

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERIAS FISICAS Y FORMALES
PROGRAMA PROFESIONAL DE INGENIERIA ELECTRÓNICA



**“AUTOMATIZACIÓN DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DE AGUA
HACIA CALDERAS USANDO UN CONTROL PID, CON UNA
ALTERNATIVA EN CONTROL FUZZY EN EL ENTORNO GRAFICO
LABVIEW”**

**Tesis Presentada para Optar el Grado de
INGENIERO ELECTRÓNICO**

**Presentado por
BACHILLER FABRICIO RENATO MOSCOSO ALARCON**

AREQUIPA – PERU

2014

Dedicado a:

A Dios por la vida y lo más valioso que me ha podido dar mi familia.

Al término de esta etapa importante, no puedo dejar de agradecer a la memoria de mi Tío Martin que desde el cielo me guía, va mi agradecimiento con todo el amor del mundo a mis padres Ida, Maria, Santo y Emigdio, a mis Hermanos Julio y Luis, a mi Tío y Tías y mis primitos quienes están siempre a mi lado con su apoyo incondicional que en todo momento supieron darme.

INTRODUCCION

Actualmente el incremento de consumo de agua en nuestra sociedad es elevado, debido al crecimiento económico que estamos atravesando, como el incremento de nuevos centros comerciales, clínicas, hospitales, restaurantes, industrias, etc. Este incremento considerable de agua, nos hace pensar sobre la manera de poder ahorrar y hacer un uso consiente de este recurso.

No solo hacemos uso del agua en estado líquido, sino que al convertir en vapor lo utilizamos en turbinas que acopladas a bombas y compresores, participan de un ahorro eléctrico importante; vapor para el intercambio de calor en calentadores de fluidos; vapor como materia prima; vapor como medio de obtención de energía eléctrica, etc. Por ello, el uso eficiente y racional del agua presenta una elevada prioridad.

Uno de los grandes consumidores del agua son las empresas industriales y dentro de estas las caldera, las cuales constituyen equipos de gran aplicabilidad en la industria a escala mundial. El objetivo fundamental de esta clase de equipos consiste en transformar en energía térmica la energía química contenida en los combustibles fósiles mediante su combustión y transferirla al agua para generar múltiples actividades industriales, así como para alimentar de vapor a diversos procesos. Para mantener una elevada eficiencia en el funcionamiento de las calderas se necesita disponer de sistemas efectivos de alimentación de agua.

Las calderas en correspondencia con el contenido de sus tubos se clasifican en calderas de tubos de agua o acuotubulares y calderas de tubos de fuego o piro tubulares. Las calderas

acuotubulares son utilizadas principalmente cuando se requiere de elevadas cantidades de vapor, por ejemplo en centrales termoeléctricas. Por lo contrario, las calderas piro-tubulares se utilizan en procesos que no necesitan un elevado consumo de vapor. Este trabajo se centra en el sistema de alimentación de agua para estas dos clases de calderas ya que actualmente en Agroindustrial del Perú, se cuenta con dos calderas piro-tubulares y una acuotubulares.

El sistema de alimentación de agua a calderas implementado en Agroindustrial del Perú Grupo Gloria, es de cuatro bombas las cuales se encienden de forma manual, este control no hace que el sistema sea eficiente, lo que se traduce en un consumo mayor de agua y combustible.

Ya que estamos en la era de la automatización industrial, la necesidad de mejorar la efectividad de control de sistema de alimentación de agua a calderas, así como la introducción de las ventajas de la automatización en el proceso cada vez más complejos y exigentes, implementaremos un control PID, para el control de las cuatro bombas de alimentación de agua a calderas con un solo variador.

Los controles PID han venido siendo el estándar del control industrial, se caracteriza por generar la señal de control reaccionando al error ya producido (pasado), entre la salida medida y la referencia, este tipo de control es uno de los más usados en los procesos industriales, este tipo de control presenta buenas condiciones de desempeño para la mayoría de los procesos industriales tradicionales, una de las ventajas de este tipo de control es la diferentes implementaciones que se le puede dar desde circuitos electrónicos analógicos y/o digitales, pudiendo construirse controladores PID en gabinetes compactos y comerciales

individualmente como tal, lo que prácticamente asegura su permanencia y aplicación en diferentes procesos industriales. Sin embargo, la necesidad existe en mejorar la efectividad del control, así como de introducir las ventajas de la automatización en procesos cada vez más complejos y existentes. El control lógico difuso, presenta características que lo hacen adecuado para el mismo fin, salvo que es capaz de ofrecer un comportamiento altamente flexible y ajustarse a condiciones cambiantes como condiciones de desgaste y cambios ambientales. Su importancia radica en que permite responder a valores intermedios, de variables, pasando de dos opciones tradicionales de “frio-caliente”, “alto-bajo”, a opciones como “tibio” y “medio”, haciendo que los sistemas se acerquen a la forma de trabajar del cerebro humano.

El sistema de alimentación de agua hacia calderas es importante para el funcionamiento efectivo de las mismas, pudiendo lograr conseguir un ahorro de considerable de agua y solo utilizar lo necesario, este ahorro nos lleva también a ahorro de combustible y de los gases contaminantes del medio ambiente. Esta tesis presenta el siguiente objetivo:

Implementar un control PID para el sistema de alimentación de agua hacia calderas en Agroindustrial del Perú, para lo cual se usaran cuatro bombas y un solo variador.

Diseñar un sistema opcional en control Fuzzy en el entorno LabView y realizar su simulación de dicho control, para poder realizar una comparación de los dos controles desarrollados en este proyecto de Tesis. El sistema Fuzzy no será implementado físicamente en Agroindustrial del Perú, por motivos de que no se cuenta con los equipos ni software necesario para dicha implementación. Dejando esta alternativa abierta para poderla implementar a futuro.

INDICE GENERAL

INDICE

CAPITULO I: MARCO METOLOGICO	1
1.1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.2 Antecedentes del Sistema de Alimentación de Agua hacia Calderas.....	4
1.2.1 La automatización en sistema de alimentación de agua hacia calderas en el ámbito internacional.....	4
1.2.2 La automatización en sistema de alimentación de agua hacia calderas en el ámbito nacional.....	11
1.3 Justificación de Proyecto de Implementación de Agua Hacia Calderas	13
1.4 Objetivo de la Tesis.....	14
CAPITULO II: MARCO TEORICO	16
2.1 Introducción.....	16
2.2 Agua de Alimentación.....	16
2.2.1 Incrustaciones.....	17
2.2.2 Corrosión.....	19
2.2.3 Cantidad de Ph	22
2.2.4 Características del Agua	22
2.3 Sistema de Alimentación De Agua.....	23

2.3.1 Filtro de Entrada.....	24
2.3.2 Ablandador.....	27
2.3.3 Osmosis Inversa.....	29
2.3.4 Desmineralizador.....	31
2.3.5 Tanque Calentador.....	33
2.3.6 Tanque de Condensado.....	33
2.3.7 Desaireador.....	34
2.3.8 Tanque Diario.....	36
2.3.9. Bomba De Alimentación.....	37
2.3.10 Tanque de Químico.....	38
2.3.11 Bomba De Químico.....	39
CAPITULO III: DISEÑO DEL SISTEMA DE ALIMENTACION DE AGUA HACIA CALDERAS.....	41
3.1 Introducción.....	41
3.2 Sistema de Alimentación de Agua de Agroindustrial del Perú.....	43
3.2.1 Filtro.....	44
3.2.2 Ablandador.....	46
3.2.3 Tanque de Condensado.....	47
3.2.4 Tanque Desaireador.....	48
3.2.5 Tanque de Químico.....	49

3.2.6 Bomba de Químico.....	49
3.2.7 Bomba de Agua	50
3.3 Tablero Eléctrico.....	51
3.4 Líneas de Ingreso y Salida Tanque Desaereador	52
3.4.1 Ingreso de Condensado.....	52
3.4.2 Ingreso de Vapor	53
3.4.3 Salida de Condensado.....	53
3.5 Mejoras del Sistema de Alimentación de Agua Hacia Calderas de la Empresa Agroindustrial del Perú.....	54
3.5.1 Tablero Eléctrico.....	54
3.5.2 PLC – SIEMENS S7-300.....	55
3.5.3 Variador de Velocidad.....	69
3.5.4 Relé de Control	70
3.5.5 Contactores.....	71
3.5.6 Llave Termomagnetica.....	72
3.5.7 Válvula Proporcional.....	73
3.5.8 Sensor de Presión	74

<i>CAPITULO IV: IMPLEMENTACION Y PUESTA EN MARCHA DEL SISTEMA DE ALIMENTACION DE AGUA HACIA CALDERAS, CON CONTROL PID Y CONTROL FUZZY EN LABVIEW</i>	75
4.1. <i>Identificación del Proceso de Alimentación de agua hacia Calderas</i>	75
4.1.1 <i>Método de Identificación</i>	78
4.1.2 <i>Planificación Experimental e Identificación No Paramétrica</i>	81
4.1.3 <i>Preprocesamiento de los Datos Experimentales</i>	91
4.1.4 <i>Comprobación de los resultados obtenidos en la Identificación no paramétrica Utilizando Análisis por Correlación</i>	93
4.1.5 <i>Comprobación de los resultados Obtenidos en la Identificación no Paramétrica utilizando Análisis Espectral</i>	96
4.1.6 <i>Selección de la Estructura del Modelo</i>	100
4.1.7 <i>Validación y Selección del Modelo</i>	106
4.2 <i>Desarrollo de Control PID en Step 7 - SIEMENS</i>	123
4.3 <i>Implementación de la Estructura del Sistema de Alimentación de Agua Hacia Calderas</i>	157
4.4 <i>Puesta en Marcha del Sistema de Alimentación de Agua hacia Calderas</i>	161
4.5. <i>Implementación del Control Fuzzy en el Entorno LabView</i>	166
4.5.1 <i>Lógica Difusa</i>	166

<i>4.5.2 Teoría de Conjuntos Difusos</i>	167
<i>4.5.3 Funciones de Pertenencia</i>	169
<i>4.5.4 El Controlador Difuso</i>	170
<i>4.5.5 Fusificación</i>	171
<i>4.5.6 Base de Conocimiento</i>	172
<i>4.5.7 Inferencia</i>	172
<i>4.5.8 Desfusificación</i>	172
<i>4.5.9 Ejemplo Aplicación de Lógica Difusa</i>	173
<i>4.5.10 Agregación de Reglas</i>	176
<i>4.5.11 Estructura Del Sistema</i>	176
<i>4.5.12 Que es Labview</i>	177
<i>4.5.13 Comparación del Control PID implementado en un PLC S7-300 y Control Fuzzy implementado en el entorno LabView</i>	199
CONCLUSIONES	200
RECOMENDACIONES	203
BIBLIOGRAFIA	205
Anexos 1	209
Anexos 2	210
Anexos 3	211

FIGURAS

<i>Figura 1: Tratamiento de agua hacia calderas.....</i>	<i>5</i>
<i>Figura 2: Incrustaciones en tubos de humo.....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 3: Acumulación incrustaciones en fondo cuerpo presión caldera.....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 4: Corrosión por oxígeno o Pitting.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 5: Corrosión caustica en fogón de una caldera.....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 6: Sistema Completo de Alimentación de Agua para el Caldero.....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 7: Filtro de Agua.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 8: Filtro de pequeñas partículas de hasta 10 micras.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 9: Filtro de Carbón Activado.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 10: Filtro para Hierro.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 11: Tanque Ablandador.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 12: Osmosis Inversa.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 13: Equipo de Osmosis Inversa.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 14: Desmineralizador de Agua.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 15: Tanque Calentador.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 16: Desaireador.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 17: Tanque Diario.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 18: Bomba de Alimentación Calderas.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 19: Tanque de Químico.....</i>	<i>39</i>

<i>Figura 20: Bomba de Químico</i>	<i>40</i>
<i>Figura 21: Sistema de alimentación de agua hacia Calderas de Agroindustrial del Perú</i>	<i>43</i>
<i>Figura 22: Proceso de Filtrado de Agroindustrial del Perú</i>	<i>44</i>
<i>Figura 23: Ablandador de Agroindustrial del Perú.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 24: Tanque de Condensado Agroindustrial del Perú</i>	<i>48</i>
<i>Figura 25: Tanque Desaerador de Agroindustrial del Perú</i>	<i>48</i>
<i>Figura 26: Tanque de Químico de Agroindustrial del Perú</i>	<i>49</i>
<i>Figura 27: Bomba de Químico de Agroindustrial del Perú</i>	<i>49</i>
<i>Figura 28: Bomba de Agua de Agroindustrial del Perú.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 29: Tablero de control del sistema de Alimentación de Agua hacia Calderas</i>	<i>51</i>
<i>Figura 30: Interior Tablero de Control Sistema Alimentación Agua hacia Calderas.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 31: Tubería de Ingreso Vapor Tanque Desaerador.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 32: Tablero Eléctrico para Proyecto.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 33: Esquema de Equipos que controla el PLC SIEMENS.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 34: Diagrama de Control de un motor con PLC SIEMENS.....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 35: PLC Siemens S7-300</i>	<i>58</i>
<i>Figura 36: Fuente Alimentación Sitop PLC S7-300.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 37: CPU 315-2DP Siemens</i>	<i>60</i>
<i>Figura 38: Esquema Modulo Entrada Digitales Siemens.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 39: Asignación de los canales Entrada Digitales.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 40: Datos Técnicos Entradas Digitales</i>	<i>62</i>
<i>Figura 41: Esquema Modulo Salida Digitales Siemens.....</i>	<i>63</i>

<i>Figura 42: Datos Técnicos Salidas Digitales.....</i>	64
<i>Figura 43: Conexión y Características Módulos Entradas Analógicas.....</i>	65
<i>Figura 44: Conexión Módulos Entradas Analógicas con transductor de 2 -4hilos.....</i>	66
<i>Figura 45: Conexión y Características Módulos Salidas Analógicas.....</i>	67
<i>Figura 46: Conexión de Salidas Analógicas, modo señal de intensidad.....</i>	68
<i>Figura 47: Salidas Analógicas rango de tensión e intensidad.....</i>	68
<i>Figura 48: Variador de Velocidad 7.5KW Telemecanique.....</i>	69
<i>Figura 49: Relé de Control.....</i>	70
<i>Figura 50: Contactores del Proyecto.....</i>	71
<i>Figura 51: Llave termomagnetica.....</i>	72
<i>Figura 52: Válvula Proporcional Samson.....</i>	73
<i>Figura 53: Sensor de Presión.....</i>	74
<i>Figura 54: Esquema General de Identificación.....</i>	77
<i>Figura 55: Metodología de identificación.....</i>	80
<i>Figura 56: Sistema de Alimentación de Agua hacia Calderas de Agroindustrial del Perú, para la recolección de datos.....</i>	82
<i>Figura 57: Diagrama Tecnológico de la instalación experimental utilizada en la recolección de datos del proceso de variación de la presión del vapor.....</i>	83
<i>Figura 58: Análisis de ganancia Estática, en el que se grafica la salida del sistema en estado estacionario, para diversas magnitudes de la señal de entrada.....</i>	85
<i>Figura 59: Prueba paso escalón para una entrada entre 12.5% y 22.5% de apertura de válvula.....</i>	86

<i>Figura 60: Señal PRBS de excitación de la presión de vapor en la caldera. Amplitud entre 12,5% y 22,5% de apertura de valvula, $T_{min}=10\text{seg}$, $T_{max}=190$, $T_{prbs}=200\text{seg}$, duracion total=20seg</i>	<i>90</i>
<i>Figura 61: Respuesta de la presión del sistema de alimentación de agua hacia calderas frente a una señal de entrada tipo PRBS.....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 62: Pretratamiento de datos adquiridos.....</i>	<i>92</i>
<i>Figura 63: Respuesta impulso de la presión del sistema de alimentación de agua hacia calderas</i>	<i>96</i>
<i>Figura 64: Diagrama de Bode del sistema estudiado obtenido por análisis espectral.....</i>	<i>100</i>
<i>Figura 65: Localización de polos y ceros para el modelo estimado con estructura ARX y orden $n_a=2$, $n_b=2$, $d=7$.....</i>	<i>109</i>
<i>Figura 66: Localización de polos y ceros para el modelo estimado con estructura ARX y ordenes $n_a=3$, $n_b=3$, $d=7$.....</i>	<i>109</i>
<i>Figura 67: Localización de polos y ceros para el modelo estimado con estructura ARMAX y ordenes $n_a=2$, $n_b=2$, $n_c=2$, $d=7$.....</i>	<i>110</i>
<i>Figura 68: Localización de polos y ceros para el modelo estimado con estructura ARMAX y ordenes $n_a=3$, $n_b=3$, $n_c=3$, $d=7$.....</i>	<i>110</i>
<i>Figura 69: Localización de polos y ceros para el modelo estimado con estructura ARMAX y ordenes $n_a=4$, $n_b=4$, $n_c=4$, $d=7$.....</i>	<i>110</i>
<i>Figura 70: Validación cruzada del modelo ARX-[2 2 7] utilizado datos adquiridos para validación</i>	<i>111</i>

<i>Figura 71: Validación cruzada del modelo ARX-[3 3 7] utilizado datos adquiridos para validación</i>	<i>112</i>
<i>Figura 72: Validación cruzada del modelo ARMAX-[2 2 2 7] utilizado datos adquiridos para validación</i>	<i>112</i>
<i>Figura 73: Comparación de la respuesta impulsiva obtenida por correlación con la obtenida utilizando el modelo ARX-[2 2 7].....</i>	<i>114</i>
<i>Figura 74: Comparación de la respuesta impulsiva obtenida por correlación con la obtenida utilizando el modelo ARX-[3 3 7].....</i>	<i>114</i>
<i>Figura 75: Comparación de la respuesta impulsiva obtenida por correlación con la obtenida utilizando el modelo ARMAX-[2 2 2 7]</i>	<i>115</i>
<i>Figura 76: Comparación de la respuesta frecuencial obtenida por análisis espectral con la obtenida utilizando el modelo ARX-[2 2 7].....</i>	<i>115</i>
<i>Figura 77: Comparación de la respuesta frecuencial obtenida por análisis espectral con la obtenida utilizando el modelo ARX-[3 3 7].....</i>	<i>116</i>
<i>Figura 78: Comparación de la respuesta frecuencial obtenida por análisis espectral con la obtenida utilizando el modelo ARMAX-[2 2 2 7].....</i>	<i>116</i>
<i>Figura 79: Correlación cruzada entre la entrada de excitación y los residuales de la salida de la planta y auto correlación de los residuales de la salida de la planta para el modelo ARX-[2 2 7].....</i>	<i>117</i>
<i>Figura 80: Correlación cruzada entre la entrada de excitación y los residuales de la salida de la planta y auto correlación de los residuales de la salida de la planta para el modelo ARX-[3 3 7].....</i>	<i>117</i>

