de pantalla HMI Brainchild, PanelStudio v1.34.  
**Fuente:** captura de pantalla de PanelStudio v1.34

### 2.7.5 Implementación de panel de control remoto por conexión inalámbrica

Para poder realizar la conexión entre el PLC y el router, primero es necesario configurar el router para crear una red llamada “control”, cuya conexión es directa al PLC. Al mismo router se conecta la pantalla HMI, para poder controlar y actualizar simultáneamente entre el panel remoto y la pantalla HMI. No se va a detallar el procedimiento realizado para la conexión física del sistema de acceso inalámbrico al controlador, pero mostraremos un diagrama de conexión en el anexo XI.

## CAPITULO III

### 3 MARCO DE RESULTADOS, DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 3.1 Resultados

##### 3.1.1 Resultados de cálculo de parámetros operativos del evaporador.

**Tabla 1-3:** Resultados de cálculo de parámetros operativos del evaporador.

Magnitud	Variable	Unidades	Valor
Volumen total cilindro	$V_m$	$m^3$	$3,96 \times 10^{-2}$
Longitud del serpentín	$L_{hs}$	$m$	6,6788
Sección transversal serpentín	$A_{serp}$	$m^2$	$2,85 \times 10^{-4}$
Volumen del serpentín	$V_{serp}$	$m^3$	$1,90 \times 10^{-3}$
Altura perdida por serpentín	$h_{pserp}$	$m$	$9,70 \times 10^{-3}$
Altura perdida factor seguridad	$h_{fseg}$	$m$	$9,49 \times 10^{-2}$
Altura fluido operativa	$h_{op}$	$m$	$5,28 \times 10^{-1}$
Volumen operativo cilindro	$V_{op}$	$m^3$	$1,04 \times 10^{-1}$

Realizado por: PATIÑO T.; VILLACÍS M., 2015.

##### 3.1.2 Resultados de cálculos de transferencia de calor

**Tabla 2-3:** Resultados de cálculo de parámetros operativos del evaporador.

Intercambio	Magnitud	Variable	Unidades	Valor
Intercambio 1	Flujo másico de vapor	Mg	$kg/s$	0,0086
	Caudal de vapor	Qg	$m^3/s$	0,0153
	Velocidad de flujo de vapor	vg	$m/s$	44,3543
	Numero de Reynolds - flujo de vapor	Nreg	ND	39561
	Numero de Nusselt vapor	Nug	ND	105,4437
	Coeficiente de convección	hg	$W/m^2\text{°C}$	128,2173
	Temperatura media vapor	Tmg	$^{\circ}\text{C}$	114,615
	Calor perdido condensación	qg	$kJ/s$	733,9351
	Temperatura superficie serpentín	Ts1s	$^{\circ}\text{C}$	137,23
Inter. 2	Resistencia serpentín	Rs1	$^{\circ}\text{C}/W$	0,000269
	Temperatura superficie ext. Serp.	Ts2s	$^{\circ}\text{C}$	137,2298
Intercambio 3	Temperatura entrada concentrado	Tfir	$^{\circ}\text{C}$	25
	Temperatura salida concentrado	Tfer	$^{\circ}\text{C}$	83,5
	Flujo másico entre tubos	Mf	$kg/s$	0,003
	Velocidad de entrada tubos	vmf	$m/s$	$1,39 \times 10^{-5}$
	Velocidad máx. Flujo entre tubos	Vmaxf	$m/s$	$7,15 \times 10^{-5}$

	Caudal máximo entre tubos	Qmaxf	$m^3/s$	$1,58 \times 10^{-5}$
	Flujo másico entre tubos	Mmaxf	$kg/s$	$1,63 \times 10^{-5}$
	Numero de Reynolds concentrado	Nref1	ND	5,4429
	Numero de Nusselt concentrado	Nuf1	ND	1,8512
	Coeficiente de convección concentrado	hf1	$W/m^2\text{°C}$	46,652
	Temperatura del concentrado	Tfet	$^{\circ}\text{C}$	137,2298
	Calor perdido evaporación	qperf1	$kJ/s$	674,1
	Masa evaporada	Mevapf1	$kg/s$	2,93E-04
	Eficiencia en transferencia de calor	Ef	ND	91,8458
<b>Intercambio 4</b>	Temperatura salida de placa plana	Tfer2	$^{\circ}\text{C}$	82
	Numero de Reynolds concentrado	Nref2	ND	62,4309
	Numero de Nusselt concentrado	Nuf2	ND	6,7418
	Coeficiente de convección concentrado	hf2	$W/m^2\text{°C}$	2,8846
	Temperatura superficie interna cilindro	Ts1c	$^{\circ}\text{C}$	83,5
	Calor perdido condensación	qf2	$kJ/s$	0,0598
<b>Inter. 5</b>	Resistencia pared cilindro	Rc1	$^{\circ}\text{C}/W$	2,77E-04
	Temperatura superficie ext. Cil.	Ts2c	$^{\circ}\text{C}$	83,5
<b>Intercambio 6</b>	Temperatura ambiente	Ta	$^{\circ}\text{C}$	18
	Coeficiente de convección natural aire	hn_aire	$W/m^2s$	5
	Calor transferido al ambiente	qa	$kJ/s$	154,9831
<b>Coefficiente global</b>	Resistencia convectiva 1	Rcv1	$^{\circ}\text{C}/W$	0,0178
	Resistencia convectiva 2	Rcv2	$^{\circ}\text{C}/W$	0,0383
	Resistencia convectiva 3	Rcv3	$^{\circ}\text{C}/W$	0,6873
	Resistencia convectiva 4	Rcv4	$^{\circ}\text{C}/W$	0,39
	Resistencia total	Rt	$^{\circ}\text{C}/W$	1,1339
	Coeficiente global superficie interna	Ui	$W/m^2\text{°C}$	1,7485
	Coeficiente global superficie externa	Ue	$W/m^2\text{°C}$	1,7196
<b>Eficiencia</b>	Calor total perdido	qtPerdido	$kJ/s$	155,6572
	Eficiencia transferencia de calor	et1_equipo	ND	12,6336
	Eficiencia evaporador	et2_equipo	ND	78,8755

Realizado por: PATIÑO T.; VILLACÍS M., 2015.

### 3.1.3 Resultados de dimensionamiento de válvulas de control

#### 3.1.3.1 Dimensionamiento de válvulas de agua

Para seleccionar las válvulas de control ya que no se conoce el flujo real de líquido de enfriamiento, y por lo mismo, la caída de presión que habrá en la valvular de control. Se seleccionó una válvula de control solenoide para agua XCPC 2V02506 AC110V, con un  $C_v$  de  $6,2 \text{ gpm}/\text{psi}^{0.5}$  o  $K_v$  de  $5.3622 \text{ m}^3/\text{h bar}^{0.5}$ , que soportan un presión de trabajo para liquido

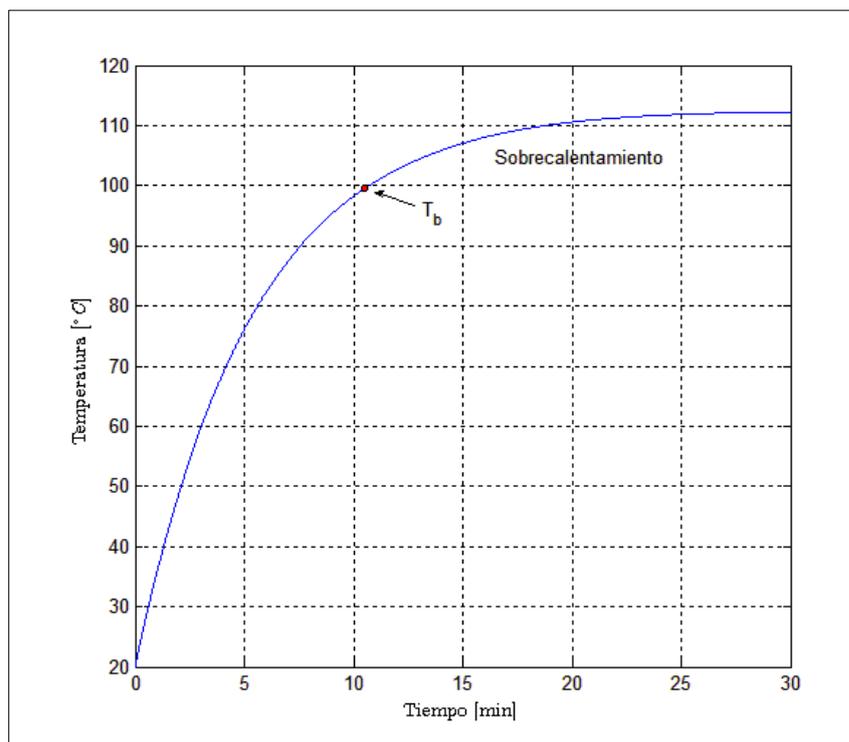
de 1 – 50  $kgf/cm^2$  que son a razón de 14,22 – 711  $psi$ , que es suficiente para la presión de trabajo de la caldera del laboratorio, que es de 45 – 60  $psi$ .

### 3.1.3.2 Dimensionamiento de válvula de vapor

Para el cálculo del coeficiente de caudal que necesita la válvula de control de vapor, es necesario conocer las propiedades de flujo de vapor y la tasa de producción de vapor de la caldera. Las propiedades del vapor se muestran en la tabla 6-2. La tasa de flujo de vapor producido en la caldera se estima en 750  $kg/h$  o 1653,467  $lb/h$ . La caída de presión en la válvula se estima como la máxima posible para el sistema 30,31  $psi$ . Siendo la presión de entrada 45  $psi$  y la de salida 14,6959  $psi$ . El resultado de  $C_v$  obtenido es 18.5102  $gpm/psi^{0.5}$ , que para  $K_v$  es 16.009  $m^3/h bar^{0.5}$ .

### 3.1.4 Resultados de simulación de proceso de evaporación sin sistema de control automático

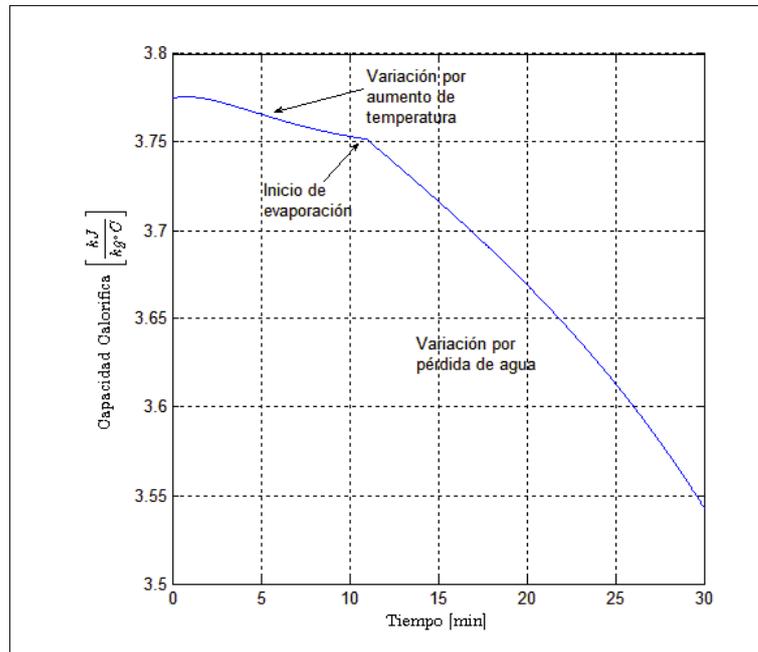
#### 3.1.4.1 Temperatura del concentrado



**Figura 1-3:** Resultado de temperatura del concentrado para simulación de proceso de evaporación sin control automático.

Realizado por: PATIÑO T.; VILLACÍS M., 2015.

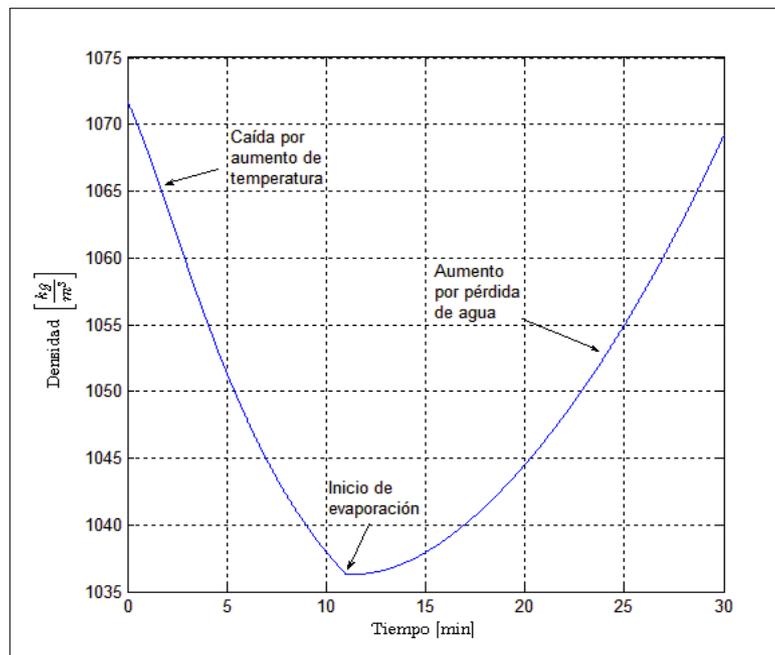
### 3.1.4.2 Calor específico del concentrado



**Figura 2-3:** Resultado de Calor específico del concentrado para simulación de proceso de evaporación sin control automático.