<i>Figura 81: Correlación cruzada entre la entrada de excitación y los residuales de la salida de la planta y auto correlación de los residuales de la salida de la planta para el modelo ARMAX-[2 2 2 7].....</i>	<i>118</i>
<i>Figura 82: Comparación de la respuesta a un escalón unitario del modelo identificado en tiempo discreto y la respuesta del modelo aproximado en tiempo continuo.....</i>	<i>122</i>
<i>Figura 83: Abrimos el Proyecto Step7.....</i>	<i>123</i>
<i>Figura 84: Hardware y CPU del Proyecto Step7.....</i>	<i>123</i>
<i>Figura 85 : Hardware del Proyecto Step7.....</i>	<i>124</i>
<i>Figura 86: Bloques de Programación del Proyecto.....</i>	<i>125</i>
<i>Figura 87: Boque Principal OB1 del Proyecto Step7.....</i>	<i>127</i>
<i>Figura 88: Tiempo de Ciclo del OB1 del Proyecto.....</i>	<i>129</i>
<i>Figura 89: OB35 del Proyecto.....</i>	<i>134</i>
<i>Figura 90: FC3 del Proyecto.....</i>	<i>136</i>
<i>Figura 91 FC2 del Proyecto.....</i>	<i>139</i>
<i>Figura 92: Diagrama de Programación de llamada de Instancia.....</i>	<i>140</i>
<i>Figura 93: Diagrama de Bloques Instancia.....</i>	<i>141</i>
<i>Figura 94: FB1 del Proyecto.....</i>	<i>142</i>
<i>Figura 95: UDT1 del Proyecto.....</i>	<i>142</i>
<i>Figura 96: DB1 del Proyecto.....</i>	<i>143</i>
<i>Figura 97: FB2 del Proyecto.....</i>	<i>145</i>
<i>Figura 98: FC2 del Proyecto.....</i>	<i>150</i>
<i>Figura 99: FC30 del Proyecto.....</i>	<i>151</i>

<i>Figura 100: FC1 del Proyecto.....</i>	<i>152</i>
<i>Figura 101: FC28 del Proyecto.....</i>	<i>154</i>
<i>Figura 102: FC5 del Proyecto.....</i>	<i>156</i>
<i>Figura 103: FC4 del Proyecto.....</i>	<i>157</i>
<i>Figura 104: Tablero eléctrico Inicial del proyecto.....</i>	<i>158</i>
<i>Figura 105: Tablero Eléctrico Nuevo del Proyecto.....</i>	<i>159</i>
<i>Figura 106: Línea de Ingreso Vapor Inicial.....</i>	<i>159</i>
<i>Figura 107: Línea de Ingreso de vapor Modificado.....</i>	<i>160</i>
<i>Figura 108: Bombas de Alimentación de Condensado a Calderas del Proyecto.....</i>	<i>161</i>
<i>Figura 109: Calibración de la válvula Proporcional de Ingreso Vapor.....</i>	<i>162</i>
<i>Figura 110: Programación del Variador de Velocidad.....</i>	<i>162</i>
<i>Figura 111: Descarga del Programa hacia el PLC S7-300.....</i>	<i>163</i>
<i>Figura 112: PC Adapter, para programar el PLC.....</i>	<i>163</i>
<i>Figura 113: Implementación de una Válvula Proporcional.....</i>	<i>164</i>
<i>Figura 114: Tablero Eléctrico Final del proyecto.....</i>	<i>164</i>
<i>Figura 115: Cambio de Tablero Antiguo por el Tablero Nuevo.....</i>	<i>165</i>
<i>Figura 116: Puesta en Marcha y Monitoreo del Programa con la CPU.....</i>	<i>165</i>
<i>Figura 117: Conjuntos Difusos.....</i>	<i>168</i>
<i>Figura 118: Función de Pertenencia.....</i>	<i>169</i>
<i>Figura 119: Estructura de la Lógica Difusa.....</i>	<i>170</i>
<i>Figura 120: Estructura de un Control Difuso detallado.....</i>	<i>171</i>
<i>Figura 121: Esquema General de Lógica Difusa.....</i>	<i>174</i>

<i>Figura 122: Función de pertenencia para Servicio</i>	<i>174</i>
<i>Figura 123: Función de pertenencia para Comida.....</i>	<i>175</i>
<i>Figura 124: Función de pertenencia para Restaurant.....</i>	<i>175</i>
<i>Figura 125: Estructura del Sistema Difuso</i>	<i>177</i>
<i>Figura 126: Entorno LabView</i>	<i>179</i>
<i>Figura 127: Panel Frontal del LabView.....</i>	<i>180</i>
<i>Figura 128: Diagrama de Bloque.....</i>	<i>181</i>
<i>Figura 129: Proyecto en entorno LabView</i>	<i>181</i>
<i>Figura 130: Panel Frontal del proyecto en entorno LabView.....</i>	<i>182</i>
<i>Figura 131: Diagrama de Bloque del proyecto en entorno LabView.....</i>	<i>182</i>
<i>Figura 132: Panel Frontal Final Proyecto en entorno LabView</i>	<i>183</i>
<i>Figura 133: Diagrama de Bloque Final de nuestro Proyecto en entorno LabView</i>	<i>184</i>
<i>Figura 134: Fuzzy System Designer</i>	<i>185</i>
<i>Figura 135: Fuzzy System Designer Pantalla</i>	<i>186</i>
<i>Figura 136: Función de pertenencia: Tiempo Resp Tq Calderas, Rapido Neg</i>	<i>188</i>
<i>Figura 137 : Función de pertenencia: Tiempo Resp Tq Calderas, Des. Neg</i>	<i>188</i>
<i>Figura 138 : Función de pertenencia: Tiempo Resp Tq Calderas, Cero.....</i>	<i>188</i>
<i>Figura 139 : Función de pertenencia: Tiempo Resp Tq Calderas, Desp Pos.....</i>	<i>189</i>
<i>Figura 140 : Función de pertenencia: Tiempo Resp Tq Calderas, Rap. Pos.....</i>	<i>189</i>
<i>Figura 141 : Función de pertenencia: Tq Caldera Error, Muy Neg.....</i>	<i>190</i>
<i>Figura 142 : Función de pertenencia: Tq Caldera Error, Semi Neg.....</i>	<i>190</i>
<i>Figura 143 : Función de pertenencia: Tq Caldera Error, Cero</i>	<i>190</i>

<i>Figura 144 : Función de pertenencia: Tq Caldera Error, Semi Pos.....</i>	<i>191</i>
<i>Figura 145 : Función de pertenencia: Tq Caldera Error, Muy Pos.....</i>	<i>191</i>
<i>Figura 146 : Función de pertenencia: Cambio Flujo, Muy Neg.....</i>	<i>192</i>
<i>Figura 147 : Función de pertenencia: Cambio Flujo, Med Neg.....</i>	<i>192</i>
<i>Figura 148 : Función de pertenencia: Cambio Flujo, Semi Neg.....</i>	<i>193</i>
<i>Figura 149 : Función de pertenencia: Cambio Flujo, No Cambia.....</i>	<i>193</i>
<i>Figura 150 : Función de pertenencia: Cambio Flujo, Semi Pos.....</i>	<i>193</i>
<i>Figura 151 : Función de pertenencia: Cambio Flujo, Med Pos.....</i>	<i>194</i>
<i>Figura 152 : Función de pertenencia: Cambio Flujo, Muy Pos.....</i>	<i>194</i>
<i>Figura 153 : Función de Pertenencia Proyecto.....</i>	<i>195</i>
<i>Figura 154: Regla control Fuzzy.....</i>	<i>196</i>
<i>Figura 155 : Pestaña test System Control Fuzzy LabView.....</i>	<i>197</i>
<i>Figura 156 : Simulación 1 de Control Fuzzy LabView.....</i>	<i>198</i>
<i>Figura 157 : Simulación 1 de Control Fuzzy LabView.....</i>	<i>198</i>

TABLAS

<i>Tabla 1: Características de Agua.....</i>	<i>22</i>
<i>Tabla 2: Equipos para alimentación de agua hacia caldero.....</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 3: Sistema de Alimentación de agua hacia Calderas de Agroindustrial del Perú</i>	<i>44</i>
<i>Tabla 4: Característica de Filtros multicapas.....</i>	<i>45</i>
<i>Tabla 5: Características de Filtro Carbón Activado</i>	<i>46</i>
<i>Tabla 6: Características de Bomba de Químico</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 7: Características de Bomba de Agua.....</i>	<i>51</i>
<i>Tabla 8: PLC S7-300 y módulos de entrada/salidas analógicas y digitales.....</i>	<i>57</i>
<i>Tabla 9: Datos Técnicos Rele de Control.....</i>	<i>70</i>
<i>Tabla 10: Datos técnicos Contactores.....</i>	<i>71</i>
<i>Tabla 11: Datos técnicos Llave Termomagnetica.....</i>	<i>72</i>
<i>Tabla 12: Datos Técnicos Válvula Proporcional Samson.....</i>	<i>73</i>
<i>Tabla 13: Datos Técnicos Sensor de Presión</i>	<i>74</i>
<i>Tabla 14: Ordenes de los polinomios $A(q)$, $B(q)$ y $C(q)$ y retardo de tiempo que se utilizan en el procesos de identificación paramétrica utilizando estructuras ARX y ARMAX</i>	<i>103</i>
<i>Tabla 15: Parámetros estimados del polinomio $A(q)$ para los modelos ARX y ARMAX.....</i>	<i>104</i>
<i>Tabla 16: Parámetros estimados del polinomio $B(q)$ para los modelos ARX y ARMAX.....</i>	<i>105</i>
<i>Tabla 17: Parámetros estimados del polinomio $C(q)$ para los modelos ARMAX.....</i>	<i>105</i>
<i>Tabla 18: Valor del error final de predicción (FPE) de los modelos estimados.....</i>	<i>108</i>
<i>Tabla 19: Índice de performance de los modelos ARX y ARMAX restantes</i>	<i>113</i>
<i>Tabla 20: Parámetros estimados del polinomio para los modelos ARX y ARMAX.....</i>	<i>121</i>

Tabla 21: Regla de Control Fuzzy..... 187



CAPITULO I: MARCO METOLOGICO

1.1 INTRODUCCIÓN

Un problema que enfrenta la humanidad es: “La escases de agua para consumo humano y para la producción”, es por eso que la Organización de las Naciones Unidas, busca centrar su atención en este tema y conmemora el Día Mundial del Agua, todos los 22 de Marzo. Su objetivo es concientizar sobre el uso del agua, fomentando comportamientos, métodos de trabajo y técnicas de producción que consuman menos agua.

El agua es un recurso finito, vulnerable e indispensable para la vida de los seres humanos y la naturaleza; es vital para la vida humana: usando el agua para beber, para producir nuestros alimentos, para sanear nuestro ambiente, como medio de transporte, para generar energía y mil otros fines. También es un insumo imprescindible en numerosos procesos productivos por lo que debe ser usado con moderación.

El 70,8% de la superficie terrestre está ocupada por agua, pero tan solo un 2,5% de toda el agua existente en el planeta es agua dulce, apta para el consumo. De este porcentaje la mayoría se encuentra inaccesible en glaciares, en los polos, etc., así que tan solo se dispone para consumo del 0,5% que es agua subterránea o superficial.

El destino aplicado al agua dulce consumida, varía mucho de una región a otra del planeta, incluso dentro de un mismo país. Por regla general, el consumo elevado de agua potable se da en países ricos y dentro de estos, los consumos urbanos duplican a los consumos rurales. A

nivel mundial, se extraen actualmente unos 3 600 km³ de agua dulce para consumo humano, es decir, 1.600 litros/hab-día, de los cuales, aproximadamente la mitad no se consume (se evapora, infiltra al suelo o vuelve a algún cauce) y, de la otra mitad, se calcula que el 65 % se destina a la agricultura, el 25 % a la industria y, tan solo el 10 % a consumo doméstico.

Para el caso del Perú, su consumo anual es aproximadamente de 20 072 millones de metros cúbicos por año, de los cuales 80% se emplean en actividades agrícolas, 18% son usados en servicios de agua potable y alcantarillado y usos industriales y 2% es empleado en la industria minera. El uso no consecutivo, que influye la generación de energía eléctrica, se estima en 11 139 Mm³/año.

El uso del agua en el sector industrial, se utilizada de diferente manera: para limpiar, calentar y enfriar; para la generación de vapor, como materia prima; como disolventes y como parte constitutiva del propio producto (industria de bebidas). Siendo la empresa Agroindustrial del Perú S.A.C., una empresa del sector alimenticio, el uso del agua tanto para su proceso, como para el funcionamiento de la planta en general es muy importante, desde la recepción de la materia prima (la leche), pasando por el almacenamiento de leche fresca, proceso de evaporación, almacenamiento de producto final y despacho del mismo, requieren del uso del agua en todas sus etapas para mantener la higiene e inocuidad del producto, así cumpliendo todos los requisitos que se exigen para una planta alimentaria.

Para el año 2025 se espera que la industria represente cerca del 24% del total de extracción de agua dulce, siendo este un recurso cada vez más escaso, es por ello que se toma como un desafío y preocupación el uso del agua.

Las causas masivas de este problema son la captación máxima y contaminación del agua, imaginemos que las empresas que utilizan el agua como materia prima o como insumo principal en sus procesos productivos o prestaciones de servicio, capten el agua contaminada y sean utilizada en proceso, esto traería consecuencias que se reflejarían en los consumidores.

Para mejorar en el uso del agua, se presenta tres pasos importantes a seguir y se aplicaran en esta investigación: La prevención, esto deben ser acciones como reducción del agua a utilizar en los proceso o vida diaria y reducción contaminación; la reutilización, como por ejemplo en otras actividades del proceso que las permitan y el tratamiento.

Con esto antes mencionado las empresas en la actualidad, se están preocupando cada vez más por la disposición del agua al final de sus procesos no solo por las ISO que se les da, sino porque cada vez es más rentable poder generar su propio abastecimiento de materia prima, además lo que toda empresa debe buscar es dar un mejor producto, de buena calidad y con menos agua.

Es por ello que las investigaciones relacionadas con el uso eficiente, racional e inteligente del agua presenta una elevada prioridad. Desarrollar tecnologías, así como sistemas de vida y trabajo que ahorren agua, constituyen elementos importantes para lograr un auténtico desarrollo, que se pueda llamar sostenible.

1.2 Antecedentes del Sistema de Alimentación de Agua hacia Calderas

1.2.1 La automatización en sistema de alimentación de agua hacia calderas en el ámbito internacional

Entre los grandes consumidores de agua se encuentran las calderas (generadores de vapor), debido a que estos equipos son utilizados en una gran cantidad de aplicaciones industriales y sociales, que van desde el calentamiento y acondicionamiento de aire en sistemas de ventilación de casas, grandes edificios e instalaciones comerciales, hospitales, industrias, hasta la producción de energía eléctrica en centrales termoeléctricas.

Hasta principios del siglo XIX se usaron calderas para teñir ropas, producir vapor para limpieza, etc., hasta que Papin creó una pequeña caldera llamada "marmita". Posteriormente, se usó vapor para intentar mover la primera máquina, la cual no funcionaba durante mucho tiempo ya que utilizaba vapor húmedo (de baja temperatura) y al calentarse ésta dejaba de producir trabajo útil.

Luego de otras experiencias, James Watt completó una máquina de vapor de funcionamiento continuo, que usó en su propia fábrica, ya que era un industrial inglés muy conocido.

La máquina elemental de vapor fue inventada por Dionisio Papin en 1769 y desarrollada posteriormente por James Watt en 1776.

Inicialmente las calderas fueron empleadas en estas máquinas de vapor que eran utilizadas para accionar bombas de agua de cilindros verticales. Ella fue la impulsora de la revolución industrial, la cual comenzó en ese siglo y continúa en el nuestro.

Una etapa importante del funcionamiento de las calderas es el tratamiento del agua de ingreso, el agua de alimentación de calderas desempeña un papel importante para el correcto funcionamiento de los generadores de vapor. Puesto que este tipo de dispositivos está en uso las 24 horas del día, un correcto tratamiento del agua de alimentación de calderas permite evitar o reducir las averías y tiempos de parada.

Para el correcto tratamiento de agua de alimentación de agua hacia calderas, se utilizan distintos dispositivos que garantizan la buena calidad de agua, estas mejoras al igual que las calderas fueron evolucionando, esta etapa de tratamiento de agua es controlar el Ph, dureza, oxígeno, hierro, cobre, aceite, fosfato, solidos disueltos, solidos, sílice, alcalinidad y conductividad.

El tratamiento del agua hacia calderas es muy importante, así se mejora la eficiencia de la caldera, en la siguiente figura se mostrara los equipos que intervienen en el tratamiento del agua en una planta térmica.

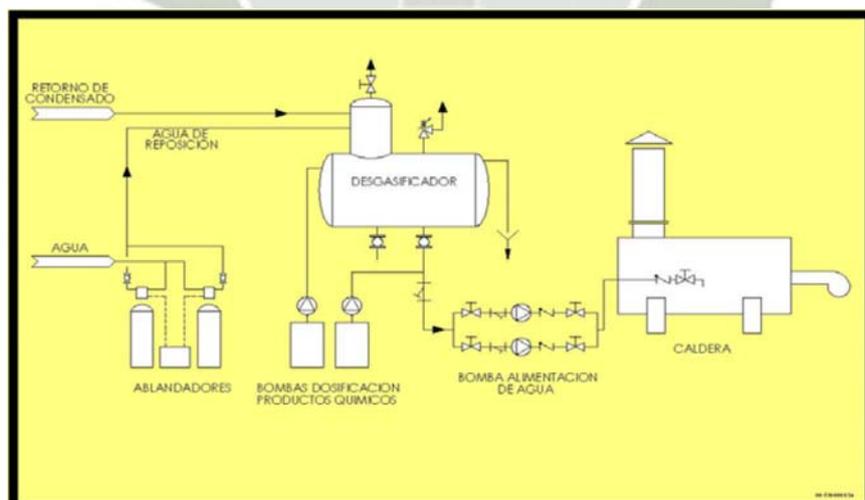


Figura 1. Tratamiento de agua hacia calderas.

En la Figura 1, se muestra etapas que conforman un sistema de tratamiento de agua hacia calderas, que al igual que las calderas, también fueron evolucionando.

Dividiremos en diferentes etapas que son: Etapa Desgasificador o Desaireador, etapa de ablandadores, etapa de bombas dosificadoras de productos químicos y etapa del sistema de bombas de alimentación de agua hacia calderas. Cada una de estas etapas es muy importante para el buen funcionamiento no solo del sistema de alimentación, sino que también para las mismas calderas. Cada etapa mencionada es muy importante ya que cumple un rol específico dentro del proceso que se explicara más adelante.

La evolución de esta etapa de tratamiento de agua hacia calderas lo toma con mucha importancia no solo las empresas que hacen uso de ellas sino que también empresas dedicadas a mejorar sus productos, es por eso que empresas como Cleaver Brooks, Spirax Sarco, Lenntech, Prominent, etc., invierten en nuevas tecnologías que son utilizadas en grandes empresas Europeas las cuales necesitan cada día más, producir más con un buen acabado y gastando menos.

En la actualidad estamos tratando de ahorrar no solo por el calentamiento global sino también por las diferentes instituciones y normas, que velan por el uso adecuado de los recursos no renovables.

En las grandes industrias modernas a nivel mundial tienen múltiples calderas que no son del mismo tamaño y que no operan bajo las mismas demandas, es por eso que un buen control y diseño de una etapa de tratamiento de agua hacia calderas es muy importante. Mediante la

automatización de este sistema de tratamiento de agua hacia caldera y proveyendo información, las plantas pueden coordinar mejor la producción e incrementar la eficiencia operacional y la disponibilidad de los equipos.

Uno de los grandes beneficios de la modernización de un sistema de control consiste en la reducción significativa de los costos de operación y mantenimiento. Con los controles manuales, las empresas anteriormente debían de contar con mucho personal las 24 horas del día que monitorear el sistema y que responda a problemas que se presenten, es por esto que las grandes empresas del primer mundo, apostaron por controles automáticos, muchos de los problemas pueden ser resueltos por el mismo sistema y en último caso sistemas de mensajería en línea pueden notificar a los operarios designados en la activación de alarmas. Esto permite aprovechar al personal en otras tareas y que usen sus recursos más eficientemente.

En un comienzo el sistema de control de tratamiento de agua hacia caldera se controlaba manualmente por un operario, la operación y control de este proceso variaba de acuerdo al turno de trabajo, ya que cada operario de este control tenía un criterio para el control de este proceso. Este sistema resulto no muy exacto por los turnos de trabajo.

Posteriormente se cambia a los controles On/Off o control de dos estados. Esto se conseguía mediante el uso de sensores de presión en la línea, este sistema era ineficiente ya que se tenía un gasto excesivo, prendiéndose todas las bombas a la vez, a su máxima carga ocasionando un gasto en el consumo de corriente y por tiempos cortos lo cual desgastaba al equipo en su función de prendido y apagado a su máxima carga. Si se quería un control independiente el

gasto era instalar un sensor de presión para un control independiente del motor y hacer la lógica cableada para su prendido de acuerdo al requerimiento.

Posteriormente se utilizaron controladores de 3 estados los cuales utilizaban una presión "base" del encendido de las bombas de alimentación de agua a calderas, así evitando su permanente conexión y desconexión. Sin embargo, pronto fueron desechados una que no ofrecían un suministro constante de agua, por las continuas fluctuaciones tanto en presión como en flujo.

Con estas tecnologías de desarrollo una opción importante para la solución de este problema y que las empresas aplicaron y desarrollaron equipos especializados para este control es el control PID, el cual fue evolucionando y cada vez más especializado, con un control PID de lazo simple se vieron avances los cuales sobresalieron a comparación de los controles utilizados anteriormente, pero aún se seguía presentando problemas por la inestabilidad del control, es por eso que los controles PID fueron evolucionado cada vez más y los sistemas de tratamiento de agua se van haciendo más eficientes, ahorrando agua, vapor y recursos que benefician y optimizan el proceso.

Empresas dedicadas al control de calderas y tratamiento de agua como son Cleaver Brooks o Spirax Sarco, presentan alternativas en el control de sistema de tratamiento de agua hacia calderas, presentando una infraestructura completa, en la cual se recomienda válvulas proporcionales, reguladoras, drenadores, trampas de vapor, válvulas de diferentes tipos y controladores los cuales puedan optimizar su proceso, estos paquetes son utilizados por grandes empresa. Es así que SAMSON también ofrece tecnología para este proceso, sus

válvulas, controladores, etc., son parte muy importante, que desarrollan y ponen a prueba en sus laboratorios y dan muestra de su grado de eficiencia.

Así mismo diferentes empresas en el mundo están dedicadas a mejorar equipos específicos del sistema de control de alimentación de agua hacia calderas, como por ejemplo NST empresa que desde 1995, brinda nuevas tecnologías que mejoran los tanques Desaeradores que cumplen un papel importante en el sistema de tratamiento de agua. ACHS es una empresa dedicada a la tecnología y mejoramiento de los tanques Ablandadores, así como estas empresas numerosas empresas se dedican a ir mejorando etapas del sistema de control de alimentación de agua hacia calderas.

El control PID es el control más utilizado y perfeccionado por las empresas, presentando innovaciones en sus controladores que facilitan la comprensión de los controladores siendo cada vez la interface más amigable, es por ejemplo el caso de las marcas: SAMSON, Spirax-Sarco, ABB, Festo, SMC, etc., que ofrecen controladores que con solo instalados en el lugar y detallando algunos parámetros se auto ajustan solos para el trabajo, estos controladores son confiables pero de precio elevado en el mercado y con el inconveniente que solo controlan un equipo, como una válvula, motores, etc., presentando un problema muy grande al momento de nosotros poseer diferentes equipos dentro del control de sistema de alimentación de agua hacia calderas, es decir si poseemos tres válvulas y tres motores, el precio se multiplicaría por seis, este costo es muy elevado y difícil de asumir por empresas con bastantes equipos y siendo aprovechado por grandes empresas que pueden costear este gasto de una sola vez.

Una alternativa es el control Fuzzy, este tipo de control se utiliza en diferentes procesos pero no es muy utilizado en el sistema de tratamiento de agua, este control tiene un comportamiento mucha más precisa que el control PID. El control Fuzzy tiene su origen en los sistemas basados en reglas para la toma de decisiones y en la fuzzy logic para la evaluación de aquellas.

A mediados de la década del 60 el profesor Lotfi Zadeh, de la Universidad de California en Berkeley, introdujo su teoría de los conjuntos fuzzy, donde la idea de pertenencia de un elemento a un determinado conjunto no era ya pertenece o no pertenece, sino que pertenece en un cierto grado. Las funciones que vinculan al elemento con su grado de pertenencia, se llaman membership functions.

Los controles fuzzy, al igual que otros, toman los valores de las variables de entrada, realizan algún procedimiento con ellas, deciden como modificar las variables de salida y lo realizan, afectando estas últimas a la planta. La diferencia esencial es que no procesan ecuaciones ni tablas, procesan reglas para decidir cómo cambiar las salidas. Esto lo hace una tecnología muy accesible, ya que las reglas está más cerca del sentido común que de las ecuaciones y los modelos.

Esto se debe a que se reconstruyó nuevamente toda la teoría de conjuntos, redefiniendo inclusión, unión, operadores lógicos, otras operaciones y sus propiedades.

Diferentes laboratorios, centros de investigación y universidades están desarrollando poco a poco este control poniendo a prueba en plantas educativas o de baja producción.

Como se aprecia, en el ámbito internacional el desarrollo de estrategias de control para la automatización efectiva del sistema de tratamiento de agua hacia calderas ha sido tratado por diferentes autores y empresas, constituyendo un área de continua investigación. Sin embargo, se requiere mejorar la eficiencia del sistema de tratamiento de agua hacia calderas, debido a la amplia importancia que tiene mejorar esta etapa para el ahorro y aprovechar la eficiencia del agua y vapor en esta parte del proceso. El por esto que se ha escogido realizar una mejora en el sistema de alimentación de agua hacia calderas en la empresa Agroindustrial del Perú S.A.C, presentando dos alternativas que puedan ayudar a su desarrollo como el control PID y control Fuzzy.

1.2.2 La automatización en sistema de alimentación de agua hacia calderas en el ámbito nacional

La automatización en el Perú va evolucionando cada día más en todos los ámbitos, pero el sistema de alimentación de agua hacia calderas no es un tema que se ha desarrollado mucho, es una de las áreas de investigación que recién comienza a desarrollarse y que propone ser un campo de gran expansión debido a las grandes ventajas que pueden reportar estas investigaciones en el aumento de la fiabilidad en el funcionamiento de esta clase de equipos, no solo en el sistema de alimentación de agua hacia calderas sino que en todo el conjunto que es la generación de vapor, es por esto que es un campo también en desarrollo el control de las calderas con sistemas automáticos, el desarrollo de la automatización en estos sistemas mejora la eficiencia de energía y ahorro de recursos que es lo que las empresas actualmente

buscan. En el Perú se cuentan con más de 50 fabricantes de calderas entre fabricantes formales e informales y de las cuales menos del 10% se dedican a desarrollar el sistema de alimentación de agua hacia calderas.

En Arequipa el sistema de alimentación de agua hacia calderas, no es tema de investigación, lo que las empresas buscan es tener una mejor calidad del agua de alimentación hacia calderas, con dosificación de componentes químicos que me garantizan la calidad del agua, pero dejando de lado la eficiencia de alimentación siendo esto todavía un sistema de control manual.

La mayoría de las empresas en Arequipa como Agroindustrial del Perú, Gloria, Kola Real, etc., tienen un operador de sala calderas el cual prende y apagan las bombas de alimentación de agua hacia calderas de forma manual o cada caldera posee una bomba de alimentación de agua la cual esta prendida las 24 horas con un sistema de drenaje para nivel alto, esto ocasiona un desgaste de máquina, así como un desgaste de las sustancias químicas utilizadas para el tratamiento del agua. Los operadores encargados de esta tarea tiene que estar pendientes del nivel o presión en el sistema para poder prender o apagar las bombas, si por algún motivo el operador descuida el sistema de alimentación, puede ocasionar que las calderas se apaguen por bajo nivel, esto ocasiona problemas en procesos críticos que dependen del sistema vapor, ya que las calderas se demoran más de tres minutos en prender. Como en el proceso de Agroindustrial del Perú en donde es necesario mantener a temperaturas elevadas muchas partes del proceso de evaporación de leche, está perdida de temperatura puede ocasionar pérdidas significativas en todo el proceso.

Se observa que fundamentalmente los sistemas de control utilizados en el ámbito nacional son muy riesgosos, por lo que existen muchas mejoras por realizar en este campo de automatización. La inclusión de sistemas de control PID puede mejorar grandemente la eficiencia del sistema de alimentación de agua hacia calderas. La inclusión de sistemas de control avanzado como el control Fuzzy, en el funcionamiento de las mismas puede representar mejoras mucho más importantes en la operación y mantenimiento de estos equipos.

1.3 Justificación de Proyecto de Implementación de Agua Hacia Calderas

Como se mencionó en los puntos anteriores, el Sistema de Alimentación de Agua hacia Calderas en la Industria no está muy desarrollado. En este proyecto se mejorara este Sistema para la empresa Agroindustrial del Perú – Pedregal, que es parte del Grupo Gloria, desde sus inicios de producción de dicha planta este sistema se manejó de forma manual por los operarios de sala maquinas durante las 24 horas del día por los 365 días del año, el operador de sala maquinas aparte de monitorear el proceso del funcionamiento de sala Calderas, también es encargado de monitorear, sistema de generación de Frio, Sistema de tratamiento de agua, cambio de filtros para el agua, revisión de la sala de compresores de Amoniaco, monitoreo de la sala de generación de aire comprimido, monitoreo de la Subestación eléctrica, revisión diaria de la operatividad de los Grupos Electrógenos, monitoreo de sistema contra incendio y organizar el abastecimiento de Combustible D2 y R500 y en todas estas tareas llena formatos para su control y revisión.

Todas las tareas asignadas para el operador de sala maquinas la realiza una sola persona por turno, este es un punto crítico ya que al momento de presentarse un problema en cualquiera de estas áreas el operador de sala maquinas descuida las demás. El sistema de Alimentación de Agua hacia Calderas es un punto crítico ya que al dejar sin agua a las calderas estas pueden parar la generación de vapor y afectar el proceso o en caso no funcione adecuadamente los sistema de protección de las calderas estas pueden ocasionar un desastre en planta.

Es por estos motivos que para esta Tesis se implementara un control Automático para la alimentación de Agua hacia Calderas con un PLC SIEMENS, siendo este sistema autónomo y ayudando al operario de sala maquina en el control de este proceso.

1.4 Objetivo de la Tesis

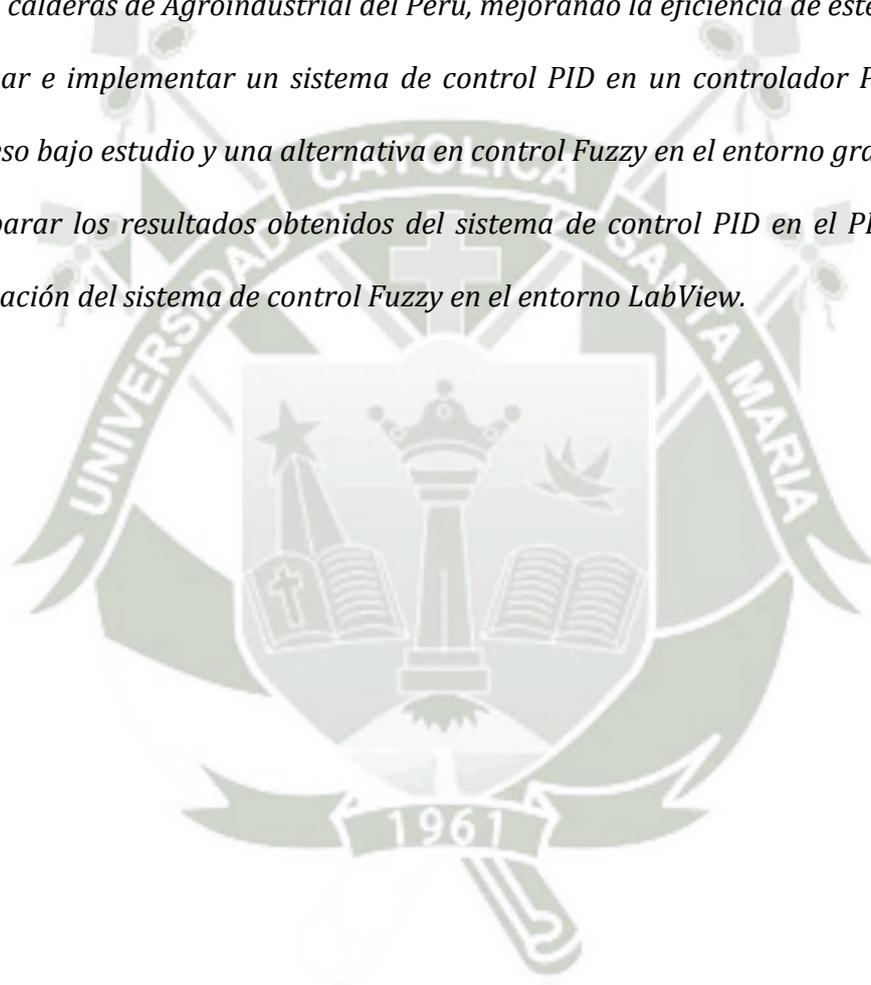
Considerando que una de las etapas más importantes en la industria es la Generación de Vapor y su primera etapa de alimentación de agua hacia calderas, es una etapa no muy desarrollada; en especial en el Grupo Gloria donde el control de estos procesos como en Agroindustrial del Perú Sur, Norte y Gloria Arequipa, realizan un control manual por los operadores de sala calderas, esta tesis presenta el siguiente objetivo general

“Automatización del sistema de alimentación de agua hacia calderas, usando un control PID, con una alternativa en control Fuzzy en el entorno Grafico LabView, que posibilite un funcionamiento efectivo y fiable del proceso de generación de vapor, así como una disminución del actual consumo de agua y componentes químicos para su tratamiento, así se

mejorara la eficiencia de trabajo de las calderas y la disminución de los gases contaminantes del medio ambiente”.

Para cumplir este objetivo es necesario alcanzar los siguientes puntos:

- 1. Rediseñar e implementar con equipos adecuados el sistema de alimentación de agua hacia calderas de Agroindustrial del Perú, mejorando la eficiencia de este proceso.*
- 2. Diseñar e implementar un sistema de control PID en un controlador PLC S7-300 del proceso bajo estudio y una alternativa en control Fuzzy en el entorno grafico LabView.*
- 3. Comparar los resultados obtenidos del sistema de control PID en el PLC S7-300 y la simulación del sistema de control Fuzzy en el entorno LabView.*



CAPITULO II: MARCO TEORICO

2.1 Introducción

Los sistemas de alimentación de agua en un caldero pueden estar compuestos por muchos equipos, los cuales varía según las características del agua de alimentación. Algunos equipos tienen su propia función dentro del sistema, pero existen algunos que realizan la misma actividad que el otro, con la diferencia en la calidad del trabajo realizado.

En este capítulo se analizará cada uno de los equipos que pueden utilizarse en un sistema de alimentación de agua hacia calderas, estos equipos se han planteado utilizando como guía al sistema de alimentación de agua según la empresa Cleaver Brooks, cuyas especialidad está en la construcción de calderos y equipos para el tratamiento de agua de alimentación.