Realizado por: PATIÑO T.; VILLACÍS M., 2015.

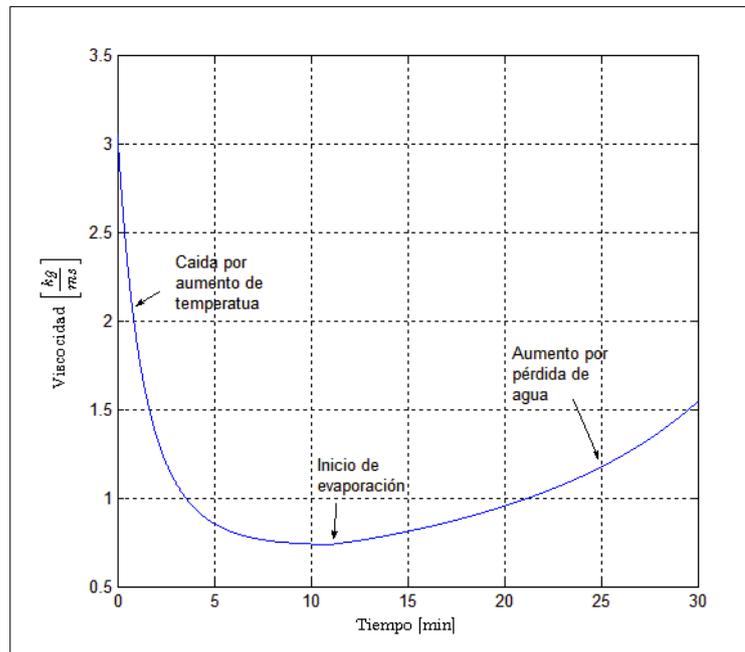
### 3.1.4.3 Densidad del concentrado



**Figura 3-3:** Resultado de densidad del concentrado para simulación de proceso de evaporación sin control automático.

Realizado por: PATIÑO T.; VILLACÍS M., 2015.

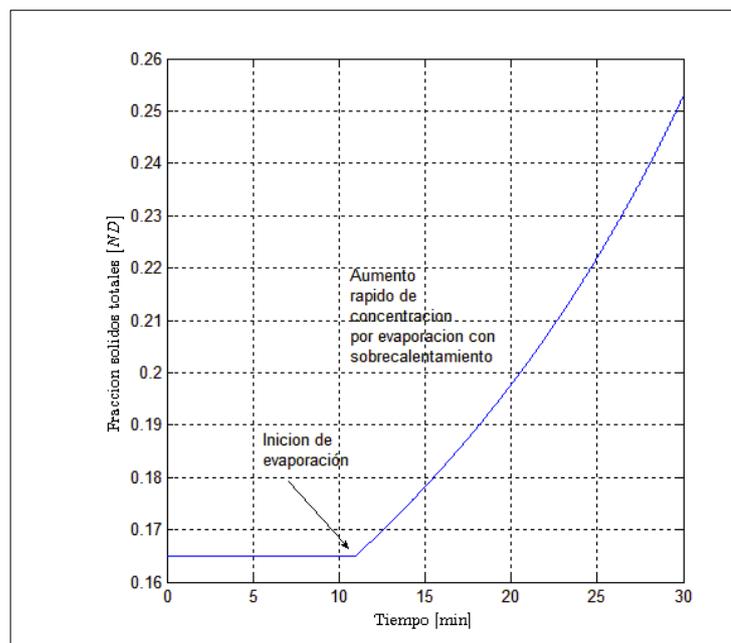
### 3.1.4.4 Viscosidad dinámica del concentrado



**Figura 4-3:** Resultado de viscosidad del concentrado para simulación de proceso de evaporación sin control automático.

Realizado por: PATIÑO T.; VILLACÍS M., 2015.

### 3.1.4.5 Fracción de solidos totales en el concentrado

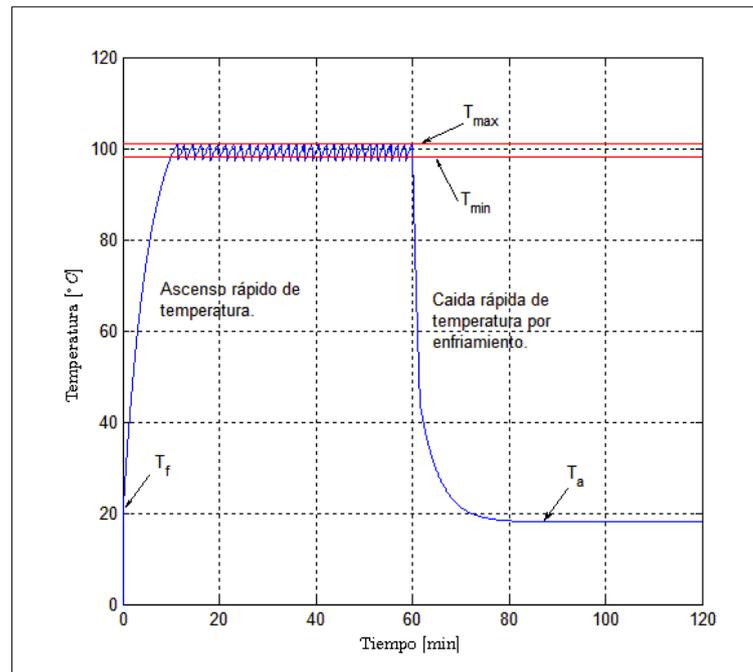


**Figura 5-3:** Resultado de viscosidad del concentrado para simulación de proceso de evaporación sin control automático.

Realizado por: PATIÑO T.; VILLACÍS M., 2015.

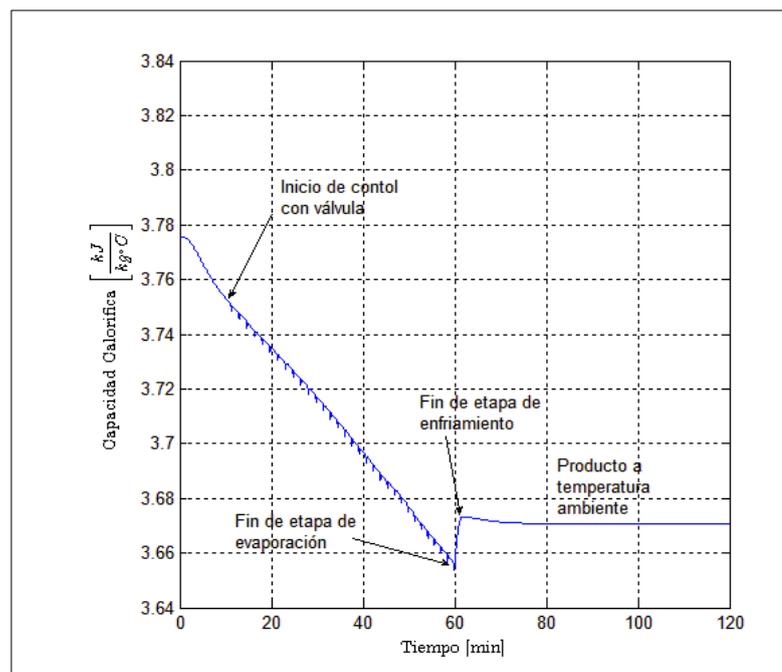
### 3.1.5 Resultados de simulación de proceso de evaporación controlado

#### 3.1.5.1 Temperatura del concentrado



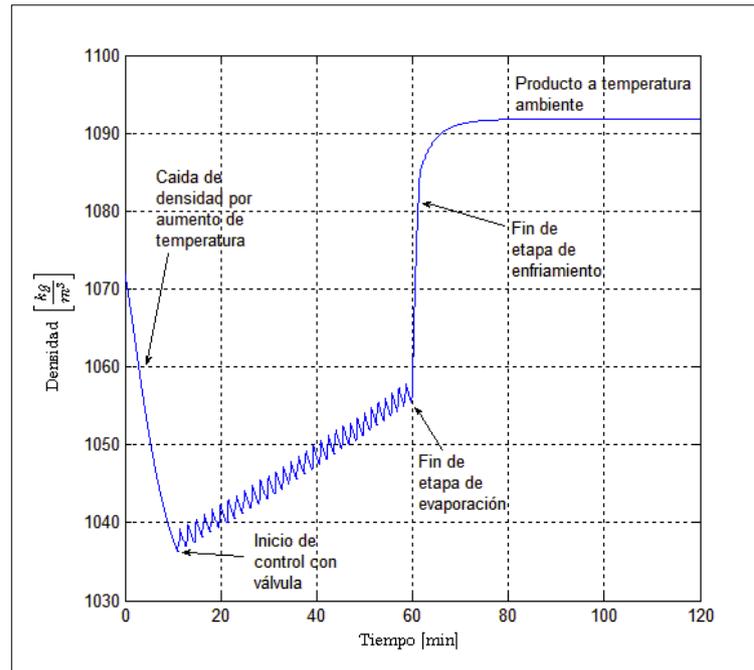
**Figura 6-3:** Resultado de temperatura del concentrado para simulación de proceso de evaporación controlado.  
Realizado por: PATIÑO T.; VILLACÍS M., 2015.

#### 3.1.5.2 Capacidad calorífica del concentrado



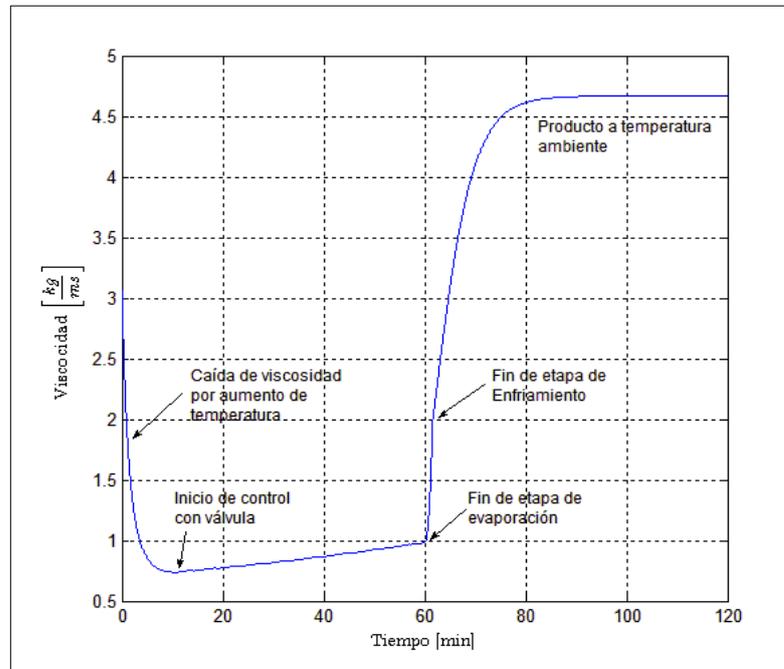
**Figura 7-3:** Resultado de capacidad calorífica del concentrado para simulación de proceso de evaporación controlado.  
Realizado por: PATIÑO T.; VILLACÍS M., 2015.

### 3.1.5.3 Densidad del concentrado



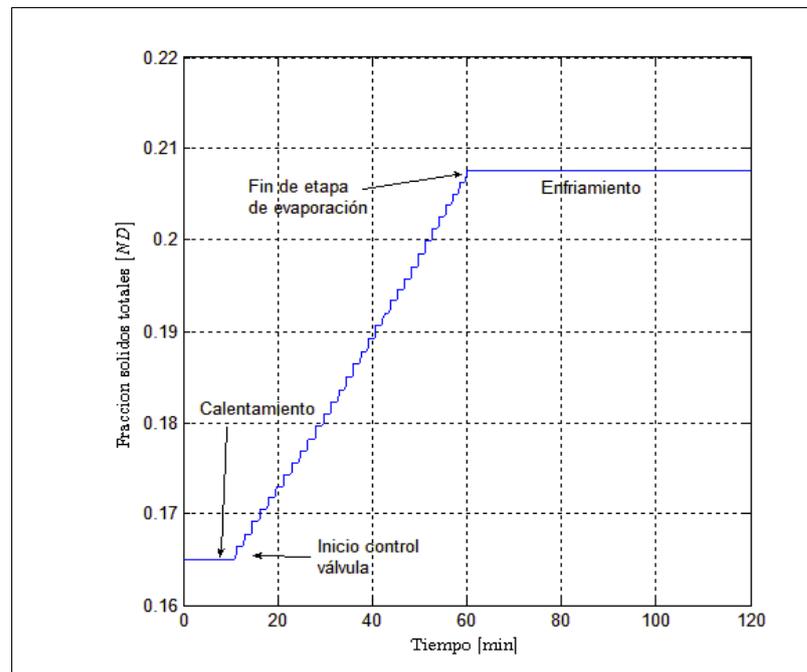
**Figura 8-3:** Resultado de densidad del concentrado para simulación de proceso de evaporación controlado. Realizado por: PATIÑO T.; VILLACÍS M., 2015.

### 3.1.5.4 Viscosidad dinámica del concentrado



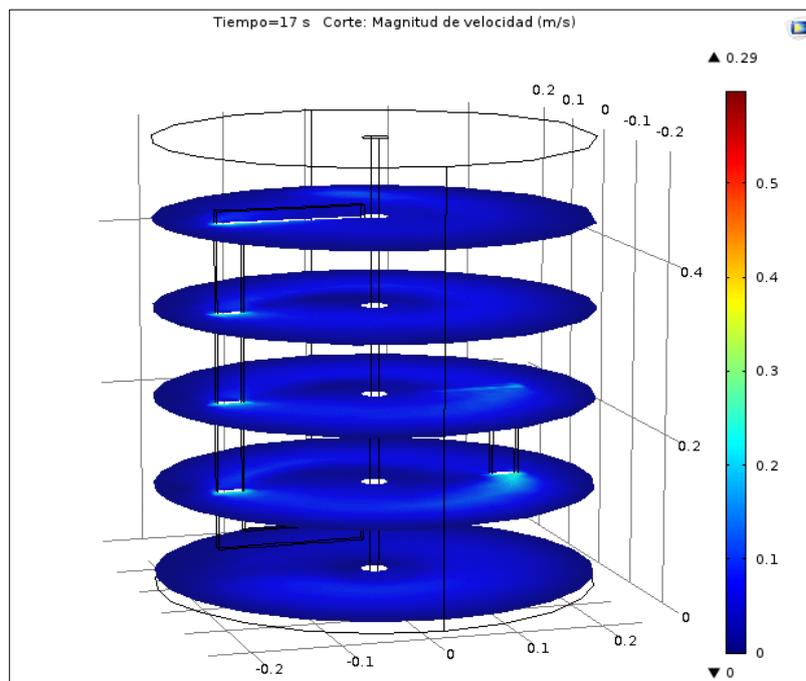
**Figura 9-3:** Resultado de viscosidad dinámica del concentrado para simulación de proceso de evaporación controlado. Realizado por: PATIÑO T.; VILLACÍS M., 2015.

### 3.1.5.5 Fracción de sólidos totales del concentrado

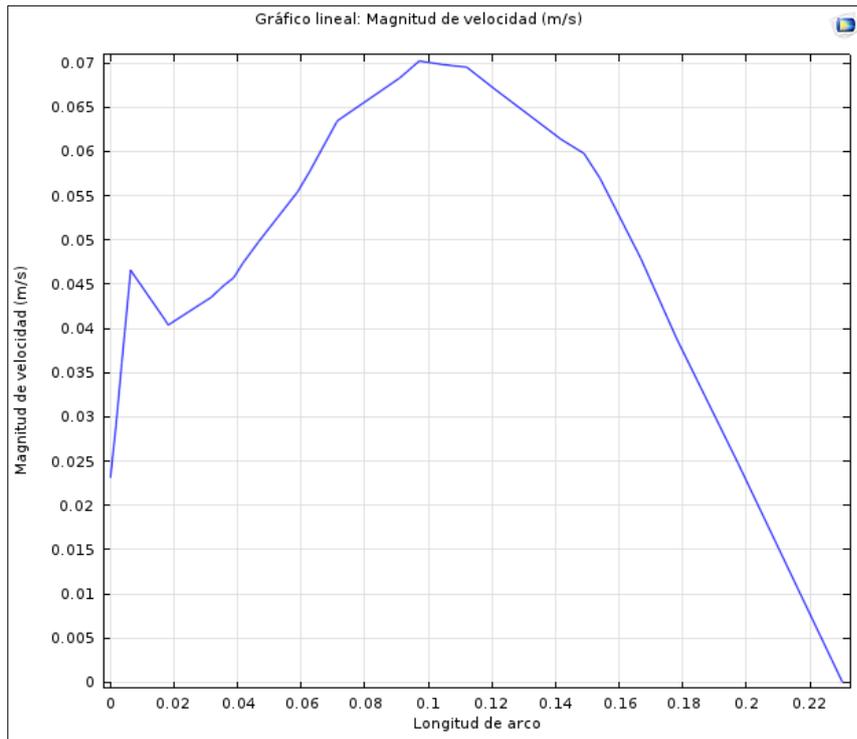


**Figura 10-3:** Resultado de fracción de sólidos totales del concentrado para simulación de proceso de evaporación controlado.  
Realizado por: PATIÑO T.; VILLACÍS M., 2015.

### 3.1.6 Simulación de perfil de velocidad generado por el agitador en COMSOL Multiphysics



**Figura 11-3:** Resultado de simulación de agitador del evaporador, para fluidos con características similares al agua.  
Realizado por: PATIÑO T.; VILLACÍS M., 2015.



**Figura 12-3:** Resultado del perfil de velocidad de agitador del evaporador para fluidos con características similares al agua.  
Realizado por: PATIÑO T.; VILLACÍS M., 2015.

## 3.2 Discusión de resultados

### 3.2.1 Discusión de resultados de cálculo de parámetros operativos

Las dimensiones calculadas, fueron usadas para la simulación y para marcar el volumen máximo en el equipo, como referencia para su uso. El volumen operativo representará la referencia para el uso óptimo y seguro del evaporador. El volumen optimo calculado para alimentación es de  $0,104 m^3$ , esto son 104 Litros de material. El volumen operativo se debe tomar como un volumen máximo. Es recomendable aplicar factores de seguridad para definir el volumen que se debe eliminar para evitar el derrame de los materiales a concretarse, algunos autores aplican un 0,15 en fracción como factor de seguridad, por tanto fue el valor que adoptamos. (Singh P. et al., 2001, p. 554)

Como la arquitectura del evaporador no es consistente con los diseños comunes de evaporadores, juntamos datos de estructuras de almacenamiento para las dimensiones del cilindro, convergiendo además las definiciones dadas en la bibliografía para intercambiadores de calor y evaporadores. Pero cabe señalar que el equipo de evaporación con serpentín, cuyo cuerpo esta principalmente compuesto por un cilindro metálico abierto, se asemeja más a un intercambiador que a un tipo calificado de evaporador. (Singh P. et al., 2001, p. 547-549)

### **3.2.2 *Discusión de resultados de cálculos de transferencia de calor***

En los cálculos de transferencia de calor se tomaron algunos valores como estimaciones, entre ellos está el flujo másico de vapor  $0.0086 \text{ kg/s}$ , la temperatura ambiente  $18^\circ\text{C}$ , la temperatura de entrada de vapor  $137,23^\circ\text{C}$  y una salida de  $92^\circ\text{C}$ , las propiedades de vapor se estimaron a  $114,615^\circ\text{C}$ . Los resultados obtenidos de los cálculos del primer proceso de intercambio de calor son: velocidad de flujo de vapor a través del serpentín  $44,3543 \text{ m/s}$ . Lo que permite determinar el coeficiente de transferencia de calor por convección entre el vapor y la pared del cilindro  $128,2173 \text{ W/m}^2\text{C}$ , que da una temperatura de  $137,23^\circ\text{C}$  en la superficie del tubo del serpentín. Esta temperatura alta en la superficie del tubo, puede dañar el material del concentrado porque supera la temperatura de degradación de la materia orgánica que es de  $70\text{-}80^\circ\text{C}$ . Para contrarrestar el efecto del alta temperatura de la superficie se requiere que el concentrado este en movimiento, por lo tanto se debe agitar.

EL siguiente intercambio, que es el proceso de conducción de calor a través de la pared del cilindro se evalúa usando la conducción del material, que es acero inoxidable ASTM 304. Lo que arroja una temperatura de superficie externa del conducto del serpentín de  $137,2298^\circ\text{C}$ . La caída de temperatura es de  $0,0002^\circ\text{C}$ , entre superficies del tubo. Por lo que se puede estimar que la temperatura es la misma  $137,23^\circ\text{C}$ .

En el tercer intercambio se determinó la cantidad de calor que se pierde por efecto de la evaporación, que nos da un valor de calor perdido de  $674,13 \text{ kJ/s}$ . En este punto nos damos cuenta que la mayor parte del calor se pierde hacia el ambiente por concepto de evaporación.

### **3.2.3 *Discusión de resultados de dimensionamiento de válvulas***

#### **3.2.3.1 *Discusión de resultados de dimensionamiento de válvula de agua***

La selección del modelo de la valvular de control de flujo de agua o fluido refrigerante, se realizó de esta manera, debido a que el sistema de enfriado es complementario al proceso de evaporación: Para realizar el proceso de evaporación no es completamente necesario aplicar el enfriado. El enfriado se utiliza si se quiere acortar el tiempo de proceso, al pasar de convección natural a convección forzada o si el producto requiere para mantener su calidad de un enfriado más rápido. La etapa de enfriado se planteó como parte del tiempo de proceso, con el objetivo de poder usar el evaporador como un intercambiador de calor, pasando a ser un enfriador o equipo de refrigeración.

### 3.2.3.2 *Discusión de resultados de dimensionamiento de válvulas de vapor*

Con los datos de  $C_v$  o  $K_v$ , se seleccionó una válvula de control modelo 2L-170-15 hecha de latón, que soporta una caída de presión media, con método de acción solenoide para 110V de corriente de alimentación, con un  $C_v$  de  $20 \text{ gpm/psi}^{0.5}$ . Esta válvula nos da un intervalo de seguridad para el  $C_v$  de  $20 - 18.5102 = 1.4898 \text{ gpm/psi}^{0.5}$ , que equivale a un factor de seguridad de 7%. La imagen de la válvula se encuentra en el anexo E.

### 3.2.4 *Discusión resultados de simulación del proceso de evaporación de sin sistema de control automático*

#### 3.2.4.1 *Discusión de resultados de temperatura del concentrado*

En el caso del proceso de evaporación sin el sistema de control, como estaba el proceso previo a este trabajo de automatización, es muy difícil controlar la temperatura final del proceso. Se puede graduar el paso de vapor con el uso de una válvula manual, lo cual no garantiza poder obtener valores próximos a la temperatura deseada para el proceso de evaporación. Las condiciones de simulación incluyen el flujo constante y no alterable por dispositivo alguno de vapor proveniente de caldera, además de usar el mismo perfil de velocidad del agitador para unas  $24 \text{ rpm}$ . El valor de la velocidad promedio del fluido al cruzar el serpentín es de unos  $0.05 \text{ m/s}$ , se determinó que al cruzar el serpentín la velocidad de salida sería la misma de entrada, aunque esto no es verdad, es una buena aproximación.

En la figura 1-3, se muestra el resultado de la simulación del proceso de evaporación sin control de temperatura. Por la falta de control se tiene un sobre calentamiento del material concentrado. La potencia suministrada por el vapor es  $83,23 \text{ kW}$ , esta cantidad de energía sin un sistema de control, eleva la temperatura hasta  $112,24 \text{ }^\circ\text{C}$ . La temperatura estimada de ebullición es de  $99,97 \text{ }^\circ\text{C}$ , por lo que existe un sobrecalentamiento de  $12,27 \text{ }^\circ\text{C}$ . Esta cantidad de energía extra permite que en cuestión de 30 min, la concentración de sólidos totales llegue hasta el mínimo marcado por la norma nacional correspondiente a concentrados derivados de la leche, NTE INEN 0700 para dulce de leche, que estima un 25% como un valor adecuado. (INEN700, 2003) La curva obtenida en la figura 1-3, corresponde al modelo matemático planteado en la ecuación 46. La forma de esta curva muestra que la solución de la ecuación diferencial es una ecuación logarítmica.

El sistema de control a implementarse debe poder reducir o eliminar el sobrecalentamiento, porque aparte de ser ineficiente, puede causar daños en la materia orgánica nutritiva de la leche, zumo de frutas u otras mezclas alimenticias. Las proteínas por lo general se degradan a temperaturas superiores a los  $110^{\circ}\text{C}$ , esto produce la aparición de compuestos sulfurados. (ALAIS, 1985, pp. 118) Entre los daños térmicos que sufren los alimentos están: degradación de ácido ascórbico,  $931 \text{ min}$  y  $17.8^{\circ}\text{C}$ ; pardeamiento no enzimático,  $384 \text{ min}$  y  $35.5^{\circ}\text{C}$ ; degradación de Tiamina,  $254 \text{ min}$  y  $25.4^{\circ}\text{C}$ , vitamina A,  $43.5 \text{ min}$  y  $20^{\circ}\text{C}$ ; y la degradación de clorofila,  $15.4 \text{ min}$  y  $45^{\circ}\text{C}$ .

El incremento exponencial de la temperatura debe permanecer por tanto cuando se instale el sistema de control bajo la temperatura de degradación de las proteínas. El sistema de control controlara la temperatura en función de un intervalo de temperaturas que van desde el punto de consigna inferior  $T_{min}$ , al punto de consigna superior  $T_{max}$ . Este intervalo debe ser muy pequeño, lo mínimo permitido por el proceso de evaporación. A demás existen temperaturas límite que no se pueden sobrepasar como la temperatura de degradación de proteínas, grasa y otros componentes de la leche.

#### 3.2.4.2 *Discusión de resultados de calor específico de concentrado.*

En el proceso de transferencia de calor el calor específico cambia con el tiempo y la composición, en la figura 2-3, se muestran los resultados de la simulación del proceso sin control. La curva muestra 2 secciones muy bien definidas, estas secciones se relacionan con las etapas de evaporación descritas en el modelo matemático. Durante la etapa de calentamiento del material a concretarse se observa un cambio variante del calor específico. Dichos cambios se deben al aumento de la temperatura, sin cambios de concentración de los componentes. En esta etapa la variación es de  $0.05 \text{ kJ/kg } ^{\circ}\text{C}$ , estas es una variación muy pequeña por tanto se puede decir que el gasto de energía en esta etapa es menor. Otra característica de esta etapa el tiempo relativamente corto de su duración, aproximadamente  $11 \text{ min}$ . Normalmente se busca que sea muy breve, la etapa de calentamiento, por lo que se suele ingresar la alimentación precalentada.