Al conocer cuál sería el sistema de alimentación ideal, por decirlo de esta manera, podemos darnos cuenta de los equipos que necesitamos para garantizar un agua de alimentación a calderas con buenas características y así identificar los equipos que conforman el sistema de alimentación de agua hacia calderas de Agroindustrial del Perú.

2.2 Agua de Alimentación

El agua en un caldero tiene la función de transferencia calórica. Las condiciones en las que operan los calderos y otros equipos de transferencia de calor hacen que las mínimas cantidades de impurezas contenidas en el agua representen problemas muy serios dentro de

los equipos. Los problemas más importantes de los calderos como consecuencia de las características del agua con la que operan son:

2.2.1 Incrustaciones

Toda agua por muy pura que sea lleva disueltas sales, las cuales se originan como consecuencia de su contacto con el ambiente o con las capas terráqueas por la que discurre. Entre esas impurezas, las sales del calcio y magnesio revisten una gran importancia, debido a que dichas sales son muy poco solubles y en consecuencia tienen a precipitarse sobre las superficies, produciendo una capa dura y aislante de difícil remoción, a eso se llama *incrustación*, formados debido a una excesiva concentración de estos componentes en el agua de alimentación y/o regímenes de purga insuficientes.

En la Figura 2, es posible observar la corrida superior de los tubos de humo de una caldera con incrustaciones de espesores superiores a los 8 mm.



Figura 2: Incrustaciones en tubos de humo

La acción de dispersantes, lavados químicos o las dilataciones y contracciones de una caldera pueden soltar las incrustaciones, por lo que deben ser eliminadas de una caldera muy incrustada para prevenir su acumulación en el fondo del cuerpo de presión, tal como lo muestra en la Figura 3.



Figura 3: Acumulación incrustaciones en fondo cuerpo presión caldera

En el caso de que estas incrustaciones no sean removidas, se corre el riesgo de embarcar la caldera y obstruir las líneas de purga de fondo, con lo que el problema puede tornarse aún más grave.

La presencia de incrustaciones en una caldera es especialmente grave debido a su baja conductividad térmica actúa como aislante térmico, provocando problemas de refrigeración de las superficies metálicas y pueden llegar a causar daños por sobrecalentamiento.

A las sales que producen las incrustaciones se les conoce como dureza del agua, El agua es tanto más dura, cuanto mayor contenido de sales de calcio y magnesio tiene. La dureza se

encuentra en el agua bajo diversas formas o sales, las más comunes son: bicarbonatos, carbonatos, sulfatos, nitratos, cloruros, etc., del calcio y magnesio.

2.2.2 Corrosión

Es un proceso degradativo del hierro y otros metales por el cual el metal pierde gradualmente sus características físicas y estructurales. La corrosión está ligada, básicamente, a procesos oxidativos, los cuales se explican por fenómenos de tipos electroquímicos. Las principales fuentes de corrosión en calderas son:

- *Corrosión por oxígeno o Pitting*
- *Corrosión Caustica*

A continuación se describen en que consiste cada uno de estos tipos de corrosión, cuales son los factores que la favorecen, que aspecto tienen y de qué manera pueden ser prevenidas.

2.2.2.1 Corrosión por oxígeno o Pitting

La corrosión por oxígeno consiste en la reacción del oxígeno disuelto en el agua con los componentes metálicos de la caldera (en contacto con el agua), provocando su disolución o conversión en óxidos insolubles.

Los resultados de este tipo de corrosión son tubérculos de calor negro, los que se forman sobre la zona de corrosión, tal como muestra la figura N 4.

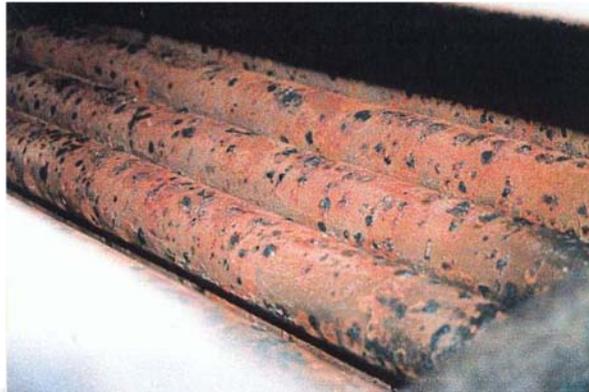


Figura 4: Corrosión por oxígeno o Pitting

Dado que la corrosión por oxígeno se produce por la acción del oxígeno disuelto en el agua, esta puede producirse también cuando la caldera se encuentra fuera de servicio e ingresa aire (oxígeno).

La prevención del agua de alimentación y la mantención de un exceso de secuestrantes de oxígeno en el agua de la caldera.

2.2.2.2 Corrosión Caustica

La corrosión caustica se produce por una sobre concentración local en zonas de elevadas cargas térmicas (fogón, cámara trasera, etc.) de sales alcalinas como la soda caustica.

Este tipo de corrosión se manifiesta en forma de cavidades profundas, semejantes al Pitting por oxígeno, rellenas de óxidos de color negro, presentes solamente en las zonas de elevada liberación térmica (fogón, placa trasera y cámara trasera) de una caldera.

La corrosión caustica puede ser prevenida manteniendo la alcalinidad, OH libre y pH del agua de la caldera dentro de los límites recomendados. En la figura 5, se muestra la corrosión caustica.



Figura 5: Corrosión caustica en fogón de una caldera

2.2.2.3 Corrosión Líneas Retorno Condensado

Las líneas de retorno de condensado, lógicamente no forman parte de una caldera, sin embargo, su corrosión tiene efectos sobre las calderas y puede ser prevenida con el tratamiento de agua.

La corrosión de las líneas de retorno de condensado tiene efectos sobre una caldera, ya que, los óxidos (hematita) producidos son arrastrados a la caldera con el agua de alimentación. Toda caldera cuyo lado agua tiene un color rojizo presenta problemas de corrosión en las líneas de retorno de condensado.

La corrosión en las líneas de retorno de condensado se produce por la acción del ácido carbónico que en estas se forma.

La prevención de la corrosión en las líneas de retorno de condensado, puede ser conseguida mediante aminas neutralizantes que neutralizan la acción del ácido carbónico y aminas fílmicas que protegen las líneas.

Estas aminas son volátiles por lo que al ser dosificadas a las líneas de alimentación de agua, son arrastradas por el vapor producido en la caldera.

2.2.3 Cantidad de Ph

Es importante por la relación con el aspecto corrosivo y por ser una condición para que se complete la reacción de los aditivos o químicos alimentados al caldero.

El Ph es igualmente una medida de la alcalinidad y nos indica lo adecuado del control de la alcalinidad activa, dentro de los límites máximos y mínimos, medido como concentración de iones de hidrogeno.

2.2.4 Características del Agua

Las características del agua del caldero deben de ser o estar dentro de los siguientes rangos:

<i>Dureza del Agua</i>	<i>< 1 pmm</i>
<i>Sulfitos</i>	<i>40 a 80 pmm</i>
<i>PH</i>	<i>10.5 a 11.5</i>

Tabla 1: Características de Agua

2.3 Sistema de Alimentación De Agua

El sistema de alimentación de agua de un caldero puede estar compuesto por muchos elementos que ayudaran a darle al agua de alimentación las mejores características, para así poder evitar los problemas de corrosión e incrustación en el caldero y tuberías de vapor. Existen algunos elementos que realizan el mismo trabajo en el agua y dependiendo del tipo de agua que se maneje en la empresa será necesario uno u otro elemento de los que describimos a continuación.

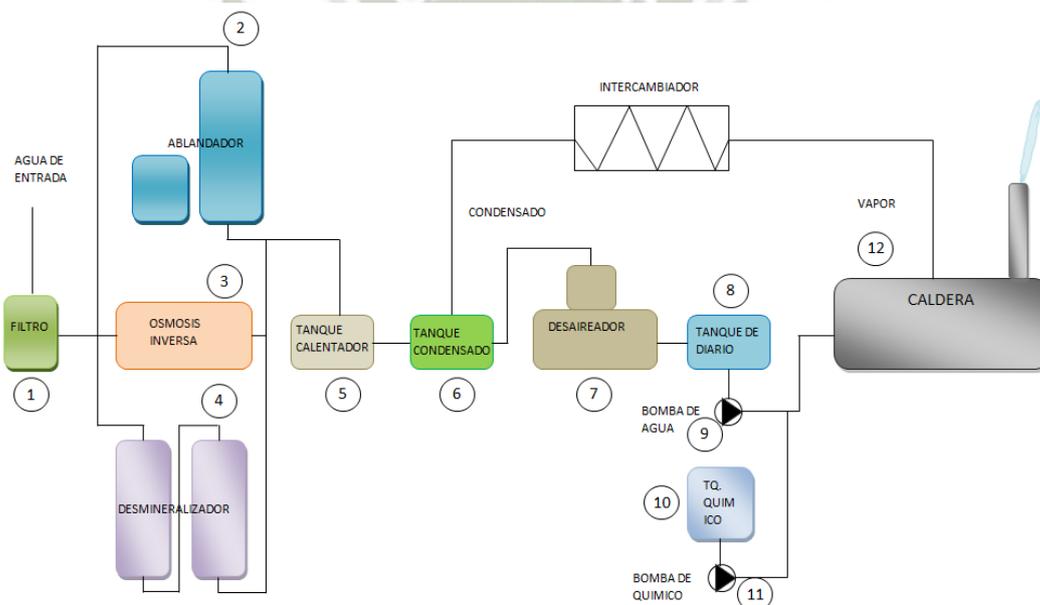


Figura 6: Sistema Completo de Alimentación de Agua para el Caldero

NUMERO	EQUIPO
1	Filtros
2	Ablandador
3	Osmosis Inversa
4	Desmineralizador

5	<i>Tanque Calentador</i>
6	<i>Tanque de Condensado</i>
7	<i>Desaireador</i>
8	<i>Tanque de Diario</i>
9	<i>Bomba de Alimentación</i>
10	<i>Tanque de Químico</i>
11	<i>Bomba de Químico</i>
12	<i>Caldero</i>

Tabla 2: Equipos para alimentación de agua hacia caldero

2.3.1 Filtro de Entrada

Los filtros de agua son muy importantes para eliminar toda clase de impurezas que nos darán problemas en el sistema de alimentación de agua. La necesidad de un filtro se la puede determinar haciendo un análisis del agua que ingresa al sistema, así determinaremos la cantidad de impurezas que se encuentren presentes en el agua y que capacidad de filtrado necesitamos.

Cuando en un sistema son instalados los filtros de agua, se debe tener presente que la compra y colocación de los mismos no es una pérdida de dinero, ya que su costo se recupera rápidamente, debido a que se elimina la necesidad de limpiar y reparar continuamente o de tener una operación ineficaz del resto de componentes del sistema de alimentación.

El tipo de filtro que se requiere, está relacionado con la calidad de filtrado que necesitamos y con el tipo de agua que ingresa al sistema, por lo que los principales filtros que podemos encontrar son.



Figura 7: Filtro de Agua

2.3.1.1 Filtro de Pequeñas Partículas de Hasta 10 micras

Este tipo de filtro se utiliza cuando se requiere una extrema filtración del agua y cuando tenemos flujos muy denso, estos filtros tienen la capacidad de eliminar solidos suspendidos, sedimentos y materiales disueltos hasta en un tamaño de 10 micras y nos ayudan mucho en el control de los lodos del caldero. A estos filtros se los deben de estar lavando cada cierto periodo ya que por su capacidad de filtrado existen mucho material que se acumulan rápidamente taponando el filtro.



Figura 8: Filtro de pequeñas partículas de hasta 10 micras

2.3.1.2 Filtro de Arena para Sedimento Pesado

Este tipo de filtros se los utiliza cuando existen una alta cantidad de partículas grandes y no se necesita de gran tamaño y solidos suspendidos hasta un tamaño de 40 micras, estos no necesitan ser lavados con mucha frecuencia como los anteriores, y cuando se los lava se necesita eliminar todas las partículas acumuladas en el fondo del filtro.

2.3.1.3 Filtros de Carbono Activado

Los filtros de carbono son muy importantes para eliminar el cloro que puede encontrarse presente en el agua, ya que es muy corrosivo y puede atacar las resinas del desmineralizador o ablandador, elimina materiales orgánicos los cuales pueden contaminar el suministro de agua y causar que se formen espumas en el interior del caldero, además eliminan sedimentos hasta un tamaño de 40 micras ayudándonos a controlar el lodo en los calderos.



Figura 9: Filtro de Carbón Activado

2.3.1.4 Filtros Para Hierro

Este tipo de filtros tiene la capacidad de eliminar el hierro soluble e insoluble, sólidos suspendidos y materiales disueltos hasta un tamaño de 40 micras, este tipo de filtro controlan la formación de lodos en el caldero producidos por precipitaciones férricas. La limpieza de estos filtros debe ser periódica y se la debe de hacer con permanganato de potasio.

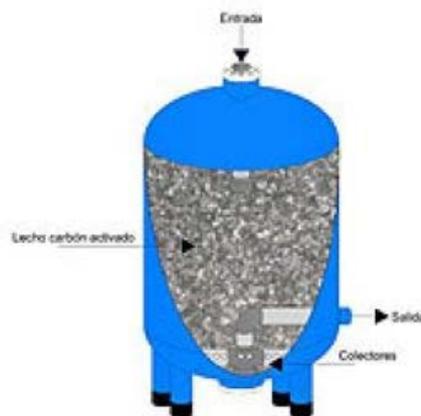


Figura 10: Filtro para Hierro

2.3.2 Ablandador

El ablandador es un equipo que se utiliza para quitar la dureza o sales de calcio y magnesio que están presentes en el agua, las cuales producen las incrustaciones en los tubos del caldero, esto se consigue con la ayuda de resinas sintéticas como polimetos o macromoléculas, derivadas del estireno, benceno, formaldehido, etc., que vienen del petróleo. El proceso de ablandamiento se realiza al intercambiar los iones de calcio y magnesio por iones de sodio muy solubles. Con esto conseguimos que las incrustaciones disminuyan y que la transferencia de calor hacia el agua sea mayor, mejorando la eficiencia del caldero.

Un equipo ablandador se debería de utilizar cuando el agua de ingreso al sistema exceda de una dureza de 5 ppm, la ventaja que tenemos con este equipo es que al utilizarlo eliminamos la necesidad de realizar un ablandamiento químico. Para que un ablandador funcione uniformemente debería proporcionar un flujo entre 5 y 6 g.m.p por pie cubico de resina. Un aspecto importante que debemos que tener en cuenta en un equipo ablandador es la capacidad de regeneración de las resinas, las cuales se logra al revertir el proceso, haciendo pasar por el ablandador salmuera de sal, con esto logramos regenerar los resinas para que el ablandador pueda trabajar de mejor manera.

El ciclo de funcionamiento de un ablandador es el siguiente:

- 1. Proceso de ablandamiento del agua hasta haber una saturación de la resina.*
- 2. Se realiza un lavado del ablandador, invirtiendo el flujo del agua para eliminar la suciedad que pueda haberse absorbido del agua en el proceso de ablandamiento.*
- 3. Se regeneran las resinas con salmuera de sal la cual va a restituir la capacidad del ablandador al cambiar los iones de Ca y Mg por los de Na.*
- 4. Se realiza un enjuague para poder eliminar todos los residuos de sal presentes en la regeneración, así termina el proceso y el ablandador queda listo para reiniciar el ciclo.*

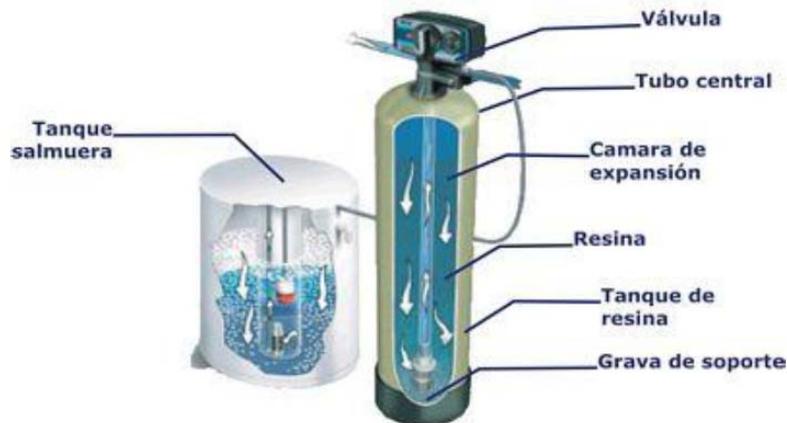


Figura 11: Tanque Ablandador

2.3.3 Osmosis Inversa

El equipo para realizar la osmosis inversa se utiliza para separar o quitar los sólidos disueltos, submicroorganismos, pirogénicos, materia orgánica, virus y bacterias del agua a muy alta presión, para conseguir un agua pura. A este proceso se le denomina de osmosis inversa ya que requiere de una presión para pasar el agua de un estado de baja concentración a uno de alta y luego viceversa, las dos cámaras por las cuales pasa el agua están separadas por una membrana semipermeable que solo dejara pasar las moléculas de agua, atrapando en ella todos las impurezas e incluso las sales disueltas.

Durante el proceso de osmosis, el agua misma es la encargada de lavar la membrana, lo que disminuye los gastos de operación. Con el proceso de osmosis inversa se puede quitar entre un 95% y un 99% de los sólidos disueltos totales y un 99% de las bacterias logrando tener un agua muy pura.

El proceso de osmosis inversa se describe a continuación.

1. *El agua fluye desde una columna con bajo contenido en solidos disueltos a una columna con alto contenido en solidos disueltos.*
2. *La presión osmótica es la presión necesaria para impedir que el agua fluya a través de la membrana, con el objeto de obtener un equilibrio.*
3. *Aplicando una presión superior a la presión osmótica, el agua fluirá en sentido inverso; el agua fluye desde la columna con elevado contenido en solidos disueltos hacia la columna con bajo contenido en solidos disueltos.*

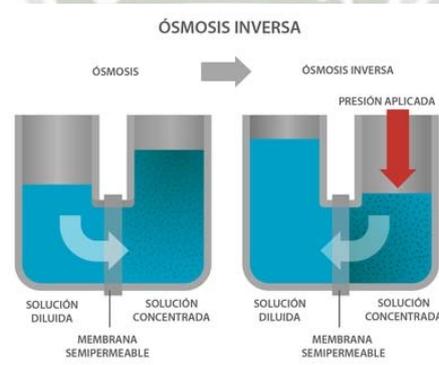


Figura 12: Ósmosis Inversa

Este proceso necesita mucha energía eléctrica debido a las altas presiones que se manejan por partes de la bomba de presurización, pero si tomamos en cuenta que si tenemos un caldero que necesita grandes cantidades de químicos para lograr una agua de excelente calidad el proceso de ósmosis inversa reducen los costos del tratamiento químico del agua en un 50% a 75%. Este equipo por lo general se utiliza cuando se tiene un agua con muchos solidos disueltos, alcalinidad y sílice.