La transición de la etapa de calentamiento a la etapa de evaporación, se diferencia por un pico al minuto 11, desde este punto la caída del calor específico es más pronunciada, esto se puede comprobar por la variación de  $0.2068 \text{ kJ/kg } ^{\circ}\text{C}$ , en menos de 20 min. La comparación de la velocidad de cambio entre las dos etapas de 6 a 1. Es decir que en la etapa de evaporación la caída se da seis veces más rápido que en la etapa de evaporación. La causa del aumento significativo de calor específico es el cambio en la composición del concentrado, que es generado por la pérdida de agua. El  $C_p$  al finalizar la simulación es  $3,5432 \text{ kJ/kg } ^{\circ}\text{C}$ , siendo la variación en todo el

proceso  $0.23163 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$ . Esta variación para procesos en los que se trasfiere tasas altas de calor, es una variación insignificante, para el evaporador también se podría tomar como una variación pequeña.

Para el cálculo de pérdidas de calor, es necesario conocer el grado de variación del calor específico del concentrado, debido a que cuando la concentración de agua es muy baja, la viscosidad interviene mucho sobre la conductividad térmica y el calor específico. De igual manera, el incremento ebulloscopio se ve impulsado por un aumento significativo de la viscosidad. Esto significa que se necesita más calor para una misma cantidad de materia en relación al paso del tiempo. Este efecto se comprobó con las validaciones prácticas del proceso luego de la implementación del sistema de control.

#### *3.2.4.3 Discusión de resultados de densidad del concentrado*

La densidad es un indicador de la consistencia del concentrado, aunque es un mejor indicador la viscosidad. La densidad en una mezcla depende la densidad de cada componente de la misma, es decir que la densidad tiene un carácter coligativo. En el caso de la leche la densidad de varios compuestos orgánicos que la constituyen, entre ellos grasa y proteínas. Según algunos autores la grasa es el principal aportante, sin tomar en cuenta el agua por su puesto. El agua es el principal componente de la leche la conforma en más de 89%. Cuando una cantidad significativa del agua es separada, las propiedades de la leche cambian.

En la figura 3-3, se muestra la curva resultado de la densidad del concentrado. La variación de la densidad es mucho más pronunciada que la del calor específico, por la razón de que es una propiedad coligativa, es decir es dependiente de la concentración de los componentes de la mezcla. En esta simulación la caída de la densidad en la etapa de calentamiento, casi se igualan con el aumento generado en la etapa de evaporación. El mínimo de la curva es el punto de inicio de la etapa de evaporación. La variación en la etapa de calentamiento es  $36,5 \text{ kg/m}^3$  y la variación en la etapa de evaporación es  $32,9 \text{ kg/m}^3$ . La variación en el proceso de evaporación es mucho más lenta que en la etapa de calentamiento, pero si se prolonga la curva unos 30 minutos más, se observaría que la línea aumenta su pendiente hasta casi volverse asintótica.

#### *3.2.4.4 Discusión de resultados de viscosidad dinámica del concentrado*

La viscosidad es el mejor indicador de consistencia, en el caso de esta simulación no se contempla la formación de complejos espesos generados por reacciones químicas con agentes coagulantes, como la pectina, solo calcula el cambio de viscosidad causado por la pérdida de agua. Es necesario

un estudio más riguroso sobre los cambios de viscosidad en función de la composición y la temperatura, para poder ajustar los resultados generados con el factor de formación de complejos espesos. Para simplificar no agregamos dicho factor de corrección.

En la figura 4-3, el cambio de viscosidad en el proceso de calentamiento es  $2,3185 \text{ kg/m s}$ , la variación en la etapa de evaporación es  $0,8059 \text{ kg/m s}$ . Si se prolongara el tiempo de simulación por 30 min más, se observaría que la curva de velocidad se vuelve asintótica con el eje del tiempo. La viscosidad es necesaria para poder comprender cuanta fuerza mecánica se necesita para seguir agitando el concentrado para homogenizar el intercambio de calor y la concentración de los componentes.

#### *3.2.4.5 Discusión de resultados de fracción de sólidos totales del concentrado*

La concentración de sólidos totales, es el principal indicador de la efectividad del proceso. El principal objetivo de la evaporación es aumentar la concentración, dependiendo del autor, hablan de la concentración de sólidos totales, azúcares totales, azúcar representada como sacarosa, etc. En esta simulación se toma en cuenta la concentración de sólidos totales.

En la figura 5-3, se observa la curva resultado de la simulación de la concentración en fracción de los sólidos totales presentes en el concentrado. Los sólidos totales representan la suma de: la grasa, proteína, fibra, carbohidratos y compuestos inorgánicos, presentes en la leche. La fracción de sólidos totales al término del tiempo de simulación es de 0.2528, que es un valor muy cercano al marcado por la norma NTE INEN 0700:2008. (INEN700, 2003)

### *3.2.5 Discusión de resultados de simulación del proceso de evaporación controlado*

#### *3.2.5.1 Discusión de resultados de temperatura del concentrado*

La función principal del PLC, es controlar la temperatura del proceso de evaporación. Mantenerla dentro de un intervalo en el cual la temperatura prácticamente zigzagueará. Comparando la temperatura del concentrado en el proceso sin control con la curva de la figura 6-3, se muestra que la etapa de calentamiento permanece igual. Pero la etapa de evaporación está controlada por la apertura y cierre de la válvula de control para vapor implementada en el sistema de control. Como se puede observar, la temperatura sube desde  $T_f$  hasta  $T_b$ , que está dentro del intervalo de control  $[T_{min}; T_{max}]$ . En la etapa de calentamiento se mantiene el tiempo de calentamiento de aproximadamente 10 min, pero la etapa de evaporación se prolonga por algo más de 45min. Una

vez terminado el tiempo asignado para el proceso de evaporación  $t_{evap} = 60$  min, empieza la etapa de enfriamiento con un tiempo asignado  $t_{enf} = 60$  min.

En la etapa de enfriamiento, hay una caída de temperatura muy rápida hasta la temperatura de enfriamiento  $T_{enf} = 45$  °C, en este punto las válvulas de agua se cierran y la bomba se apaga, desde este punto el enfriamiento se realiza por convección natural con el aire circundante. Aunque es recomendable extraer el producto en caliente. Como se puede ver el zigzaguo de la temperatura del concentrado dentro del intervalo de control, es el comportamiento obtenido en base a la programación implementada en el PLC. Para dar mayor realismo se agregó un retardo a la señal de temperatura del concentrado, esto se hizo para dar mayor concordancia con la experiencia obtenida en las prácticas de validación del sistema de control, donde se observó que la temperatura una vez cerradas las válvulas seguía aumentando y sobrepasaba los límites del intervalo de control. Se puso un tiempo de operación de 120 min, y se obtuvo resultados satisfactorios. Estos resultados dieron una pauta de cómo se comportaría el sistema de control una vez implementado.

### 3.2.5.2 *Discusión de resultados de calor específica de concentrado*

La capacidad calorífica del proceso controlado, cuya curva se muestra en la figura 7-3. Presenta el zigzaguo generado por la apertura y cierre de la válvula de control. A diferencia del proceso no controlado, la capacidad calorífica del concentrado, mantiene casi la misma pendiente de variación en el tiempo, lo único que permite diferenciar la etapa de calentamiento de la etapa de evaporación, es el vaivén de la curva causado por el comportamiento de la válvula de vapor. Como en la figura 2-3, la variación del  $C_p$ , en la etapa de calentamiento no es muy significativa. La variación notable ocurre en la etapa de evaporación.

La variación en la etapa de enfriamiento es positiva, esto se debe a que la temperatura influye en esta propiedad. A mayor temperatura menor  $C_p$ . Al final se observa que se mantiene constante en un valor de  $3.6707$  kJ/kg °C, que es el  $C_p$  del concentrado con una composición de 0,2079 en sólidos totales.

### 3.2.5.3 *Discusión de resultados de densidad del concentrado*

La densidad presenta los mismos efectos de zigzaguo, causados por la forma de controlar la temperatura implementada en el PLC. En la figura 8-3, se muestra la curva de densidad del concentrado para la simulación del proceso de evaporación bajo control. Esta curva muestra de

mejor manera la transición entre las etapas de calentamiento, evaporación y enfriado. La variación de la densidad para la etapa de calentamiento es  $35.5 \text{ kg/m}^3$ , que es prácticamente la misma del proceso sin control. La variación en la etapa de evaporación es  $21,3 \text{ kg/m}^3$ , mucho menor que la de la etapa de enfriamiento, pero esto se debe a la influencia de la temperatura y al control que ejerce el PLC sobre ella. Al final para la etapa de enfriamiento la variación es  $34.4 \text{ kg/m}^3$ , siendo la densidad final  $1091.8 \text{ kg/m}^3$ .

La variación de la densidad mostrada para el proceso controlado muestra la forma como la temperatura tiene acción sobre la densidad y lo que es igual, como el PLC altera la densidad del concentrado por su acción de control. Como se observa la densidad del mismo concentrado a diferentes temperaturas es diferente, y la diferencia es más o menos la variación de la densidad en la etapa de enfriado.

#### *3.2.5.4 Densidad de resultados de viscosidad dinámica del concentrado*

Al igual que la densidad es muy fácil distinguir cada etapa del proceso. En la figura 9-3, se puede apreciar fácilmente la etapa de calentamiento, que va más o menos hasta los primeros 10 min. En ella la caída de la viscosidad es considerable e igual en magnitud que la obtenida para un proceso sin control. La etapa de evaporación mantiene la viscosidad en un valor próximo a  $1 \text{ kg/m s}$ . Desde el punto final del proceso de evaporación comienza el enfriado, donde se observa el aumento notable de la viscosidad al disminuir la temperatura hasta la temperatura ambiente.

#### *3.2.5.5 Discusión de resultados de fracción de sólidos totales del concentrado*

Al final se describe la curva de composición del evaporador en función del tiempo. Cabe recalcar que esta simulación no contempla la variación de concentración generada por reacciones químicas o la volatilización de compuestos orgánicos constituyentes del concentrado. Una vez aclarado eso, se presenta en la figura 10-3, se observa la evolución de la composición del concentrado en función del tiempo. En ella se puede observar, las etapas del proceso. La etapa de calentamiento mantiene constante la composición, porque no presenta pérdidas de agua como vapor. A diferencia de la etapa de calentamiento, la etapa de evaporación presenta pérdida de masa y por tanto cambios de la concentración. Como en todos los resultados se observa que la acción de control del sistema de control, genera un aumento progresivo, casi escalonado de la fracción de sólidos totales. Siendo el valor final de la concentración de sólidos 0,2076. Que es un valor próximo al especificado en la norma INEN NTE 0700:2008, de 0,25 en fracción de peso.

Se asumió la etapa de enfriamiento como un sistema cerrado, es decir que no hay entrada o salida de materia, en este caso de vapor de agua. Por ello, la línea que representa la etapa de enfriamiento es una recta horizontal.

### **3.2.6 *Discusión de resultados de simulación del perfil de velocidad del fluido.***

En la figura 11-3, se puede observar una imagen de la simulación realizada para obtener el perfil de velocidad de fluidos con características similares al agua. Esta imagen corresponde al proceso de homogenización a 15 *rpm*, para el agitador. Las propiedades del agua se tomaron de la base de materiales de COMSOL. La gráfica en tres dimensiones mostrada nos da escalas de velocidad de fluido de 0 a 0,6 *m/s*, esto podría parecer contradictorio con los datos mostrados en la gráfica 12-3, donde sus valores van desde 0 a 0,07 *m/s*, esto se debe a que en la figura 11-3 se muestran los valores máximos y mínimos que alcanza el fluido dentro de la simulación. El fluido que se desliza sobre las paletas del agitador es el que tiene una velocidad de 0,6 *m/s*, mientras que el fluido que se aleja de estas pierde velocidad rápidamente. La grafica 12-3, representa la disposición promedio de velocidad del fluido.

Los resultados obtenidos nos dan un promedio de velocidad del fluido de 0,05 *m/s*, en el área correspondiente a la entrada del fluido al serpentín. La misma se puede observar en la figura 12-3. Donde el máximo corresponde a 0,07 *m/s*, que corresponde al fluido que se desliza fuera del agitador y el mínimo es 0, que corresponde a la capa limite sobre la superficie interna del cilindro. La velocidad del fluido que se encuentra cerca al eje del agitador permanece constante a 0,0248 *m/s*. La gráfica muestra la velocidad del fluido en relación a la distancia que hay entre la superficie del eje del agitador y la superficie interna del cilindro del evaporador.

Este perfil de agitación corresponde al valor promedio permitido para el homogeneizador, cuyo límite son 30 *rpm*. Como se puede observar la distribución del fluido es la correcta en la sección en la que se encuentra el serpentín del evaporador. Permitiendo estos resultados continuar con los cálculos de transferencia de calor.

## CONCLUSIONES

Como resultado del diagnóstico y la simulación realizada al proceso de evaporación, se concluye que es factible aplicar un sistema de control usando un PLC, debido a que se determinó que 3 variables operativas (temperatura, frecuencia o velocidad del motor y el tiempo) son suficientes para utilizar el evaporador de manera automática.