Figura 13: Equipo de Osmosis Inversa

2.3.4 Desmineralizador

El Desmineralizador es un equipo mediante el cual se eliminan los sólidos que están disueltos en el agua, este equipo está constituido de dos resinas una catiónica y una aniónica que pueden ser de base fuerte o débil esto dependiendo de la calidad del agua que se necesite y que tipos de contaminantes están presentes. La desmineralización sucede por medio del intercambio iónico entre las resinas del Desmineralizador y el agua de alimentación.

Para poder determinar la calidad del agua desmineralizada se procede a medir la conductividad eléctrica que posee y mientras mayor conductividad tenga el agua, significa que tenemos una mayor concentración de sólidos, el proceso de desmineralización se describe a continuación.

1. El agua de alimentación que está cargada de cationes y aniones, ingresa primero al tanque del Desmineralizador que posee la resina catiónica.
2. El agua por esta resina que se encuentra saturada de iones de hidrogeno H- y por intercambio iónico cambia los hidrógenos por cationes del agua como son (Na, Ca, Mg, etc.)
3. El agua sale del primer tanque cargada ya de iones de hidrogeno y pasa al segundo tanque el que posee la resina de anionica.
4. El agua al atravesar esta resina que está cargada de iones oxhídricos (OH-), por intercambio iónico son cambiados los aniones del agua como CL, CO₃, etc., por los oxhidrilos los cuales al combinarse con los hidrógenos del agua generan más agua, de esta manera todas las impurezas que teníamos en el agua se quedaron en las resinas.
5. Cuando las resinas se encuentren saturadas de impurezas tiene que ser regeneradas, para ponerlas nuevamente en funcionamiento, esto se logra haciendo pasar ácido clorhídrico por la resina catiónica y soda caustica por la resina anionica.

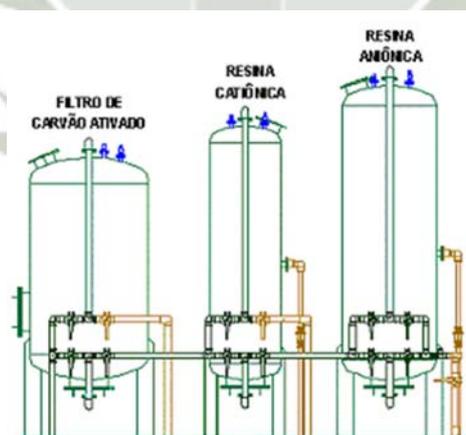


Figura 14: Desmineralizador de Agua

2.3.5 Tanque Calentador

Este tipo de tanque no es más que un intercambiador de calor, este tanque posee un serpentín en su interior por el cual circula vapor o el retorno del condensado, en el tanque se calienta el agua hasta una temperatura de aproximadamente 104°C, con esto conseguimos ayudar a satisfacer las necesidades caloríficas del desaireador. El tanque calentador se lo utiliza normalmente cuando se trabaja con presiones de 250 psi y cuando se desea que el choque térmico del agua no afecte a los equipos de alimentación o al caldero.

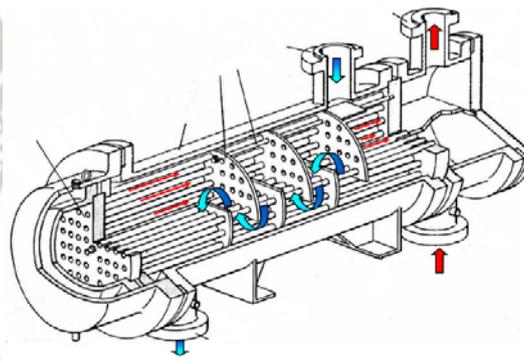


Figura 15: Tanque Calentador

2.3.6 Tanque de Condensado

El vapor al ser utilizado en el proceso pierde sus características, y se transforma en agua, a la cual se le da el nombre de condensado por el efecto que sufre el agua, este condensado es conducido hacia el caldero para ser utilizado nuevamente y se lo recibe en un tanque conocido como tanque de condensado, el cual debe estar diseñado con una capacidad suficiente para recibir el retorno del condensado sin desbordarse.

Se podría decir que seleccionar correctamente la capacidad del tanque es más un arte que una ciencia ya que debe de tener presente cuando tomara al condensado regresar de la planta hacia el tanque de recolección, ya que dependería de muchos factores tales como, el tipo y condición en las que se encuentran las trampas de vapor, la pendiente que se tiene en las tuberías, la limpieza que presenten estas, el tipo de aislamiento que se posee y la calidad del mismo, la forma del edificio entre otras.

Este tanque actúa como recolector, separador y distribuidor ya que recoleta el condensado de retorno, separa el poco vapor que aún queda en la tubería expulsándolo hacia el exterior y distribuye el agua nueva hacia el tanque de diario. El tanque de condensado debe de estar compuesto por un visor de nivel de agua, un termómetro, un tapón de purga, la entrada de agua nueva al sistema y una tubería de ventilación.

2.3.7 Desaireador

El equipo Desaireador es el método más apropiado para la eliminación del oxígeno y dióxido de carbono de alimentación del caldero, por lo cual a un Desaireador se lo debe de tener muy presente cuando se realice la instalación del sistema de agua ya que el Desaireador estos gases producen corrosión en los tubos del caldero y las tuberías de vapor que con el pasar del tiempo produjeran perforaciones en las superficies del metal.

Los desaireadores son utilizados en calderos que operan a 110 psi o más, donde la producción depende de un funcionamiento continuo del caldero y cuando el caldero opera con una

composición de agua fría del 25% o más. El Desaireador además es el encargado de calentar el agua de alimentación, reduciendo el choque térmico del agua y manteniendo en buenas condiciones a caldero.

El Desaireador consiste en una cámara que está montada sobre el tanque de alimentación de agua, la cual contiene una serie de bandejas perforadas por las cuales circula el agua de alimentación desde la parte superior, una lluvia de agua en finas gotas mezclada con vapor que viene del retorno del condensado o del caldero directamente, es introducido en la cámara desde la parte inferior haciendo que el agua de alimentación se caliente y expulse el aire disuelto en el agua.

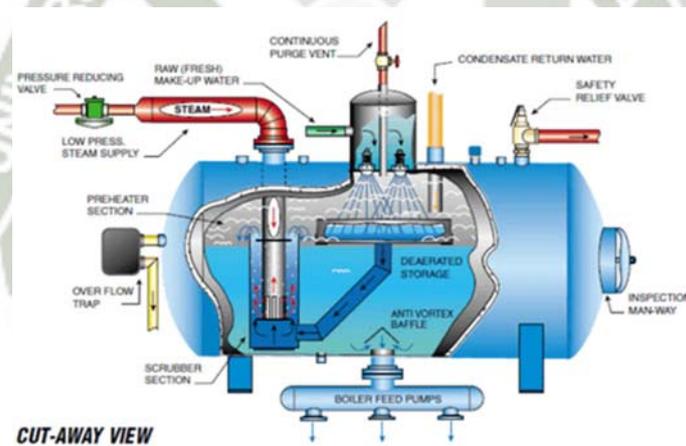


Figura 16: Desaireador

La temperatura del agua de alimentación debe de estar entre los 102°C y 105°C para garantizar que los gases del agua se eliminaron, por lo cual necesitamos que el tanque Desaireador esté cerrado y presurizados 0.5 kg/cm², esta presión se obtiene por el mismo

vapor de alimentación. La salida del aire del agua se realiza por medio de una válvula de punzón ubicada en la parte superior la cual se comunica con la atmosfera.

La instalación de un Desaireador presenta las siguientes ventajas en el sistema de alimentación.

- 1. Reducción del choque térmico en la entrada del agua al caldero ya que el Desaireador nos entrega el agua a 102°C.*
- 2. Reducción de las purgas para poder mantener el mayor tiempo posible las sales disueltas.*
- 3. Reducción de la cantidad de combustible consumido debido a la disminución de purgas.*

2.3.8 Tanque Diario

El tanque de diario está ubicado a lado del caldero, su trabajo es de mantener siempre un nivel de agua mínimo, de tal forma que la bomba de alimentación de agua tenga de donde extraer el fluido para el caldero, por lo general este tanque debe de tener un volumen de agua suficiente para mantener el caldero encendido continuamente por lo menos 20 minutos.

El tanque diario debe de estar fabricado de un material no corrosivo compuesto por un visor de nivel de agua, un termómetro, un tapón de purga, la estrada de agua del tanque de condensado y una tubería de ventilación.



Figura 17: Tanque Diario

2.3.9. Bomba De Alimentación

La bomba de alimentación está diseñada para introducir el agua en el caldero, la mayoría de bombas que se utilizan para esta operación son de tipo centrifugas. La bomba es la responsable de no hacer faltar agua dentro del caldero, para evitar que este se recaliente o explote, el control de encendido de la bomba se lo realiza con un dispositivo montado en el caldero el cual censa el nivel de agua y cuando este se encuentre bajo procede a activar la bomba.

Los accesorios que deben de acompañar a la bomba de ser, una válvula check en la descarga para evitar que el agua regrese a la bomba cuando esta se apague y dos válvulas de cierre una a la entrada y otra a la salida de la bomba para poderla aislar si se necesita dar mantenimiento a la misma.



Figura 18: Bomba de Alimentación Calderas

Estas bombas deben de cumplir estos mínimos requisitos:

- Temperatura del líquido: -40 - 180°C
- Caudal Q: 180m³/h
- Caudal H: 330 m
- Aplicación: Sistema de Alimentación a Caldera
- Tipo: Bomba Centrifuga multicelulares
- Mantenimiento: Fácil
- Presión del Sistema: Max 50bar

2.3.10 Tanque de Químico

Este tanque tiene como función alimentar a la bomba de químico, está ubicado en el cuarto del caldero y debe de ser lo posible de un material como polietileno, acero inoxidable, acero al carbono o de acero con forro de polietileno y tapa, para evitar que el químico colocado en el mismo pueda reaccionar con su estructura física, así lograremos conservar por más tiempo las propiedades específicas de cada químico haciendo que estas actúen en el caldero.

Este tanque no tiene dimensiones específicas, pero si debe de tener el suficiente espacio para poder lavarlo, ya que el químico por lo general se asienta en el fondo del tanque y es necesario removerlo antes de colocarlo el nuevo químico.



Figura 19: Tanque de Químico

2.3.11 Bomba De Químico

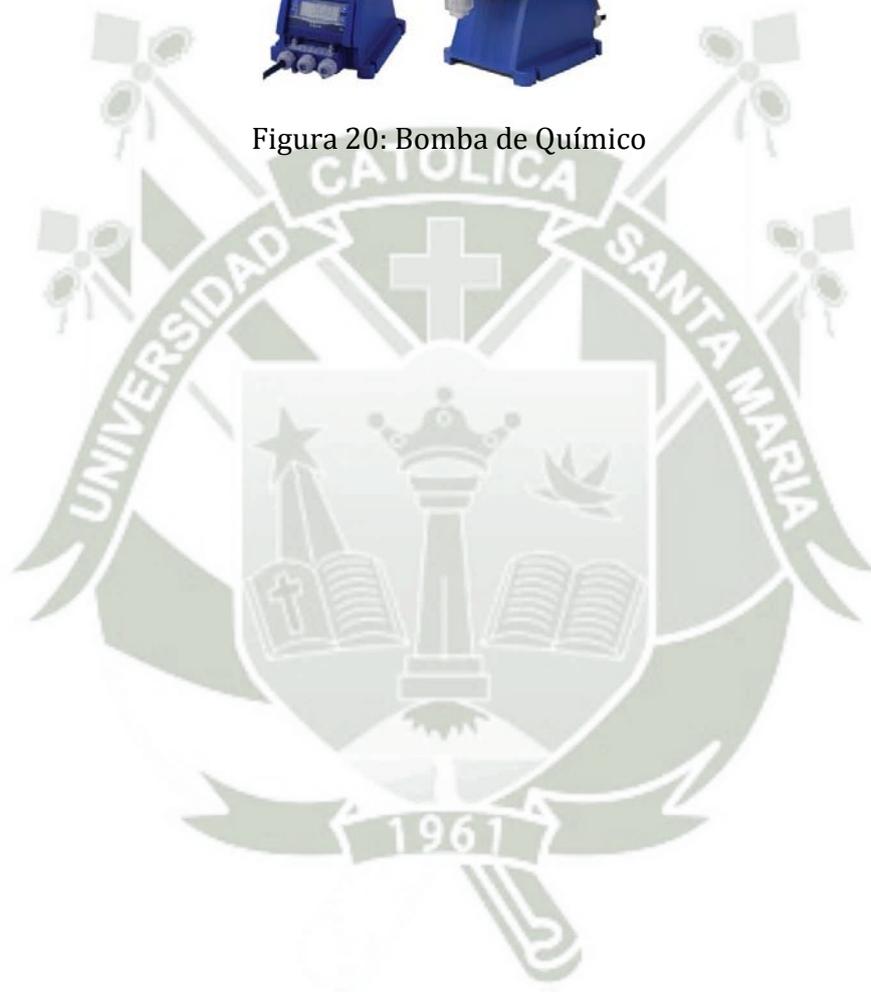
Esta bomba es muy importante dentro del proceso de alimentación de químico al caldero, esta debe de tener características específicas para poder trabajar con los químicos, como resistentes a la corrosión y abrasión de líquidos, el funcionamiento de esta bomba es de tipo hidráulico ya que un pistón es el encargado de crear el vacío en la cámara del diafragma, para succionar el químico y luego lo comprime haciendo que este se dirija a la tubería de agua.

Este tipo de bombas manejan elevadas presiones, ya que necesitan introducir una cierta cantidad de químico en la tubería de agua y sus caudales son jy exactos para conseguir una dosificación uniforme, este proceso se lo realiza de una manera continua y proporcional,

logrando una buena dosificación del químico, consiguiendo con esto un 100% de efectividad en el tratamiento del agua.



Figura 20: Bomba de Químico



CAPITULO III: DISEÑO DEL SISTEMA DE ALIMENTACION DE AGUA HACIA CALDERAS

3.1 Introducción

En el año 2001 el Grupo Gloria, decide crecer en la zona sur del Perú, para lo cual decide instalar una Planta Concentradora de Leche, la cual estaría ubicada en la irrigación de Majes, en una área de 30 000 m² de construcción.

Después de trece meses, se inició las operaciones un 14 de noviembre del 2002 a un 45% de su capacidad de producción, contando por ello con un 28% de leche fría y 72% de leche sin enfriar recepcionada en porongos de aluminio. Hasta ese momento se operaba con tan solo dos líneas de recepción de leche, destinada únicamente para el acopio de la leche procedente de la Irrigación de Majes y Santa Rita de Siguan, la cual llegaba a través de 16 camiones de recojo que movilizaban 10 500 porongos. Años después del inicio las operaciones se incrementaron considerablemente, con 64 camiones de recojo que movilizan 22 000 porongos de aluminio en siete líneas de carga, correspondientes a la producción de leche procedente de las irrigaciones de Majes, Santa Rita y La Joya.

En la actualidad se recepciona además de las mencionadas irrigaciones, se han ido incorporando las producciones de la zona de Aplao, Mejía, Camiara y Moquegua y el último año zonas tan alejadas como las de Cuzco y Puno. Todas ellas envían la leche acopiada en

camiones cisternas isotérmicas debido a la distancia que recorre hasta llegar a la planta de Majes.

La Planta de agroindustrial del Perú – Majes, es en la actualidad la más importante planta de acopio y procesamiento de leche en la región sur del Perú y trabaja a máxima capacidad, el proceso ha sido dotada de equipos diseñados y fabricados con tecnología de punta, contando con los últimos adelantos en sistemas de automatización lo que permite obtener un producto de la más alta calidad.

Una parte importante del procesamiento de evaporación de leche es la generación de vapor, la cual cumple uno de los principales papeles tanto en la recepción de leche, que se utiliza para lavar los porongos, pasando por la evaporación, para poder alcanzar las temperaturas del proceso y culminando en el CIP. La generación de vapor en Agroindustrial del Perú, se realiza a través de tres calderas las cuales trabajan las 24 horas durante todo el año y una parte importante para generar vapor es la alimentación de agua hacia calderas.

El sistema de alimentación de agua hacia calderas, desde el inicio de funcionamiento de la Planta fue controlado de forma manual por el operador de sala calderas, adicional a estas funciones el operador cumplía con la operación de algunos otros equipos y monitoreando del funcionamiento de las calderas. Algún inconveniente o distracción del operador podría afectar la alimentación de agua hacia calderas y por ende poner en riesgo el proceso.

3.2 Sistema de Alimentación de Agua de Agroindustrial del Perú

Como se ha podido analizar en el Capítulo 2, el sistema de alimentación de agua puede estar compuesto por muchos equipos, los cuales garantizan una agua de alimentación en perfectas condiciones. Pero la mayoría de empresas no tienen incorporada en su línea de alimentación todos estos equipos, sino que utilizan los que son extremadamente necesarios, por lo tanto a continuación vamos a describir los equipos que se colocaron en la línea de alimentación de agua al caldero de la empresa Agroindustrial del Perú.