Se realizaron análisis de eficiencia térmica para el evaporador automatizado, y se obtuvo una eficiencia baja como intercambiador (12,63%), y como evaporador, donde se tomó en cuenta a la energía perdida en el evaporado, como energía útil, fue de 66,30% sin el sistema de control, y con el sistema de control aumento la eficiencia a 88,87%.

Las condiciones de operación optimas, obtenidas en base a la validación del evaporador, determina que para la producción de dulce leche: se requiere una temperatura media de evaporación de 92 °C, con un intervalo de control de  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ , lo que significa  $T_{\text{min}}=90^{\circ}\text{C}$  y  $T_{\text{max}}=94^{\circ}\text{C}$ . Con un tiempo operativo de 9 horas, solo con etapa de evaporación. Se produjo mermelada, de igual manera, y se comprobó que las temperaturas de operación eran las mismas, variando únicamente el tiempo 5 horas.

Con la medida de las temperaturas de las superficies de intercambio de calor (cilindro y serpentín), se pudo calcular el coeficiente global de transferencia de calor  $U = 1,7196 \text{ W/m}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Lo que arrojó una eficiencia de 66,30%, para el evaporador sin control.

El sistema de control aumento la facilidad de uso del evaporador, permitiendo monitorear y controlar las variables operativas hasta 6 operarios, sin necesidad de acceso directo al panel de control y un operario directo. Esto se debe al sistema de control inalámbrico implementado mediante red Wireless.

## **RECOMENDACIONES**

Se recomienda cuando se use el equipo de evaporación, cargar un volumen medio de la capacidad máxima determinada en este trabajo.

Es recomendable ingresar las temperaturas en el sistema de control (interface HMI y panel remoto), con una diferencia de 2 grados sobre la temperatura requerida para el límite máximo y de 4 grados para el límite inferior del intervalo de control.

Para el uso del equipo de evaporación se recomienda limpiar el soporte del motor para eliminar el polvo que se acumula y el material que pueda quedarse producto de la extracción del concentrado en operaciones previas.

Se recomienda ajustar los pernos con los que se sujeta el eje del motor para evitar parar el proceso y alargar el tiempo de proceso.

Recomendamos mejorar la red eléctrica y la de suministro de vapor y agua del laboratorio de procesos industriales. La red actual es insegura y en el caso de la red de agua no proporciona el caudal necesario.

## BIBLIOGRAFÍA

**ALAIS C., GODINA A.;** *Ciencia de la leche: principios de técnica lechera*. México DF-México. Reverté, 1985., pp. 118,119.

**ARIAS M., et al.;** “Determinación de coeficientes de transferencia de calor y masa en un agitador rotatorio para utilizarlo en procesos fermentativos”. *Revista Colombiana de Biotecnología* [En línea]; 2001;(Colombia), Vol. 3, núm. 1, pp. 1-12. [Consulta: 17 de mayo 2015]. ISSN: 1909-8758. Disponible en:  
<http://revistas.unal.edu.co/index.php/biotecnologia/article/view/30064>

**BAUDI S.;** *Química de los alimentos* [en línea]. Alhambra-España, Cuarta Edición, Pearson Educación. 2006, p. 605. [Consulta: 20 de mayo 2015]. Disponible en:  
[https://books.google.es/books?id=bW\\_ULacGBZMC&pg=PA691&dq=ALAIS+C.,+GODIN+A+A.;+Ciencia+de+la+leche:&hl=es&sa=X&ved=0CB0Q6AEwAGoVChMI6czmouLwxwIVASKQCh3A7Adr#v=onepage&q=ALAIS%20C.%20%20GODINA%20A.%3B%20Ciencia%20de%20la%20leche%3A&f=false](https://books.google.es/books?id=bW_ULacGBZMC&pg=PA691&dq=ALAIS+C.,+GODIN+A+A.;+Ciencia+de+la+leche:&hl=es&sa=X&ved=0CB0Q6AEwAGoVChMI6czmouLwxwIVASKQCh3A7Adr#v=onepage&q=ALAIS%20C.%20%20GODINA%20A.%3B%20Ciencia%20de%20la%20leche%3A&f=false)

**BOIX O., SAIGÍ M., et al.;** *Automatismos eléctricos programables* [en línea]. Cataluña-España, UPC, 1995, pp. 10-14. [Consulta: 15 de mayo 2015]. Disponible en:  
<https://books.google.es/books?id=8VjRHw9KuA8C&dq=BOIX+I.,+SAIG%C3%8D+M.,+et+al.;+Automatismos+el%C3%A9ctricos+programa&hl=es&sa=X&ved=0CDQQ6AEwAWoVChMIsszJ4-PwxwIVCheQCh2ayQoT>

**BOLTON W.;** *Programmable logic controllers* [en línea]. Oxford-Inglaterra. Newnes, 2015, pp. 17-40. [Consulta: 10 de mayo 2015]. Disponible en:  
<https://books.google.es/books?id=sDqnBQAAQBAJ&pg=PA63&dq=BOLTON+W.;+Programmable+logic+controllers&hl=es&sa=X&ved=0CCcQ6AEwAGoVChMI0szbluTwxwIVRQ-QCh2M4gl2#v=onepage&q=BOLTON%20W.%3B%20Programmable%20logic%20controllers&f=false>

**BOZZO F.;** Determinación de Coeficientes Convectivos en el Exterior de Evaporadores de Refrigeración Mediante Simulación. Santiago-Chile, 2011, p. 10. [Consulta: 10 de mayo 2015]. Disponible en: <http://www.repositorio.uchile.cl/handle/2250/1041912011>

**BRYAN, L., BRYAN E.;** *Programmable Controllers*. Texas-EEUU. Industrial Text and Videocompany, 1997, p. 6.

**CENGEL Y., PÉREZ J.;** *Transferencia De Calor*. Cuarta edición. México DF-Mexico, McGraw-Hill, Print, 2004. p. 441.

**CONTROLS F.;** *Control Valve Handbook*. Cuarta edición. Iowa-United States, Emerson Process Management, 2005, pp. 31-39, 117-146.

**INEN-ISO, N. T. E.** Instituto Ecuatoriano de Normalización. *NTE INEN*, 1898, vol. 1996. Disponible en: <http://www.normalizacion.gob.ec/>

**ELLIS G.;** *Control system design guide: using your computer to understand and diagnose feedback controllers*, Oxford-Inglaterra, Butterworth-Heinemann, 2012, pp. 210-453.

**FOUST A., et al.** *Principles of unit operations*, Ohio-United States, John Wiley & Sons. 2008. p. 241.

**GEANKOPLIS C.;** *Procesos de transporte y operaciones unitarias*, México DF-México, Ceca, 1999, pp. 548-555.

**GREENE R.;** *Válvulas: selección, uso y mantenimiento*. México DF-México, McGraw-Hill. 1989, pp. 216 – 229

**HELP.SOLIDWORKS.COM.;** *2011 Ayuda De SOLIDWORKS - Coeficiente De Transferencia De Calor Por Convección*. N.p., 2015. Web. 24 Aug. 2015. Tomado de: [http://help.solidworks.com/2011/spanish/SolidWorks/cworks/LegacyHelp/Simulation/AnalysisBackground/ThermalAnalysis/Convection\\_Topics/Convection\\_Heat\\_Coefficient.htm](http://help.solidworks.com/2011/spanish/SolidWorks/cworks/LegacyHelp/Simulation/AnalysisBackground/ThermalAnalysis/Convection_Topics/Convection_Heat_Coefficient.htm)

**HOLMAN, J.;** *Transferencia de calor*, España, Mc Graw-Hill, 1998, pp. 192–219.

**INEN 009, 2008.** *Leche cruda. Requisitos*. INEN. Quito-Ecuador. Disponible en: <http://normaspdf.inen.gob.ec/pdf/nte/9-5.pdf>

**JACK H.;** *Automating manufacturing systems with PLCs*, Ohio-United States, Lulu.com, 2010, pp. 24-35.

**KAMEN E.;** *Industrial controls and manufacturing*, Nevada-United States, Academic Press, 1999, pp. 47-63, 113-139, 141–163.

**KERN D.;** *Procesos de transferencia de calor*, México DF, Continental, 1999, pp. 111–148.

**MCCABE W., SMITH, J., et al.;** *Operaciones unitarias en ingeniería química*, New York, Séptima Edición, Mcgraw-Hill Interamericana. 2007, vol. 4, no 6, p. 482.

**MENDIBURU, H.;** *Automatización Medioambiental*. Lima, Perú, 2003, p. 11, 12, 13.

[Consulta: 10 de mayo 2015]. Disponible en:

[http://www.academia.edu/8273992/Automatizacion\\_Medioambiental](http://www.academia.edu/8273992/Automatizacion_Medioambiental)

**MONTES E.; TORRES R., et al.;** Aumento del punto de ebullición de soluciones modelos para jugo de caña de azúcar. *Temas Agrarios*, 2006, vol. 11, no 2. Disponible en:

<http://revistas.unicordoba.edu.co/ojs/index.php/temasagrarios/article/view/447>

**MOTT R., et al.;** *Mecánica De Fluidos Aplicada*. México: Prentice-Hall Hispanoamericana, 1996, p. 219.

**NISE N.;** *Sistemas de control para ingeniería*. México DF, *McGrawHill*. 2002, pp. 10-13.

**NTE INEN 0010:** Leche pasteurizada. Requisitos. INEN. Quito. 2012. Disponible en:

<http://normaspdf.inen.gob.ec/pdf/nte/10-5.pdf>

**NTE INEN 0378:** Conservas vegetales. Muestreo. INEN. Quito. 1979. Disponible en:

<http://normaspdf.inen.gob.ec/pdf/nte/378-1R.pdf>

**NTE INEN 0419:** Conservas vegetales. Mermelada de frutas. Requisitos. INEN. Quito. 1988.

Disponible en:

[http://www.normalizacion.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2014/NORMAS\\_2014/ACO/17122014/nte-inen-2825.pdf](http://www.normalizacion.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2014/NORMAS_2014/ACO/17122014/nte-inen-2825.pdf)

**NTE INEN 0700:** Manjar o dulce de leche. Requisitos. INEN. Quito. Disponible en:

<http://normaspdf.inen.gob.ec/pdf/nte/700-1.pdf>

**OGATA K., YANG Y.;** *Modern control engineering*, New York-United State, Prentice-Hall. 2002, pp. 53–70.

**ORREGO C.;** *Procesamiento de alimentos*. Manizales. Centro de publicaciones Universidad Nacional de Colombia, 2003, pp. 61–83.

**PARR E.;** *Programmable controllers: an engineer's guide*. Lodres-Inglaterra. Elsevier Newnes, 2003, pp. 152-210.

**SARAVACOS D., KOSTAROPOULOS A.;** *Handbook of food processing equipment*. New York-United States, Springer Science & Business Media, 2002, p. 454.

**SINGH R., HELDMAN D.;** *Introduction to food engineering*. Oxford-Inglaterra, Gulf Professional Publishing, 2001, pp. 547-549,554.

**SMITH C.;** *Control automático de procesos: teoría y práctica*. México. Noriega-Limusa. 1997, pp. 10-157.

**TORRES E., RETIRADO Y, et al.;** “*Coefficientes de transferencia de calor experimental para el enfriamiento de licor en intercambiadores de placas*”. *Revista de Ingeniería Mecánica* [en línea], 2014, vol. 17, no 1, pp. 68-77.[Consultado: 5 de mayo de 2015], ISSN 1815-5944, Disponible en:

[http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1815-59442014000100008&script=sci\\_arttext&tlng=en](http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1815-59442014000100008&script=sci_arttext&tlng=en)

ANEXOS

**ANEXO A**  
**Fotografías de evaporador sin sistema de control**

a.



b.



c.



**NOTAS**

- a. Vista frontal del evaporador
- b. Vista lateral del evaporador
- c. Vista trasera del evaporador

**CATEGORIA DEL DIAGRAMA**

- Certificado
- Aprobado
- Por Aprobar
- Por calificar
- Por verificar

**ESPOCH**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**  
**ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA**  
  
 PATIÑO ROBLES TEOBALDO AURELIO  
 VILLACIS ALEJANDRO MIGUEL HUMBERTO

Evaporador de simple efecto con serpentín sin sistema de control

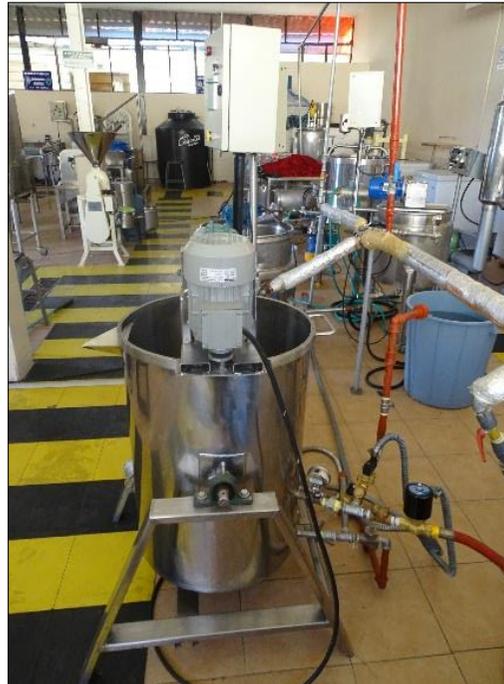
ESCALA	FECHA	LAMINA
A4	17/08/2015	1

**ANEXO B**  
**Fotografías de evaporado con sistema de control implementado**

**a.**



**b.**



**c.**



**NOTAS**

- a.** Vista frontal del evaporador
- b.** Vista lateral del evaporador
- c.** Vista trasera del evaporador

**CATEGORIA DEL DIAGRAMA**

- Certificado
- Aprobado
- Por Aprobar
- Por calificar
- Por verificar

**ESPOCH**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**  
**ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA**  
  
 PATIÑO ROBLES TEOBALDO AURELIO  
 VILLACIS ALEJANDRO MIGUEL HUMBERTO

Evaporador de simple efecto con serpentín con el sistema de control implementado

ESCALA	FECHA	LAMINA
A4	17/08/2015	2

**ANEXO C**

**Fotografías de panel de control construido e implementado para sistema de control del evaporador**

**a.**



**b.**



**NOTAS**

- a.** Vista externa de distribución de dispositivos de panel de control.
- b.** Vista interna de distribución de dispositivos de panel de control.

**CATEGORIA DEL DIAGRAMA**

- Certificado
- Aprobado
- Por Aprobar
- Por calificar
- Por verificar

**ESPOCH**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**  
**ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA**  
  
 PATIÑO ROBLES TEOBALDO AURELIO  
 VILLACIS ALEJANDRO MIGUEL HUMBERTO

Panel de control construido e implementado para sistema de control del evaporador.

ESCALA	FECHA	LAMINA
A4	17/08/2015	3

**ANEXO D**  
**Fotografías de elementos externos del panel de control**

a.



b.



c.



d.



**NOTAS**

- a. Modem/router – punto de acceso inalámbrico
- b. Pantalla HMI táctil
- c. Pulsadores para arranque, paro y reseteo de proceso
- d. Luces indicadores arranque y paro

**CATEGORIA DEL DIAGRAMA**

- Certificado
- Aprobado
- Por Aprobar
- Por calificar
- Por verificar

**ESPOCH**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**  
**ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA**  
  
 PATIÑO ROBLES TEOBALDO AURELIO  
 VILLACIS ALEJANDRO MIGUEL HUMBERTO

Elementos externos del panel de control

ESCALA	FECHA	LAMINA
A4	17/08/2015	4

**ANEXO E**  
**Fotografías de elementos internos del panel de control**

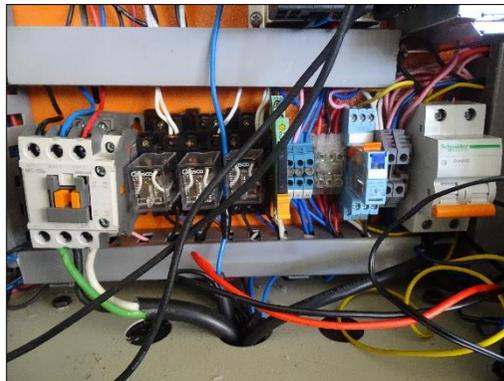
a.



b.



c.



**NOTAS**

- a. Controlador PLC
- b. Variador de frecuencia
- c. Relés

**CATEGORIA DEL DIAGRAMA**

- Certificado
- Aprobado
- Por Aprobar
- Por calificar
- Por verificar

**ESPOCH**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**  
**ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA**  
  
 PATIÑO ROBLES TEOBALDO AURELIO  
 VILLACIS ALEJANDRO MIGUEL HUMBERTO

Panel de control construido e implementado para sistema de control del evaporador.

ESCALA	FECHA	LAMINA
A4	17/08/2015	5

**ANEXO F**  
**Fotografías de elementos finales del sistema de control**

a.



b.



c.



**NOTAS**

- a. Válvula solenoide de control de flujo de vapor
- b. Válvula solenoide de control de flujo de agua
- c. Motor eléctrico trifásico para control de rpm

**CATEGORIA DEL DIAGRAMA**

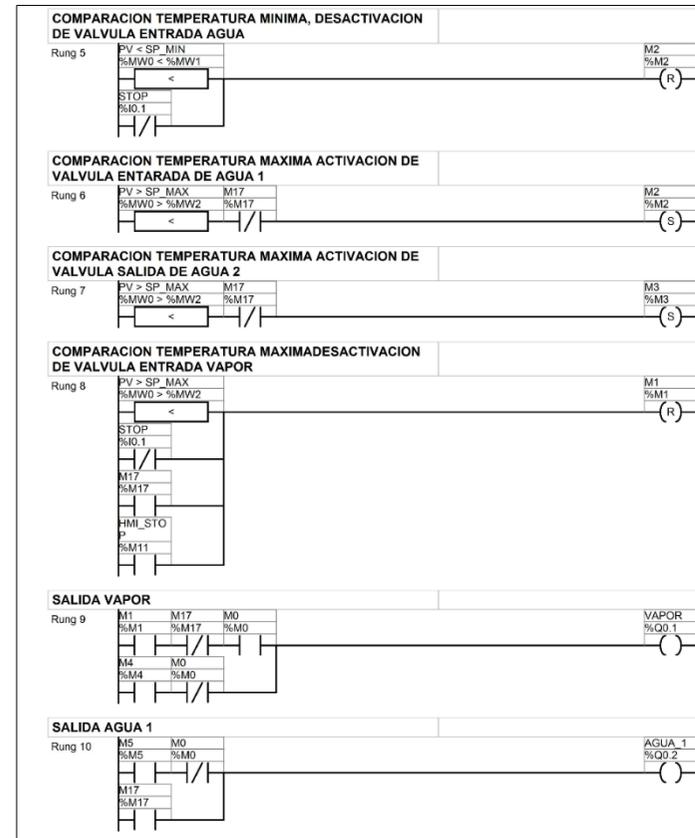
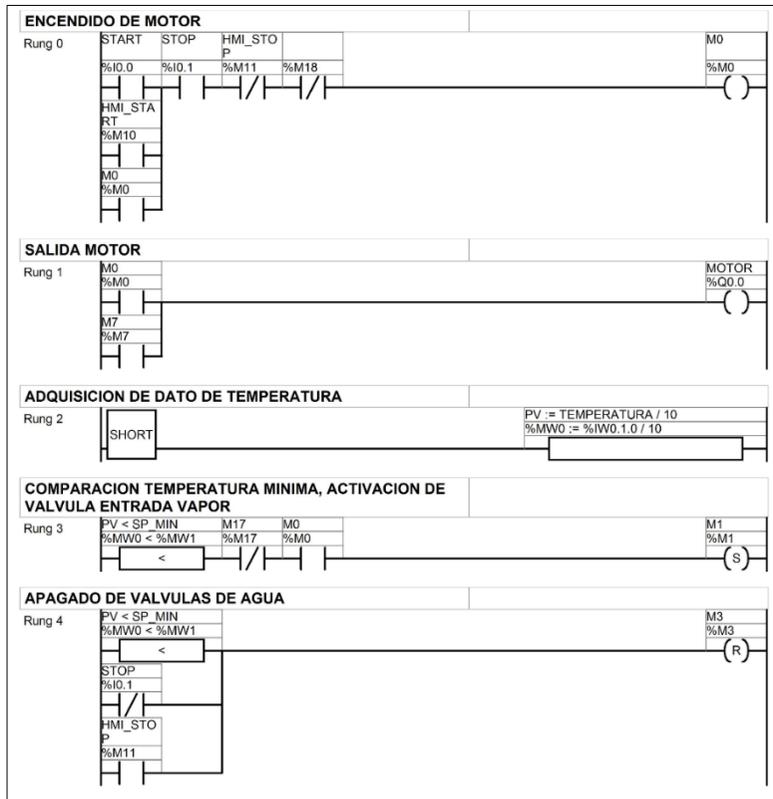
- Certificado
- Aprobado
- Por Aprobar
- Por calificar
- Por verificar

**ESPOCH**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**  
**ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA**  
  
PATIÑO ROBLES TEOBALDO AURELIO  
VILLACIS ALEJANDRO MIGUEL HUMBERTO

Elementos finales del sistema de control

ESCALA	FECHA	LAMINA
A4	17/08/2015	6

**ANEXO G**  
**Diagrama Ladder programado en el PLC, primera parte.**



**NOTAS**

Tercera parte del diagrama Ladder programado para el PLC Twido Schneider.

**CATEGORIA DEL DIAGRAMA**

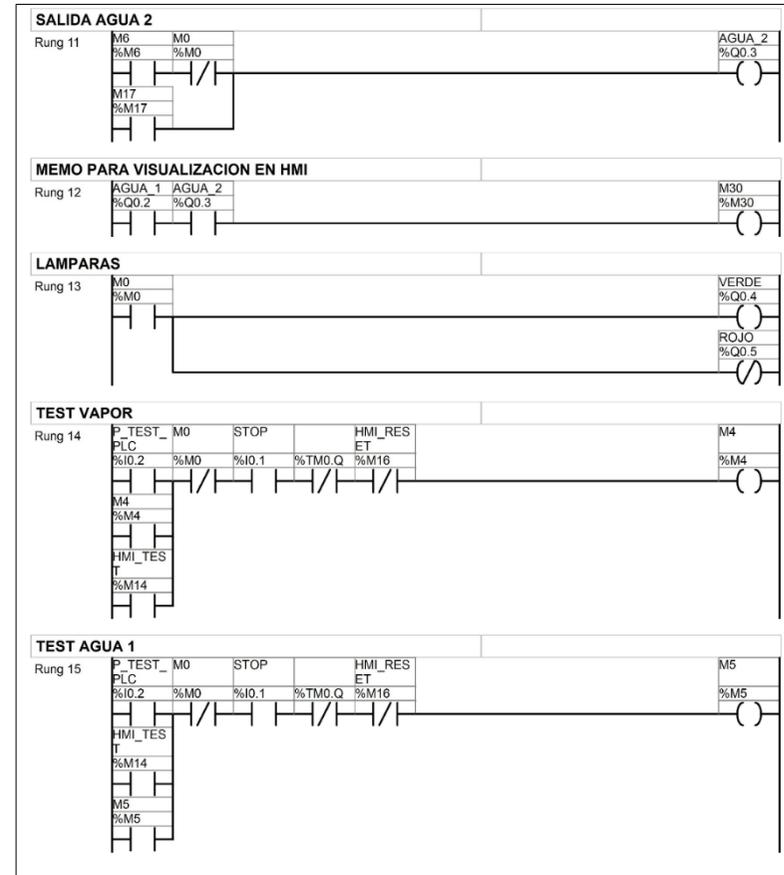
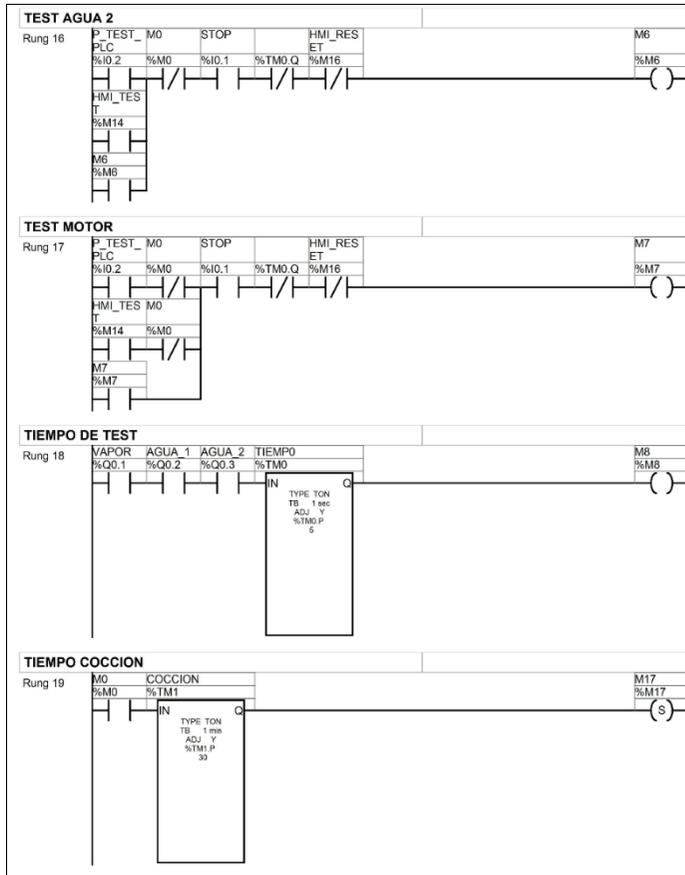
- Certificado
- Aprobado
- Por Aprobar
- Por calificar
- Por verificar

**ESPOCH**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**  
**ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA**  
  
PATIÑO ROBLES TEOBALDO AURELIO  
VILLACIS ALEJANDRO MIGUEL HUMBERTO

Elementos finales del sistema de control

ESCALA	FECHA	LAMINA
A4	17/08/2015	7

**ANEXO H**  
**Diagrama Ladder programado en el PLC, segunda parte.**



**NOTAS**

Tercera parte del diagrama Ladder programado para el PLC Twido Schneider.