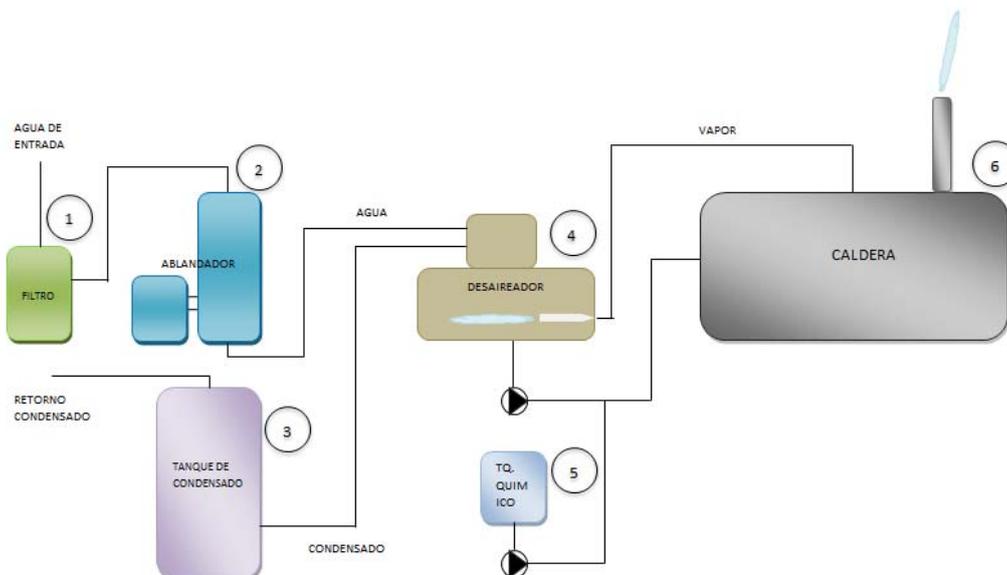


Figura 21: Sistema de alimentación de agua hacia Calderas de Agroindustrial del Perú

NUMERO	EQUIPO
1	Filtro
2	Ablandador
3	Tanque de Condensado

4	<i>Desaireador</i>
5	<i>Tq. Químico</i>
6	<i>Caldera</i>

Tabla 3: Sistema de Alimentación de agua hacia Calderas de Agroindustrial del Perú

3.2.1 Filtro

La empresa cuenta en sus instalaciones con proceso de filtración de agua, que es utilizado para todos los servicios del proceso, para consumo y suministros. Para nuestro proceso es muy importante el agua ya que nuestro proceso se utiliza el agua tanto para evaporar la leche, lavado de porongos, lavado de cisternas, generación de vapor, etc.

La etapa de filtración de Agua de Agroindustrial del Perú, cuenta con un sistema de dos filtros Multicapas Modelos HIFLO 6 – UF-60 y dos filtros de Carbón Activado modelos HIFLO 6 – UF-48, de la marca Culligan.



Figura 22: Proceso de Filtrado de Agroindustrial del Perú

3.2.1.1 Filtro Multicapa

Los Filtros Multicapa de modelo HIFLO 6 – UF60, cuya aplicación típica es la eliminación de la turbidez, sólidos en suspensión y pequeñas cantidades de metales pesados (especialmente de hierro y manganeso).

Los minerales que se utilizan: “Cullcite”, una antracita granular de baja densidad, en la capa más alta, y “Cullsan”, una arena de sílice puro, químicamente inerte y de una duración prácticamente ilimitada.

Los materiales utilizados son de acero al carbono y están recubiertos con una protección contra la corrosión consistente en una capa gruesa (250-300 u) de resina epoxi apta para el contacto con los alimentos, y en el exterior está recubierto por una capa de 80 – 100 u de protección.

La automatización, su funcionamiento es controlado por un grupo de válvulas hidráulicas, de diafragma, operado por un piloto multipuerto, controlado por un programador electrónico, alternado fases de servicio y lavado.

MODELO	APLICACION		ACCESORIOS	DIMENSIONES			PESO	
	Caudal max	Contra corriente	In/ out Φ	Ancho	Prof	Altura	En servicio	En envió
	m ³ /h	m ³ /h	DN	mm	mm	mm	Kg	Kg
UF60	36,2	61,3	80	1500	1760	2200	5040	3290

Tabla 4: Característica de Filtros multicapas

3.2.1.2 Filtro de Carbón Activado

Los filtros de Carbón Activado de modelo HIFLO 6 – UF48, cuya aplicación típica es la eliminación de cloro, olores desagradables y sabores. La base es un carbón activado granular caracterizado por su alta porosidad, lo que le da un alto poder de adsorción.

Los materiales utilizados son de acero al carbono y están recubiertos con una protección contra la corrosión consistente en una capa gruesa (250-300 u) de resina epoxi apta para el contacto con los alimentos, y en el exterior está recubierto por una capa de 80 – 100 u de protección.

La automatización, su funcionamiento es controlado por un grupo de válvulas hidráulicas, de diafragma, operado por un piloto multipuerto, controlado por un programador electrónico, alternado fases de servicio y lavado.

MODELO	APLICACION		ACCESORIOS	DIMENSIONES			PESO	
	Caudal max	Contra corriente	In/ out Φ	Ancho	Prof	Altura	En servicio	En envió
	m ³ /h	m ³ /h	DN	mm	mm	mm	Kg	Kg
UR60	36,2	27,3	80	1500	1760	2200	4545	2795

Tabla 5: Características de Filtro Carbón Activado

3.2.2 Ablandador

Tanque Ablandador de agroindustrial del Perú, fue construido por personal de la empresa, el cual tiene una capacidad de 1800 litros de agua, este equipo se encuentra ubicado dentro de sala calderas y es operador por el personal de calderas, el cual se encarga del funcionamiento y limpieza del mismo.

La presión de entrada de agua al ablandador es de 60 – 80 psi y la salida de 0 – 22 psi, estos valores son controlados por el personal de calderas de acuerdo a la necesidad de consumo.



Figura 23: Ablandador de Agroindustrial del Perú

3.2.3 Tanque de Condensado

El tanque de condensado de Agroindustrial del Perú, cumple la función de recolección de condensado de toda la planta, este tiene una capacidad de 60000 litros.

El tanque se controla desde sala de control en la evaporación y abastece de condensado a la etapa de generación de vapor, así también es utilizado para una etapa de lavado de porongos y calentamiento de agua en los intercambiadores de tubos de la evaporación.



Figura 24: Tanque de Condensado Agroindustrial del Perú

3.2.4 Tanque Desaerador

El tanque desaerador de Agroindustrial de Perú, fue construido e instalado por personal de Agroindustrial del Perú, teniendo una capacidad de 10000 litros, está ubicado en sala calderas y es controlado por el operador de sala calderas.



Figura 25: Tanque Desaerador de Agroindustrial del Perú

3.2.5 Tanque de Químico

Los tanques de químicos de Agroindustrial del Perú, es de plástico proporcionado por el área de almacén, posee una tapa la cual evita el ingreso de objetos o cuerpos extraños a los químicos que contienen, se encuentran ubicados en sala calderas y el control de estos tanques de químicos está a cargo de personal de sala calderas.



Figura 26: Tanque de Químico de Agroindustrial del Perú

3.2.6 Bomba de Químico

La bomba de químico utiliza en Agroindustrial del Perú, son bombas de la marca Walchem, modelo EZ B16 D2 VC, las cuales están ubicadas en sala de calderas son operadas por personal de calderas y se da mantenimiento por personal de mantenimiento, estas bombas son de las siguientes características.



Figura 27: Bomba de Químico de Agroindustrial del Perú

<i>Caudal Nominal</i>	<i>1.0 (65) GPH (mL/min)</i>
<i>Líquido a bombear</i>	<i>Hipoclorito de Sodio</i>
<i>Rango Recomendado</i>	<i>0 a 1.0 GPH</i>
<i>Presión máxima de trabajo</i>	<i>105 PSI</i>
<i>Golpe por minuto</i>	<i>(SPM) 360</i>

Tabla 6: Características de Bomba de Químico

3.2.7 Bomba de Agua

Las bombas utilizadas por Agroindustrial del Perú, son de la marca Grundfos, se cuentan con 4 bombas instaladas de forma paralela, las cuatro bombas son de características semejantes modelo CR8, y se encuentran ubicadas en sala calderas.

Las características son las siguientes:



Figura 28: Bomba de Agua de Agroindustrial del Perú

<i>Flujo Nominal (gpm)</i>	<i>50</i>
<i>Rango de flujo (gpm)</i>	<i>5 -65</i>
<i>Presión Max. de trabajo bar (psi)</i>	<i>25(360)</i>
<i>Presión Max. de la bomba H pies (psi)</i>	<i>825 (358)</i>
<i>Potencia del motor (hp)</i>	<i>7 HP</i>

<i>Temperatura (°F)</i>	<i>-4 a +250</i>
<i>Eficiencia máxima (%)</i>	<i>64</i>
<i>Conexión a tubería brida ANSI</i>	<i>2", 250 lbs</i>

Tabla 7: Características de Bomba de Agua

3.3 Tablero Eléctrico

En esta parte tocaremos todo lo referente al sistema eléctrico que se encontró gobernando todo el sistema del tanque desaerador de Agroindustrial del Perú. S.A.C.

En la siguiente figura 29 se muestra el tablero con el que trabajo el sistema de alimentación de agua hacia calderas, en dicho tablero se muestran pulsadores de marcha, parada e indicadores de niveles de agua, así mismo se encontramos tres display los cuales muestran la presión de salida del tanque desaerador, las temperaturas del tanque R-500 y temperatura de salida de agua fría de los bancos de hielo.



Figura 29: Tablero de control del sistema de Alimentación de Agua hacia Calderas

En la siguiente figura 30 se muestra el tablero de control, su sistema de control era de forma manual y era controlado por los operadores de calderas las 24 horas al día, en su interior se puede observar un desorden del circuito de mando y fuerza.

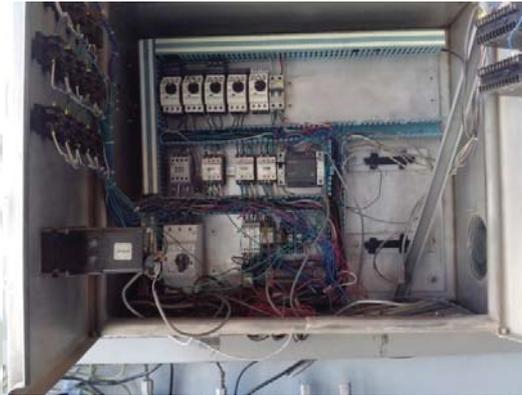


Figura 30: Interior Tablero de Control Sistema Alimentación Agua hacia Calderas

3.4 Líneas de Ingreso y Salida Tanque Desaerador

3.4.1 Ingreso de Condensado

Las tuberías de ingreso de condensado son de 1 1/2 pulgadas, las cuales tiene la función de alimentar al tanque desaerador y mantener un nivel considerable de agua para poder abastecer de vapor a las calderas.

La tubería de alimentación de condensado, tiene su punto de partida en el tanque pulmón de condensado y a través de una bomba se envía por la tubería hacia el tanque desaerador. Dicha bomba es manipulado por personal de producción, el ingreso al tanque es de forma directa no se posee ninguna válvula de control antes del ingreso al tanque desaerador.

3.4.2 Ingreso de Vapor

La línea de ingreso de vapor al tanque desaereador, se utiliza para poder alcanzar la temperatura adecuada, esta línea de ingreso es muy importante ya que si no se alcanza la temperatura el agua de alimentación a calderas puede ocasionar desgaste de las calderas y posibles daños.

La tubería de alimentación a caldera no posee ninguna válvula de control la cual pueda regular el ingreso de vapor y controlar la temperatura interior del tanque, solo posee una válvula manual de bola la cual es regulada por el operador de sala calderas.

En la figura 31, se muestra la línea de ingreso de vapor.



Figura 31: Tubería de Ingreso Vapor Tanque Desaereador

3.4.3 Salida de Condensado

En la parte inferior del tanque de condensado se tiene la salida del condensado que se envía a calderas, esta tubería llega a las bombas de alimentación a calderas las cuales se encargan de alimentar a las calderas de acuerdo a la necesidad del nivel de agua en cada una.

3.5 Mejoras del Sistema de Alimentación de Agua Hacia Calderas de la Empresa Agroindustrial del Perú

Los equipos que componen el sistema de alimentación de agua hacia calderas de Agroindustrial del Perú, se detallaron en el capítulo anterior, en este capítulo se detallaran las mejoras que se realizaron para poder automatizar el sistema de alimentación de agua hacia calderas.

Mejorar el sistema de alimentación de agua hacia calderas es la idea principal de este proyecto de tesis. Este capítulo mostrara las modificaciones realizadas y/o cambios realizados a los equipos, repotenciando o mejorando su funcionalidad dentro de este sistema, los equipos fueron escogidos de acuerdo a la aplicación y se dimensionaron de acuerdo a la necesidad y/o aplicación.

Se detallaran las características de los equipos nuevos, como son PLC, Variadores, válvula proporcional, etc., los cuales se instalaron con apoyo del personal del Área de ingeniería de Agroindustrial del Perú.

3.5.1 Tablero Eléctrico

El tablero eléctrico es una de las partes importantes de este proyecto, ya que dentro de este se encuentra los componentes electrónicos de control y fuerza de este proyecto, como es el PLC, Variador de Velocidad, relés, contactores, llaves termomagneticas, controladores de nivel. Por el grado de importancia de estos componentes dentro del tablero es que se optó por renovarlo

completamente, ya que el que poseía no tenía grado de protección alguna sobre el agua o polvo, siendo estas posibles causas de cortocircuitos.

Se cambió por un tablero nuevo de material de acero inoxidable con un grado de protección IP67, el cual nos garantiza protección sobre partículas de polvo e ingreso de agua.

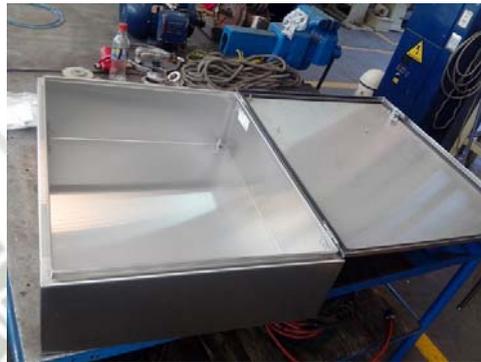


Figura 32: Tablero Eléctrico para Proyecto

Este nuevo tablero tiene medidas 800 ancho, 1200 alto, 400 profundidad, se escogió de estas medidas considerando los componentes que ingresaran en él y el lugar de trabajo.

3.5.2 PLC – SIEMENS S7-300

Los Controladores Lógicos Programables (PLCs), también llamados autómatas programables, forman parte de la familia de los ordenadores. Se usan en aplicaciones comerciales e industriales. Un autómata monitoriza las entradas, toma decisiones basadas en su programa, y controla las salidas para automatizar un proceso o máquina.

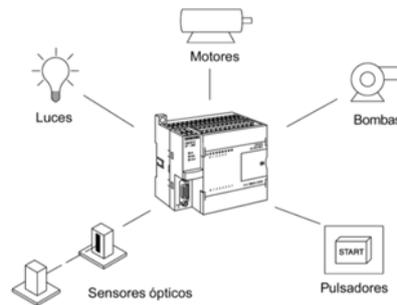


Figura 33: Esquema de Equipos que controla el PLC SIEMENS

Un autómata programable consiste en módulos de entradas, una CPU, y módulos de salidas. Una entrada acepta una gran variedad de señales analógicas o digitales de varios dispositivos de campo (sensores) y los convierte en una señal lógica que puede usar la CPU. La CPU toma las decisiones y ejecuta las instrucciones de control basadas en las instrucciones del programa de la memoria. Los módulos de salida convierten las instrucciones de control de la CPU en una señal digital o analógica que se puede usar para controlar dispositivos de campo (actuadores). Se usa un dispositivo de programación para introducir las instrucciones deseadas. Estas instrucciones especifican lo que debe hacer el autómata según una entrada específica. Un dispositivo operador permite procesar la información para ser visualizada e introducir nuevos parámetros de control.

Los pulsadores (sensores), del siguiente ejemplo, conectados a las entradas del autómata, pueden usarse para arrancar y parar un motor conectado a un autómata a través de un arrancador (actuador).

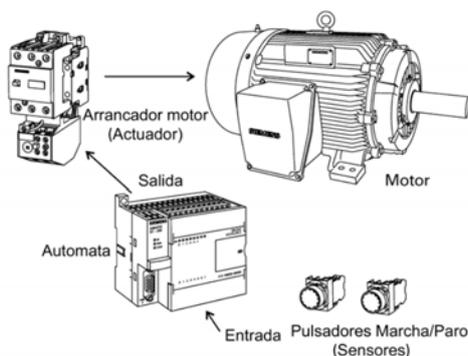


Figura 34: Diagrama de Control de un motor con PLC SIEMENS

El S7-300 es un autómata modular. La fuente de alimentación y las entradas/salidas consisten en módulos independientes conectados a la CPU.

Para este proyecto de tesis se va a utilizar el autómata 315-2DP de la familia S7-300, con módulos de entradas/salidas digitales y analógicas, a continuación detallare las características de estos módulos.

Modulo	Código	Dirección Entrada	Dirección Salidas
<i>CPU 315-2DP</i>	<i>6ES7 315-2AF02-0AB0</i>		
<i>DI32XDC24V</i>	<i>6ES7 321-1BL00-0AA0</i>	<i>0 ... 3</i>	
<i>DO32XDC24V/0.5A</i>	<i>6ES7 322-1BL00-0AA0</i>		<i>4 ... 7</i>
<i>AI8X12BIT</i>	<i>6ES7 331-7KF02-0AB0</i>	<i>288 ... 303</i>	
<i>AO4X12BIT</i>	<i>6ES7 332-5HD01-0AB0</i>		<i>304 ... 311</i>
<i>AO4X12BIT</i>	<i>6ES7 332-5HD01-0AB0</i>		<i>320 ... 327</i>

Tabla 8: PLC S7-300 y módulos de entrada/salidas analógicas y digitales

Las ventajas obtenidas con la implementación del PLC S7-300 son:

- *Menor tamaño físico que las soluciones de cableado*
- *La realización de cambios es más fácil y más rápida.*
- *Los autómatas llevan integradas funciones de diagnóstico.*
- *Los diagnósticos están disponibles centralmente en la PG.*
- *Las aplicaciones pueden ser inmediatamente documentadas.*
- *Se pueden duplicar las aplicaciones más rápidamente y con menor coste.*

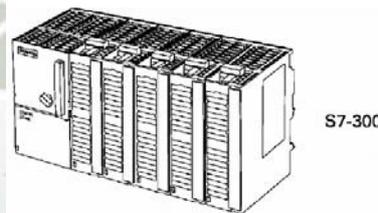


Figura 35: PLC Siemens S7-300

3.5.2.1. Fuente De Alimentación

Nuestro control lógico Programable S7-300 de la marca SIEMENS, posee una fuente de alimentación la cual suministra de tensión de 24VDC, para el funcionamiento de todos los módulos, esta fuente de alimentación tiene como ingreso de tensión 110/220 VAC y salida 24 VDC con una corriente de 2A, la fuente SITOP de Siemens utilizada en nuestro proyecto se identifica por el código 6EP-131-1SL11 y sus principales características son.