**CATEGORIA DEL DIAGRAMA**

- Certificado
- Aprobado
- Por Aprobar
- Por calificar
- Por verificar

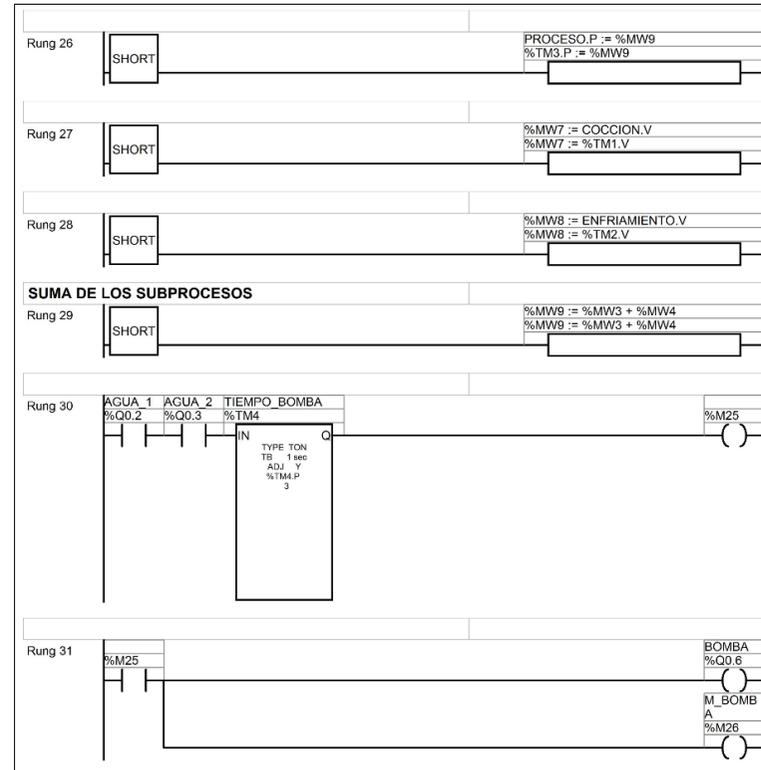
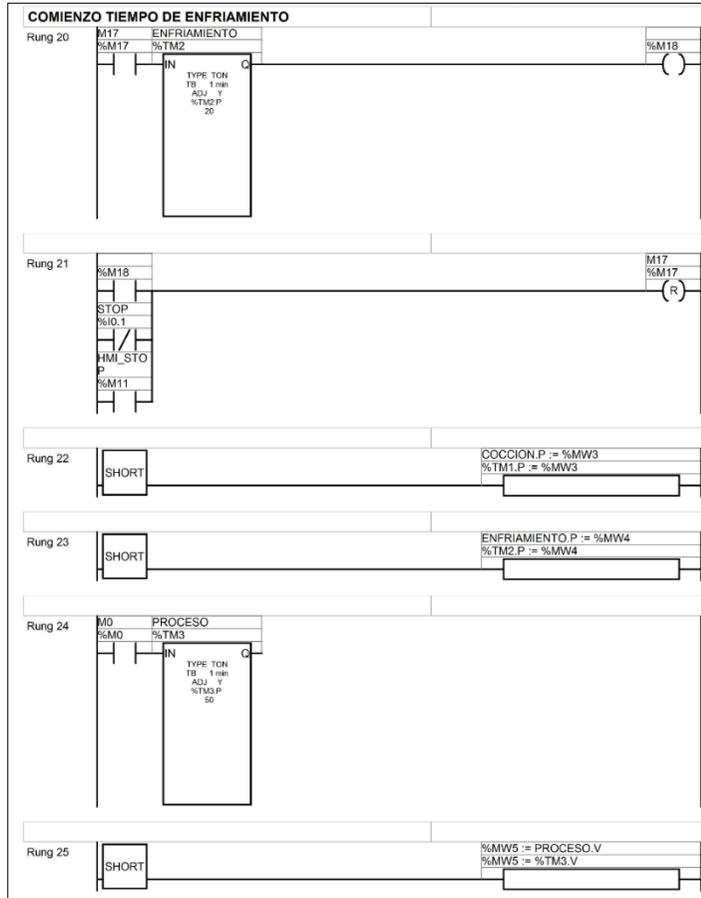
**ESPOCH**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**  
**ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA**  
 PATIÑO ROBLES TEOBALDO AURELIO  
 VILLACIS ALEJANDRO MIGUEL HUMBERTO

Diagrama Ladder programado en PLC, segunda parte.

ESCALA	FECHA	LAMINA
A4	17/08/2015	8

### ANEXO I

### Diagrama Ladder programado en el PLC, tercera parte.



#### NOTAS

Tercera parte del diagrama Ladder programado para el PLC Twido Schneider.

#### CATEGORIA DEL DIAGRAMA

- Certificado
- Aprobado
- Por Aprobar
- Por calificar
- Por verificar

**ESPOCH**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**  
**ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA**  
 PATIÑO ROBLES TEOBALDO AURELIO  
 VILLACIS ALEJANDRO MIGUEL HUMBERTO

Diagrama Ladder programado en PLC, tercera parte.

ESCALA	FECHA	LAMINA
A4	17/08/2015	9

**ANEXO J**  
**Interface gráfica de pantalla remota hecha Lookout 6.2**



**NOTAS**

Captura de pantalla de panel remoto hecho en Lookout 6.2, y funcionando en el ordenador del laboratorio de procesos industriales.

**CATEGORIA DEL DIAGRAMA**

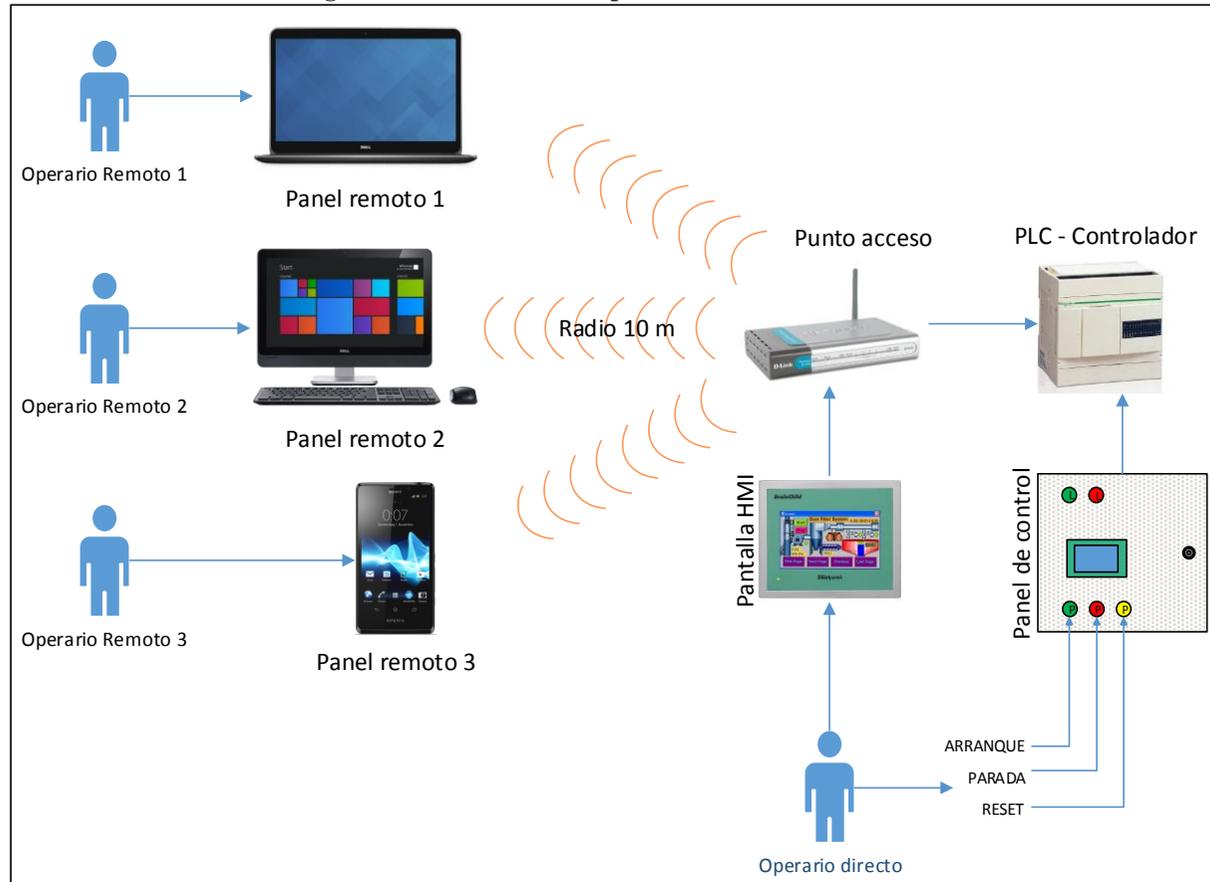
- Certificado
- Aprobado
- Por Aprobar
- Por calificar
- Por verificar

**ESPOCH**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**  
**ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA**  
 PATIÑO ROBLES TEOBALDO AURELIO  
 VILLACIS ALEJANDRO MIGUEL HUMBERTO

Pantalla de control implementada para ordenadores, en Lookout 6.2

<b>ESCALA</b>	<b>FECHA</b>	<b>LAMINA</b>
A4	17/08/2015	10

**ANEXO K**  
**Diagrama de conexión de dispositivos con controlador PLC**



**NOTAS**

Diagrama de acceso y conexión al controlador, para panel remoto, HMI y panel de control.

**CATEGORIA DEL DIAGRAMA**

- Certificado
- Aprobado
- Por Aprobar
- Por calificar
- Por verificar

**ESPOCH**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**  
**ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA**  
  
PATIÑO ROBLES TEOBALDO AURELIO  
VILLACIS ALEJANDRO MIGUEL HUMBERTO

Diagrama de conexión de dispositivos a PLC.

ESCALA	FECHA	LAMINA
A4	17/08/2015	11

ANEXO L

Pantallas implementadas en interface gráfica HMI Brainchild, primera parte

a.



b.



NOTAS

- a. Pantalla principal del menú HMI
- b. Pantalla menú de la interface HMI

CATEGORIA DEL DIAGRAMA

- Certificado
- Aprobado
- Por Aprobar
- Por calificar
- Por verificar

ESPOCH  
 FACULTAD DE CIENCIAS  
 ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA  
 PATIÑO ROBLES TEOBALDO AURELIO  
 VILLACIS ALEJANDRO MIGUEL HUMBERTO

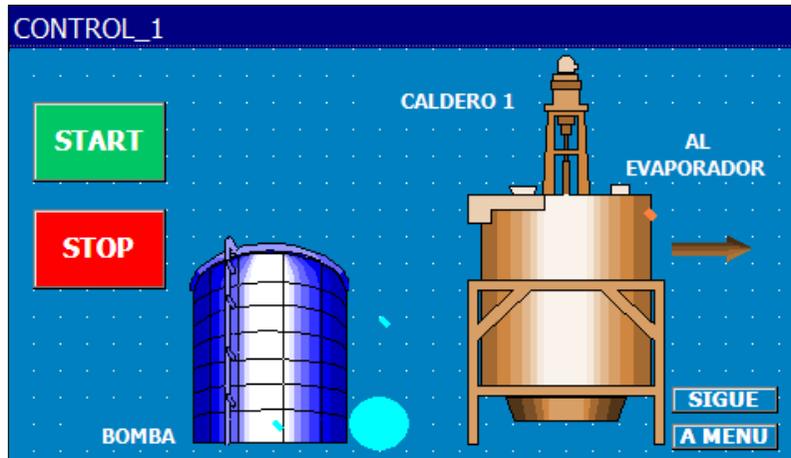
Pantallas implementadas en la interface hombre máquina.

ESCALA	FECHA	LAMINA
A4	17/08/2015	12

ANEXO M

Pantallas implementadas en interface gráfica HMI Brainchild, segunda parte

a.



b.



NOTAS

- a. Pantalla de control de arranque y parada
- b. Pantalla de asignación de datos (set points)

CATEGORIA DEL DIAGRAMA

- Certificado
- Aprobado
- Por Aprobar
- Por calificar
- Por verificar

ESPOCH  
 FACULTAD DE CIENCIAS  
 ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA  
 PATIÑO ROBLES TEOBALDO AURELIO  
 VILLACIS ALEJANDRO MIGUEL HUMBERTO

Pantallas implementadas en la interface hombre máquina.

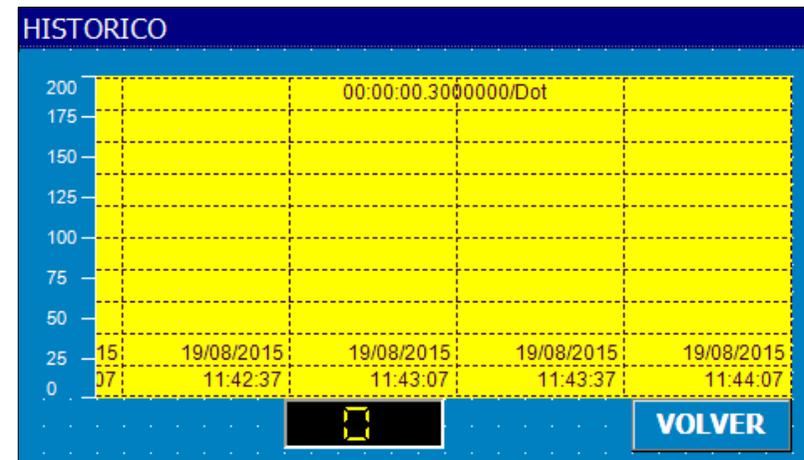
ESCALA	FECHA	LAMINA
A4	17/08/2015	13

**ANEXO N**  
**Pantallas implementadas en interface gráfica HMI Brainchild, tercera parte**

a.



b.



**NOTAS**

- a. Pantalla de prueba de dispositivos y elementos de control
- b. Pantalla para grafica de datos históricos

**CATEGORIA DEL DIAGRAMA**

- Certificado
- Aprobado
- Por Aprobar
- Por calificar
- Por verificar

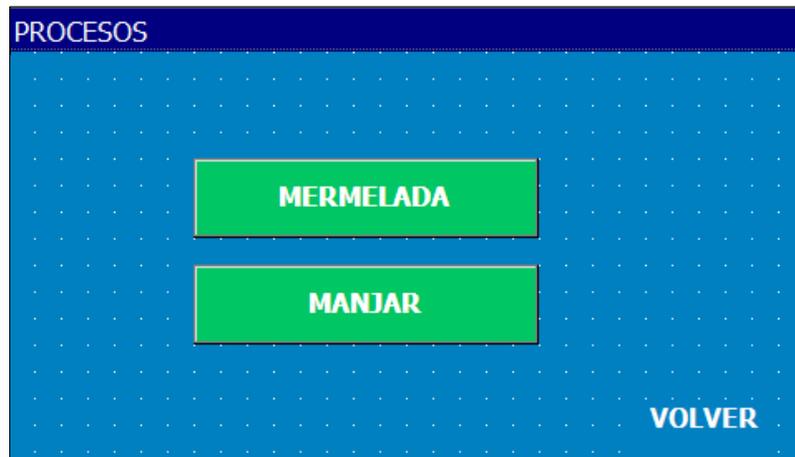
**ESPOCH**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**  
**ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA**  
 PATIÑO ROBLES TEOBALDO AURELIO  
 VILLACIS ALEJANDRO MIGUEL HUMBERTO

Pantallas implementadas en la interface hombre máquina.

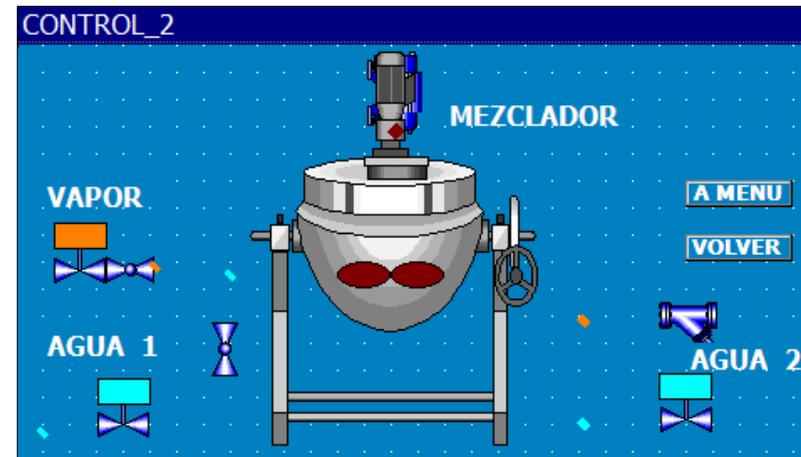
ESCALA	FECHA	LAMINA
A4	17/08/2015	14

**ANEXO O**  
**Pantallas implementadas en interface gráfica HMI Brainchild, cuarta parte**

a.



b.



**NOTAS**

- a. Pantalla de principal de presentación de recetas
- b. Pantalla de monitoreo de funcionamiento de válvulas, motor y bomba

**CATEGORIA DEL DIAGRAMA**

- Certificado
- Aprobado
- Por Aprobar
- Por calificar
- Por verificar

**ESPOCH**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**  
**ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA**  
  
 PATIÑO ROBLES TEOBALDO AURELIO  
 VILLACIS ALEJANDRO MIGUEL HUMBERTO

Pantallas implementadas en la interface hombre máquina.

ESCALA	FECHA	LAMINA
A4	17/08/2015	15

**ANEXO P**

**Pantallas implementadas en interface gráfica HMI Brainchild, quinta parte**

**a.**

**MERMELADA\_1**

**ELABORACION DE MERMELADA**

Recepción de la materia prima: La fruta se recepta previo muestreo e inspección, se pesa y almacena hasta el momento de la elaboración.

Selección: Se descarta las frutas que presentan daños físicos,

**Lavado: Con agua potable, sirve para eliminar las partículas extrañas adheridas a la fruta. Luego del**

Pelado y desmolido: Puede realizarse antes o después del blanqueado térmico. Se utiliza cuchillos de acero inoxidable o neladoras mecánicas. El nelado también puede ser químico, utilizando sosa cáustica y con vapor de agua o agua caliente.

**VOLVER SIGUIENTE**

**b.**

**ACERCA\_DE**

"DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL AUTOMATICO PARA SU IMPLEMENTACION EN EL EVAPORADOR DE SIMPLE EFECTO DEL LABORATORIO DE PROCESOS INDUSTRIALES."

**TESISTAS**

**TEOVALDO PATIÑO**  
**MIGUEL VILLACIS**

**COLABORADOR EN AUTOMATIZACION**

**ING. MARCO VITERI B. Ms C.**  
**mviterib@gmail.com**

**VOLVER**

<p><b>NOTAS</b></p> <p><b>a.</b> Pantalla de presentación de receta de mermelada</p> <p><b>b.</b> Pantalla de presentación de información sobre trabajo de titulación</p>	<p><b>CATEGORIA DEL DIAGRAMA</b></p> <p><input type="checkbox"/> Certificado</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Aprobado</p> <p><input type="checkbox"/> Por Aprobar</p> <p><input type="checkbox"/> Por calificar</p> <p><input type="checkbox"/> Por verificar</p>	<p align="center"><b>ESPOCH</b></p> <p align="center"><b>FACULTAD DE CIENCIAS</b></p> <p align="center"><b>ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA</b></p> <p align="center">PATIÑO ROBLES TEOBALDO AURELIO</p> <p align="center">VILLACIS ALEJANDRO MIGUEL HUMBERTO</p>	<p align="center">Pantallas implementadas en la interface hombre máquina.</p>			
			<b>ESCALA</b>	<b>FECHA</b>	<b>LAMINA</b>	
			A4	17/08/2015	16	

**ANEXO Q**  
**Ejemplo de matriz cuantitativa para determinación de variables sujetas a control**

Variables	Indicador/Sensor	Elemento final	Inestabilidad	Sensibilidad	rapidez	costo	Total
Variable a controlar 1	Indicador/sensor 1	elemento final 1	4	2	1	-2	5
Variable a controlar 2	Indicador/sensor 2	elemento final 2	3	1	3	-2	5
Variable a controlar 3	Indicador/sensor 3	elemento final 3	3	1	1	-1	4
Variable a controlar 4	Indicador/sensor 4	elemento final 4	2	1	1	-3	1
Variable a controlar 5	Indicador/sensor 5	elemento final 5	3	1	3	-3	4
Variable a controlar 6	Indicador/sensor 6	elemento final 6	3	1	3	-3	4
Variable a controlar 7	Indicador/sensor 7	elemento final 7	3	1	1	-4	1
Variable a controlar 8	Indicador/sensor 8	elemento final 8	1	1	1	-3	0
Variable a controlar 9	Indicador/sensor 9	elemento final 9	1	1	1	-1	2
Variable a controlar 10	Indicador/sensor 10	elemento final 10	1	1	1	-1	2
Variable a controlar 11	Indicador/sensor 11	elemento final 11	3	1	2	-3	3
Variable a controlar 12	Indicador/sensor 12	elemento final 12	1	1	1	-1	2
Variable a controlar 13	Indicador/sensor 13	elemento final 13	1	1	1	-3	0
Variable a controlar 14	Indicador/sensor 14	elemento final 14	2	1	1	-2	2
Variable a controlar 15	Indicador/sensor 15	elemento final 15	2	1	1	-2	2

**NOTAS**

Matriz de calificación de variables que serán sujetas a control. Los valores de calificación son: bajo 1, medio 2, alto 3 y muy alto 4. El costo se expresa con la misma escala pero con valores negativos.

**CATEGORIA DEL DIAGRAMA**

- Certificado
- Aprobado
- Por Aprobar
- Por calificar
- Por verificar

**ESPOCH**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**  
**ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA**  
  
 PATIÑO ROBLES TEOBALDO AURELIO  
 VILLACIS ALEJANDRO MIGUEL HUMBERTO

Tabla de determinación cuantitativa de variables sujetas a control.

ESCALA	FECHA	LAMINA
A4	17/08/2015	17

**ANEXO R**

**Ejemplo de matriz cualitativa para determinación de interacción entre variables a controlar**

	Variable a controlar 1	Variable a controlar 2	Variable a controlar 3	Variable a controlar 4	Variable a controlar 5	Variable a controlar 6	Variable a controlar 7	Variable a controlar 8	Variable a controlar 9	Variable a controlar 10	Total
Variable a controlar 1		x	x	x	x	x					5
Variable a controlar 2	x		x		x	x		x	x		6
Variable a controlar 3					x	x		x	x		4
Variable a controlar 4	x				x						2
Variable a controlar 5	x		x	x				x	x		5
Variable a controlar 6	x		x								2
Variable a controlar 7	x				x						2
Variable a controlar 8	x					x			x		3
Variable a controlar 9	x					x					2
Variable a controlar 10		x									1

**NOTAS**

a. Matriz de cualitativa de interacción de variables a controlar. Las marcas X representan que se relacionan entre sí, y pueden bajo estudio ser controladas de forma recíproca.

**CATEGORIA DEL DIAGRAMA**

- Certificado
- Aprobado
- Por Aprobar
- Por calificar
- Por verificar

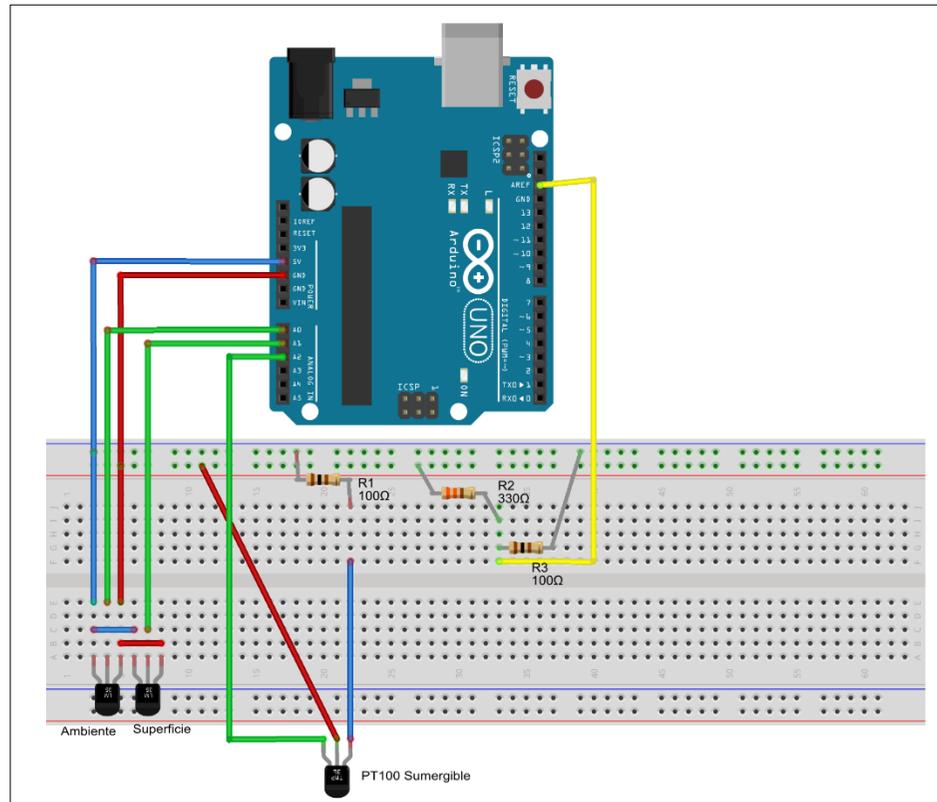
**ESPOCH**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**  
**ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA**  
  
 PATIÑO ROBLES TEOBALDO AURELIO  
 VILLACIS ALEJANDRO MIGUEL HUMBERTO

Tabla de determinación cualitativa de variables de sujetas a control.

ESCALA	FECHA	LAMINA
A4	17/08/2015	18

### ANEXO S

#### Diagrama de construcción de circuito de adquisición de datos de temperatura



#### NOTAS

Diagrama de conexión de circuito de adquisición de datos de temperatura con Arduino UNO.

#### CATEGORIA DEL DIAGRAMA

- Certificado
- Aprobado
- Por Aprobar
- Por calificar
- Por verificar

**ESPOCH**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**  
**ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA**  
 PATIÑO ROBLES TEOBALDO AURELIO  
 VILLACIS ALEJANDRO MIGUEL HUMBERTO

Diagrama de conexión de circuito de adquisición de datos de temperatura.

ESCALA	FECHA	LAMINA
A4	17/08/2015	19

**ANEXO T**  
**Práctica de validación de elaboración de dulce de leche (arequipe)**

**a.**



**b.**



**NOTAS**

- a.** Foto de proceso de elaboración de dulce de leche con el evaporador automatizado.
- b.** Foto de producto final obtenido elaboración de dulce de leche.

**CATEGORIA DEL DIAGRAMA**

- Certificado
- Aprobado
- Por Aprobar
- Por calificar
- Por verificar

**ESPOCH**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**  
**ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA**  
  
 PATIÑO ROBLES TEOBALDO AURELIO  
 VILLACIS ALEJANDRO MIGUEL HUMBERTO

Fotografías de práctica de validación para la elaboración de dulce de leche (arequipe).

ESCALA	FECHA	LAMINA
A4	17/08/2015	20