Technical Specifications	
SITOP Power	DC 24V/2A
Catalog No	6EP1331-1SL11
Rated Input Voltage	AC 120V/230V
Range	93–132V/187–264V
Hold Up Time	>20 ms
AC Input Frequency	47–63Hz
Rated Input Current	0.8/0.5A
Inrush Current 25°C (77°F)	<20A, <3 ms
Line Side Protection	5SX2106-7 [®]
Load Side Protection	Self Protected [®]
Rated Output Voltage	24VDC ± 3%
Adjustable Range	Fixed
Rated Output Current	2A (140°F)
Efficiency Approx.	83%
Parallel Connection Possible	No
RFI Specification	EN50081-2 (Class A)
Degree of Protection	IP 20
Ambient Temperature	32°–140°F (0°–60°C)
Mounting	DIN Rail (35 × 15 mm)
Connections at Input (Solid/Stranded)	AWG22–AWG12
Connections at Output (Solid/Stranded)	AWG22–AWG12
Dimensions W x H x D Inches (mm)	1.97 × 4.92 × 5.31 (50 × 125 × 135)
Approx Wt Lbs (Kg)	0.9 (0.4)
Approvals	UL, cUL, FM, CE



Figura 36: Fuente Alimentación Sitop PLC S7-300

3.5.2.2 CPU 315-2DP

El PLC S7-300 utilizado en este proyecto de tesis, utiliza una CPU 315-2 DP de la marca Siemens, en el cual vamos a trabajar toda nuestra lógica de programación y será nuestro cerebro para controlar el Sistema de Alimentación de Agua hacia Calderas, este equipo se identifica con el código 6ES7 315-2AF02-0AB0, el cual es un código interno de la marca Siemens para poderlo identificar, esta CPU es de la gama 300 y posee una interfaz integrada MPI para su programación y con una comunicación Profibus DP, para poderlo comunicar con otros CPU o utilizarlo para poder integrar nuestro proyecto con el Scada principal.



Figura 37: CPU 315-2DP Siemens

3.5.2.3 Entradas Digitales

El módulo de entradas digitales utilizado para este proyecto es SM321 DI32xDC24V, su código Siemens es 6ES7 321-1BL00-0AA0, dicho modulo se distingue por las características siguientes:

- *32 entradas, con aislamiento galvanizado en grupos de 16*
- *Tensión nominal de entradas de 24V DC*
- *Adecuado para interruptores y detectores de proximidad (BERO) A 2/3/4 hilos.*

El esquema eléctrico y diagrama de principio del módulo de entrada digital es:

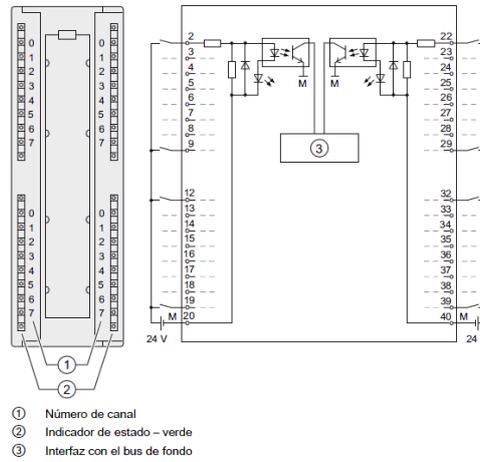


Figura 38: Esquema Modulo Entrada Digitales Siemens

Asignación de terminales del SM 321 – DI32XDC24V

La figura 39 muestra la asignación de los canales respecto a las direcciones (byte de entrada “x” hasta byte de entradas “x+3”).

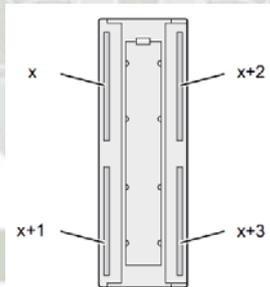


Figura 39: Asignación de los canales Entrada Digitales

Datos técnicos del módulo:

Datos técnicos	
Dimensiones y peso	
Dimensiones A x A x P (mm)	40 x 125 x 120
Peso	aprox. 260 g
Datos específicos del módulo	
Soporta modo isócrono	No
Número de entradas	32
Longitud de cable	
• Sin apantallar	máx. 600 m
• Apantallado	máx. 1000 m
Conector frontal	40 pines
Tensiones, intensidades, potenciales	
Número de entradas accesibles simultáneamente	
• Montaje horizontal	
Hasta 40 °C	32
Hasta 60 °C	16
• Montaje vertical	32
Hasta 40 °C	
Separación galvánica	
• Entre los canales y el bus posterior	Sí
• Entre los canales	Sí
- En grupos de	16
Diferencia de potencial admisible	
• Entre circuitos diferentes	75 V DC / 60 V AC
Aislamiento ensayado con	500 V DC
Consumo	
• Del bus posterior	máx. 15 mA
Disipación del módulo	típ. 6,5 W
Estados, alarmas, diagnósticos	
Indicador de estado	Un LED verde por canal
Alarmas	ninguna
Funciones de diagnóstico	ninguna
Datos para seleccionar un sensor	
Tensión de entrada	
• Valor nominal	24 V DC
• En la señal "1"	de 13 a 30 V
• En la señal "0"	de -30 a +5 V
Intensidad de entrada	
• En la señal "1"	típ. 7 mA
Retardo a la entrada	
• De "0" a "1"	de 1,2 a 4,8 ms
• De "1" a "0"	de 1,2 a 4,8 ms
Característica de entrada	Según IEC 61131, tipo 1
Conexión de BERO a 2 hilos	posible
• Intensidad de reposo admisible	máx. 1,5 mA
Conexión de los sensores	Conector frontal de 40 pines

Figura 40: Datos Técnicos Entradas Digitales

3.5.2.4 Salidas Digitales

El módulo de salidas digitales utilizado para este proyecto es SM322 D032xDC24V/0.5A, su código Siemens es 6ES7 322-1BL00-0AA0, dicho módulo se distingue por las características siguientes:

- 32 salidas, con separación galvánica en grupos de 8.
- Intensidad de salida 0.5A.
- Tensión nominal de carga 24V DC.

- *Adecuado para electroválvulas, contactores de corriente continua y lámparas de señalización.*

El esquema eléctrico y diagrama de principio del módulo de salidas digital es:

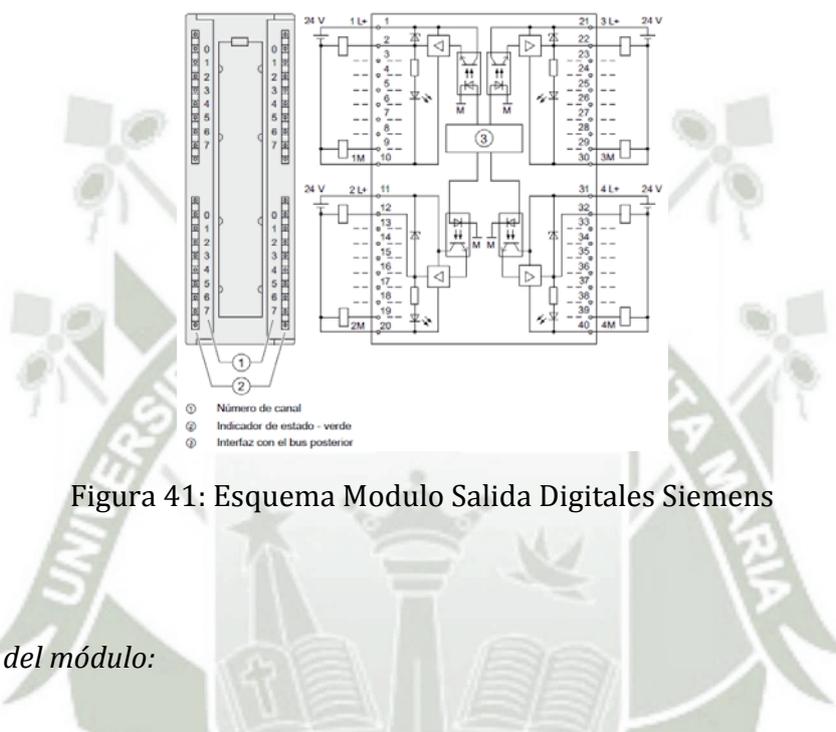


Figura 41: Esquema Modulo Salida Digitales Siemens

Datos técnicos del módulo:

Datos técnicos	
Dimensiones y peso	
Dimensiones A x A x P (mm)	40 x 125 x 117
Peso	Aprox. 260 g
Datos específicos del módulo	
Soporta modo isócrono	No
Número de salidas	32
Longitud de cable	
• Sin apantallar	máx. 600 m
• Apantallado	máx. 1000 m
Tensiones, intensidades, potenciales	
Tensión nominal de carga L+	24 V DC
Intensidad total de las salidas (por grupo)	
• Montaje horizontal	
Hasta 40 °C	máx. 4 A
Hasta 60 °C	máx. 3 A
• Montaje vertical	
Hasta 40 °C	máx. 2 A
Separación galvánica	
• Entre los canales y el bus posterior	Sí
• Entre los canales	Sí
En grupos de	Ø
Diferencia de potencial admisible	
• Entre circuitos diferentes	75 V DC / 60 V AC
Aislamiento ensayado con	500 V DC

Datos técnicos	
Consumo	
• Del bus posterior	máx. 110 mA
• De la tensión de carga L+ (sin carga)	máx. 160 mA
Disipación del módulo	típ. 6,6 W
Estados, alarmas, diagnóstico	
Indicador de estado	Un LED verde por canal
Alarmas	Ninguna
Funciones de diagnóstico	Ninguna
Datos para seleccionar un actuador	
Tensión de salida	
• En la señal "1"	mín. L + (-0,8 V)
Intensidad de salida	
• En la señal "1"	
Valor nominal	0,5 A
Rango admisible	de 5 mA a 0,6 A
• En la señal "0" (corriente residual)	máx. 0,5 mA
Retardo a la salida (con carga óhmica)	
• De "0" a "1"	máx. 100 μ s
• De "1" a "0"	máx. 500 μ s
Rango de resistencia de carga	de 48 Ω a 4 k Ω
Carga de lámparas	máx. 5 W
Conexión en paralelo de 2 salidas	
• Para mando redundante de una carga	Posible (sólo salidas del mismo grupo)
• Para incrementar la potencia	no posible
Activación de una entrada digital	posible
Frecuencia de conmutación	
• Con carga óhmica	máx. 100 Hz
• Con carga inductiva, según IEC 947-5-1, DC 13	máx. 0,5 Hz
• Con carga de lámparas	máx. 10 Hz
Limitación (interna) de la tensión de corte inductiva	típ. L + (-53 V)
Protección de salidas contra cortocircuitos	Sí, electrónica
• Umbral de respuesta	típ. 1 A
Conexión de actuadores	Conector frontal de 40 pines

Figura 42: Datos Técnicos Salidas Digitales

3.5.2.5 Entradas Analógicas

El módulo de entradas analógicas utilizado para este proyecto es SM331 AI8x12BIT, su código Siemens es 6ES7 331-7KF02-0AB0, dicho modulo se distingue por las características siguientes:

- 8 entradas formado 4 grupos de canales.
- Tipo de medición ajustable por grupo de canales.
 - ✓ Tensión
 - ✓ Intensidad
 - ✓ Resistencia
 - ✓ Temperatura

- Resolución ajustable por grupo de canales (9/12(14 bits + signo).
- Selección del rango de medición discrecional por cada grupo de canales.
- Diagnostico parametrizable y alarma de diagnóstico.
- Supervisión de valores límite ajustable para 2 canales.
- Alarma de proceso ajustable al rebasarse el valor límite.
- Con separación galvánica frente a la CPU y a la tensión de carga (no en 2DMU).

La resolución del valor medido depende directamente del periodo de integración elegido. Por tanto, cuanto más prolongado sea este para un canal de entrada analógica tanto mayor será la resolución del valor medido.

En la figura 43, se mostrara las distintas posibilidades de conexiones, para el módulo de entradas analógicas:

✓ *Conexión: Medición de Tensión*

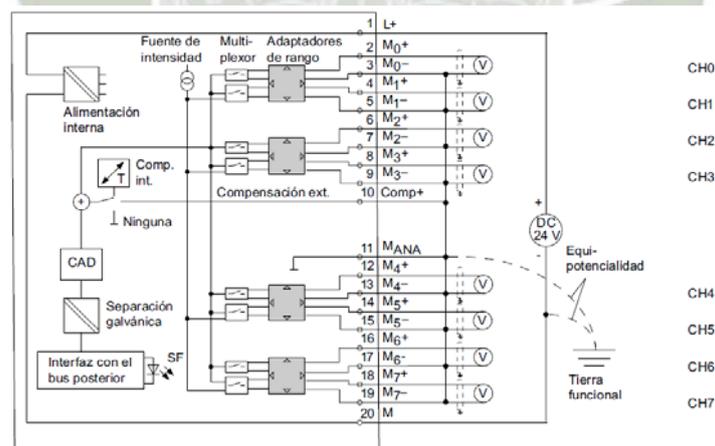


Figura 43: Conexión y Características Módulos Entradas Analógicas

✓ *Conexión: Transductor a 2 y 4 hilos para medir la intensidad*

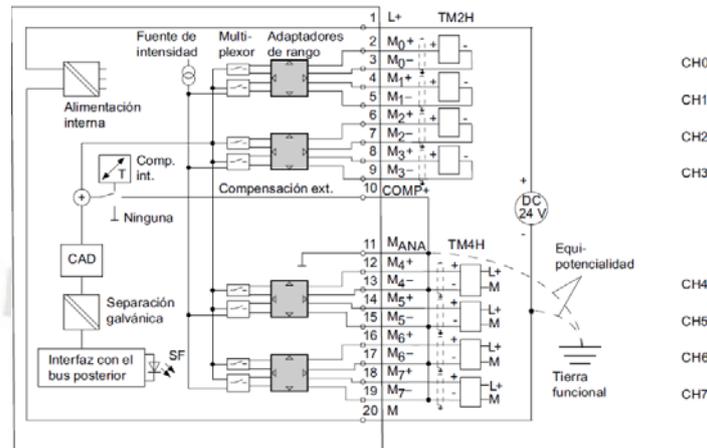


Figura 44: Conexión Módulos Entradas Analógicas con transductor de 2 -4hilos

El módulo SM331 AI8x12bit, dispone de adaptadores de rango de medición. El tipo y los rangos de medición se ajustan mediante los adaptadores correspondientes y con el parámetro “Rango de medición” en STEP7.

El modulo esta pre-ajustado al tipo de medición “Tensión” y ala rango de medición “ +- 10V”.

Este tipo y este rango de medición se pueden utilizar sin necesidad de parametrizar el modulo SM 331 AI8x12bit mediante STEP7.

3.5.2.6 Salidas Analógicas

El módulo de salidas analógicas utilizado para este proyecto es SM322 A04x12BIT, su código Siemens es 6ES7 332-5HD01-0AB0, dicho modulo se distingue por las características siguientes:

- 4 salidas en un grupo.
- Las salidas se pueden seleccionar por cada canal como se indica a continuación:
 - ✓ Salida de tensión.
 - ✓ Salida de Intensidad.
- Resolución de 12 bits.
- Diagnostico parametrizable y alarma de diagnóstico.
- Con separación galvánica respecto a la conexión del bus posterior y a la tensión de carga.

El esquema eléctrico y diagrama de las diferentes conexiones son:

- ✓ Conexión: a 2 y 4 hilos para medir la tensión

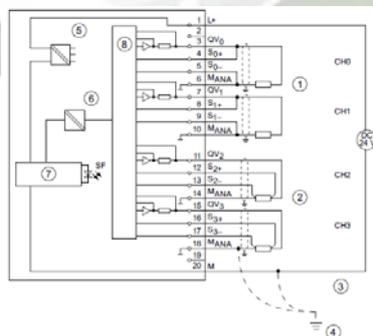


Figura 45: Conexión y Características Módulos Salidas Analógicas

✓ *Conexión salida de Intensidad*

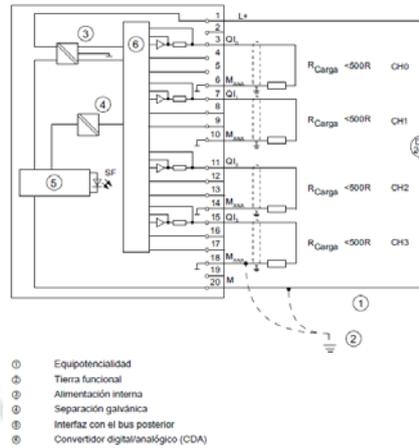


Figura 46: Conexión de Salidas Analógicas, modo señal de intensidad

Las salidas se pueden parametrizar y cablear como salidas de tensión o de intensidad, o bien desactivarlas. Las salidas se parametrizan mediante el parámetro “Tipo de salida” en STEP7.

El modulo está ajustado por defecto al tipo de salida “tensión” y al rango de salida “+/- 10 V”. Es posible utilizar este tipo y este rango de salida sin necesidad de parametrizar el módulo SM332 A04x12BIT mediante STEP7.

Los rangos de medida para este módulo tanto para tensión como intensidad son:

Clase de salida seleccionada	Rango de salida
Tensión	De 1 a 5 V De 0 a 10 V $\pm 10 V$
Intensidad	De 0 a 20 mA De 4 a 20 mA $\pm 20 mA$

Figura 47: Salidas Analógicas rango de tensión e intensidad

3.5.3 Variador de Velocidad

El variador de velocidad utilizado para este proyecto de tesis es el Altivar ATV31, de la marca Telemecanique de las siguientes características:

Marca	Telemecanique
Codigo	ATV31HU75N4A
Potencia	7,5 KW/ 10 HP
Tensión	380/500 V
Frecuencia	60 Hz
Corriente de salida Maxima	17 Amp



Figura 48: Variador de Velocidad 7.5KW Telemecanique

3.5.4 Relé de Control

Se utilizaron relés de control de la marca Schneider Electric, estos cumplen la función de ser habilitados por las salidas del PLC de 24V y activar una salida normalmente abierto para poder dejar circular una tensión de 220V que activara contactores y alarmas, a continuación se detallan las características:



Figura 49: Relé de Control

<i>Voltaje Alimentación</i>	<i>24V DC</i>
<i>Mínimo Voltaje de Alimentación</i>	<i>12V DC</i>
<i>Voltaje de Salida</i>	<i>250V</i>
<i>Máxima Corriente de Salida</i>	<i>6 A</i>
<i>Tipo de Control</i>	<i>Sin Pushbutton</i>
<i>Temp. Ambiente para operación</i>	<i>-40...55°C</i>
<i>Grado de Protección IP</i>	<i>IP40</i>

Tabla 9: Datos Técnicos Rele de Control

3.5.5 Contactores

Para este proyecto se utilizaron contactores de la marca SIEMENS, el cual es un componente electromecánico que tiene por objeto establecer o interrumpir el paso de corriente, para este caso la corriente hacia las bombas de alimentación de agua hacia calderas, tan pronto se de tensión a la bobina, las características de los contactores utilizados son:



Figura 50: Contactores del Proyecto

Marca	SIEMENS
Modelo	ERT1024-1AG20
Bobina	110 V
Intensidad	12 A - AC3
Tamaño	S0
Protección IP	IP20

Tabla 10: Datos técnicos Contactores

3.5.6 Llave Termomagnetica

Para este proyecto utilizamos llaves termomagnéticas dimensionadas de acuerdo a la capacidad del equipos que se va a proteger, en este caso los motores de las bombas, una llave termomagnetica tiene la función de poder interrumpir el fluido eléctrico cuando este sobrepasa ciertos valores máximos, como corrientes y sobrecalentamiento. En este caso se utilizaron laves termomagneticas de la marca Allen Bradley de las siguientes características:



Figura 51: Llave termomagnetica

Marca	Allen Bradley
Modelo	140M-C2E
Rango Ajustable de Corriente	10-16 A
Voltaje	200- 570 V

Tabla 11: Datos técnicos Llave Termomagnetica

3.5.7 Válvula Proporcional

Una de las etapas de mejoras es la línea de ingreso de condensado, para lo cual se instaló una válvula proporcional de la Marca Samson, la cual regula el flujo de ingreso de vapor hacia el tanque Desaireador, la válvula Samson trae un regulador IP, el cual se montó en la válvula para que regule de acuerdo al ingreso de señal de 4-20 mA enviada por el PLC.

Las características de este equipo son:



Figura 52: Válvula Proporcional Samson

Marca	SAMSON
Diámetro Tubería	2 Pulgadas
Ingreso señal	4-20 mA
Fluido	Vapor

Tabla 12: Datos Técnicos Válvula Proporcional Samson

3.5.8 Sensor de Presión

Para el control de la presión y poder desarrollar la lógica de programación y por ende el encendido y apagado de las bombas se va a utilizar un sensor de presión de 0-16 bar, con salida de 4-20mA, el cual enviara la señal al PLC, las características de este equipo son:



Figura 53: Sensor de Presión

Marca	Danfoss
Modelo	AKS33
Salida Señal	4 – 20 mA
Conexión	¾ NPT

Tabla 13: Datos Técnicos Sensor de Presión

CAPITULO IV: IMPLEMENTACION Y PUESTA EN MARCHA DEL SISTEMA DE ALIMENTACION DE AGUA HACIA CALDERAS, CON CONTROL PID Y CONTROL FUZZY EN LABVIEW

En este capítulo encontraremos el modelo matemático a través del método de Identificación del Sistema, desarrollando y explicando cada paso y también se desarrollara la implementación del control PID para el sistema de alimentación de agua hacia calderas y al final desarrollaremos el Sistema de Control Fuzzy en el entorno LabView el cual simularemos y demostraremos en su funcionamiento.

En los capítulos anteriores desarrollamos los equipos que se utilizaron para implementar en este proyecto, ahora desarrollaremos la lógica de programación.

El software utilizado para desarrollar la lógica de control es el STEP7, con este software programaremos el PLC S7-300 y el lenguaje de programación es ladder y lista de instrucciones. Para el Control Fuzzy utilizaremos la programación en el entorno LabView.

4.1. Identificación del Proceso de Alimentación de agua hacia Calderas

En este punto se estudiara el comportamiento dinámico de la presión del agua que alimenta las calderas de Agroindustrial del Perú. Esta variable constituye la más importante del sistema de alimentación de agua ya que se encuentra relacionad con el control del proceso y determina la eficiencia de nuestro proceso.

Para poder modelar matemáticamente este sistema complejo a partir de principios físicos fundamentales, sería necesario evaluar las relaciones termodinámicas y fisicoquímicas que se producen en el interior de todo nuestro sistema hasta obtener un modelo aceptable que relacione la entrada con la salida de interés. También es necesario incluir las variables dinámicas introducidas en el tiempo, producto de fenómenos químicos y físicos que alteran constantes del sistema como son los coeficientes de transferencia de calor radiante y convectivo.

Este procedimiento puede incluir muchas ecuaciones diferenciales altamente acopladas. Uno de los principales problemas que se tiene que afrontar es el gran número de parámetros experimentales que se deben hallar para cada proceso particular, muchos de los cuales exigen mediciones muy precisas e incluso inaccesibles.

Este modelamiento es tipo “interno” y permite un conocimiento profundo y al detalle de las interacciones entre las distintas variables del sistema.

Ante esta problemática y a las luces del objetivo principal, que es realizar el control de alimentación de agua hacia calderas, se puede utilizar un modelamiento matemático de tipo “entrada-salida”, en el que se consideren solo los valores de las variables manipuladas y controladas, dejando las interacciones internas de lado. Si se asume que el sistema puede modelarse como un sistema causal, lineal, relajado e invariante en el tiempo, entonces el modelo a obtener puede expresarse como una función de transferencia.

Para lograr este objetivo, se puede utilizar los procedimientos estadísticos de Identificación de Sistemas. Este es un campo del modelamiento matemático de sistemas dinámicos que utilizan datos experimentales como punto de partida, a los cuales se aplican un conjunto de técnicas estadísticas con el fin de ajustar los datos a una estructura dinámica determinada por el investigador. En este caso, no hay necesidad de conocer las leyes internas que gobiernan el comportamiento del sistema. Por esto, los modelos obtenidos por estas técnicas se denominan de “caja negra” Figura 54.

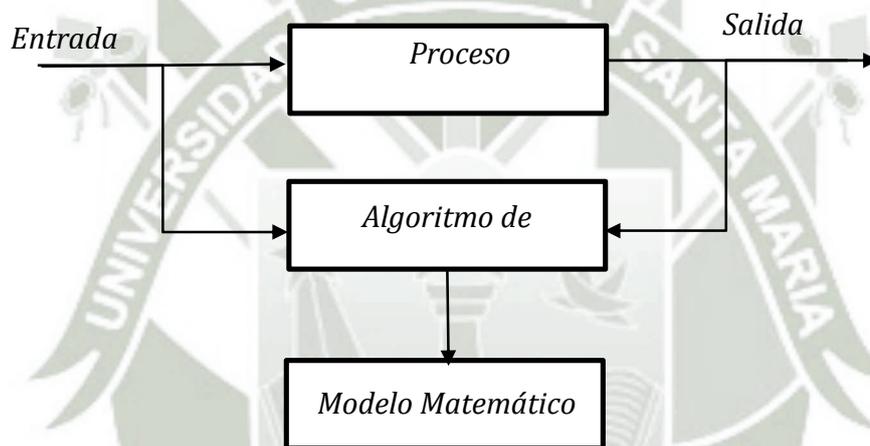


Figura 54: Esquema General de Identificación

El término “identificación de Sistemas” adoptado por el especialista de control, puede ser definido como la obtención de la estructura y parámetros de un modelo matemático, que reproduce con suficiente exactitud las características dinámicas del proceso objeto de estudio, para los fines de deseado de control automático.

En la identificación de sistemas se observan tres elementos fundamentales:

1. *Experimento: Debe diseñarse un experimento que involucre entre otros, las señales de excitación, captura de datos y organización de información.*
2. *Clase de modelos: Se busca el mejor modelo disponible que refleje el comportamiento del sistema. Se incluye estructuras, retardos, linealidad.*
3. *Criterios: Minimizar un índice de performance que refleje el nivel de proximidad del modelo respecto al comportamiento del sistema a identificar.*

La identificación de sistemas no es un metodología totalmente segura, la cual puede ser utilizada sin interacción con el usuario. Las razones son:

1. *Se debe encontrar una apropiada estructura del modelo. Esto puede ser una dificultad, sobre todo si la dinámica del sistema es no lineal.*
2. *Presenta sin dudas datos no perfectos en la vida real. El factor que los datos grabados sean perturbados por los ruidos, debe e*
3. *El proceso puede variar con el tiempo, lo cual puede causar un problema sobre todo si se intenta describir con un sistema invariante en el tiempo.*
4. *Puede ser difícil o imposible de medir algunas variables o señal de importancia para el modelo.*

4.1.1 Método de Identificación

En términos generales, un experimento de identificación es realizado excitando al sistema (usando algún tipo de entrada tales como señales escalón, sinusoidal, PRBS (Pseudo Random

Binary Signal) o aleatoria) y observando las señales de entrada y de salida en un intervalo de tiempo. Estas señales son normalmente recolectadas en un computador para luego procesar esta información.

En la práctica, la estimación de la estructura y parámetros del proceso son hechos frecuentemente de forma iterativa. Esto significa que la estructura tentativa es elegida y los parámetros correspondientes son estimados.

El modelo obtenido es examinado para ver si es una representación apropiada del sistema. Si este no es el caso, alguna otra estructura más compleja debe ser considerada, estimando sus parámetros, valiendo el nuevo modelo, etc.

El proceso de obtener un modelo a partir de los datos de entrada y salida del proceso sigue los siguientes pasos:

- *Seleccionar las variables de entrada (variable manipulada) y salida (variable controlada).*
- *Seleccionar un conjunto de datos experimentales de entrada y de salida realizando los ensayos al proceso.*
- *Examinar y pulir los datos (filtrar los datos.)*
- *Seleccionar la estructura del modelo y elegir un algoritmo particular para determinar sus parámetros.*
- *Validar el modelo identificado y sus incertidumbres, esto engloba un análisis en el tiempo y en frecuencia del modelo obtenido.*

El proceso es cíclico tal como se observa en la figura 55. Si la respuesta no es satisfactoria, se tendrá que generar a cualquiera de las etapas anteriores y modificar el método de identificación, la estructura del modelo o los datos experimentales.

La identificación de sistemas incluye las siguientes etapas:

- *Planificar experimental*
- *Pretratamiento de los datos experimentales*
- *Estimación de modelos no –paramétricos*
- *Selección de la estructura del modelo*
- *Formación de un criterio*
- *Estimación de parámetros*
- *Validación del modelo obtenido*

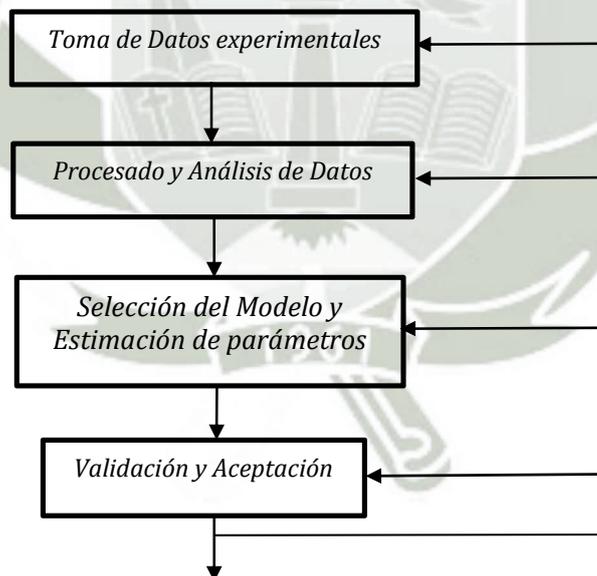


Figura 55: Metodología de identificación

4.1.2 Planificación Experimental e Identificación No Paramétrica

Cuando se investiga un proceso del que se tiene un conocimiento previo pobre, lo razonable es comenzar con un análisis transitorio o de respuesta en frecuencia para lograr una estimación grosera de la dinámica y de las perturbaciones, pudiéndose utilizar los resultados para planificar posteriores experimentos.

Generalmente experimentos como la respuesta al escalón ofrecen información útil sobre el retardo de tiempo, constantes de tiempo y ganancia del proceso. Un análisis de respuesta estática permite analizar la respuesta estacionaria que presenta el sistema ante distintos estímulos, lo que se utiliza para determinar la región lineal de la planta. Basándose en los resultados obtenidos se puede mejorar la estructura del modelo y pueden diseñarse nuevos experimentos.

En el caso específico de la identificación del sistema de alimentación de agua hacia calderas utilizada en esta tesis, se seleccionó como variable de entrada o manipulada el flujo de ingreso de agua que regresa del proceso o tanque de condensado e ingresa al tanque desaireador y como variable de salida o controlada, la presión de salida del condensado que alimenta las calderas a través de las bombas.

Siguiendo los lineamientos anteriormente establecidos, se realizó un primer análisis a través de una prueba de ganancia estática, que sirvió de guía para estimar diversos modelos no paramétricos como también modelos paramétricos del proceso de interés.

El procedimiento de identificación se llevó a cabo en el sistema de alimentación de agua hacia calderas de Agroindustrial del Perú que se muestra en la figura 55.

El sistema de control de alimentación de agua hacia calderas es de tipo ON/OFF utilizando como sensor de presión un sensor Danfoss, que enviara la señal a leer a un display, el cual indica la presión de salida del proceso y este sirve de visualización para poder activar o desactivar las bombas que alimentan a las calderas.

Para poder actuar sobre la variable manipulada, se colocó una electroválvula que regula el flujo de ingreso de condensado al tanque desaireador. En la parte superior de la figura se aprecia la válvula que regula el flujo y el sensor de presión se coloca a la salida del proceso y su display es colocado en el tablero eléctrico para una mejor visualización.



Figura 56: Sistema de Alimentación de Agua hacia Calderas de Agroindustrial del Perú, para la recolección de datos

Considerando que la presión de salida constituye la variable controlada o variable de proceso (PV) y que el flujo de ingreso de condensado al sistema representa la variable manipulada o variable de control (CV), el modelo matemático a obtener tendrá a la presión del vapor como variable de salida y al flujo de ingreso de condensado como variable de entrada. En la figura 57, se presenta un diagrama tecnológico de la instalación experimental utilizada en la recolección de datos del proceso de variación de la presión del vapor en el sistema de alimentación de agua hacia calderas.

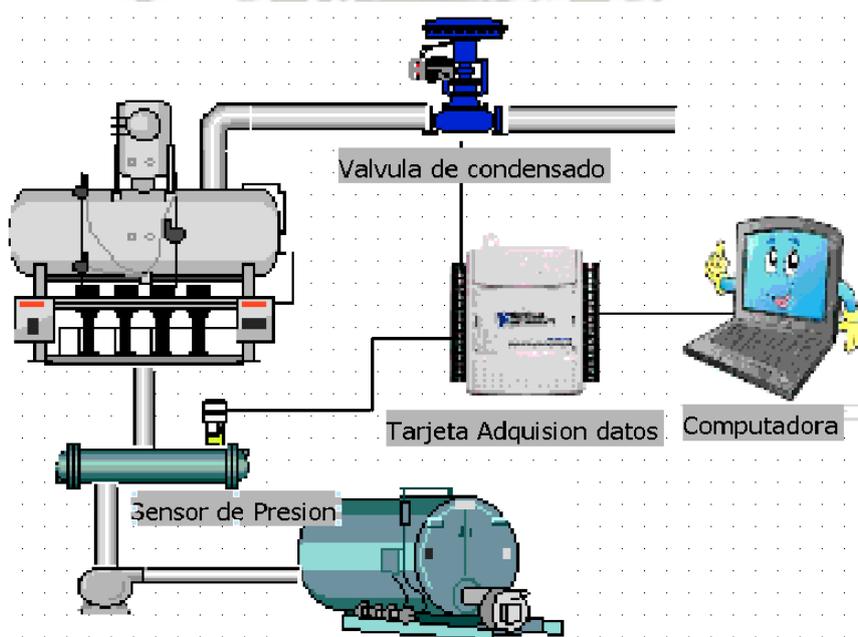


Figura 57: Diagrama Tecnológico de la instalación experimental utilizada en la recolección de datos del proceso de variación de la presión del vapor

Para efectuar la experimentación se contó con los siguientes equipos:

- Sensor de Presión Danfoss

- *Válvula ON-OFF de la marca Spirax Sarco, controlado por electroválvula festo*
- *Tarjeta DAQ National Instruments*
- *Computadora personal*

Durante la experimentación se observó algunos fenómenos propios de este sistema:

- *La cantidad de condensado que consumen las calderas en parte del proceso, es menor que la cantidad que las tres calderas consumen. Por esto, cambios muy pequeños en la apertura de la válvula ocasionan grandes cambios en la presión del sistema. Se espera entonces obtener un modelo con una gran ganancia de estado estacionario.*
- *Se observó un tiempo de retardo considerable, producto de la lenta dinámica del proceso.*
- *La presión de salida del sistema de alimentación a calderas tiene que ser mayor a 180psi, para poder superar la presión de las calderas.*

Una vez establecidas las condiciones de experimentación, se procedió a realizar la prueba de ganancia estática. Como se mencionó, esta etapa tiene como objetivo conocer la región de operación en la que el sistema de alimentación de agua hacia calderas puede considerarse como un sistema lineal. Esta prueba consiste en:

- *Aplicar una entrada constante al sistema de alimentación de agua hacia calderas durante tiempo indefinido hasta obtener el estado estacionario.*
- *Registrar los valores de entrada y salida para el estado estacionario.*
- *Incrementar ligeramente la entrada y repetir el procedimiento.*

Con esta prueba se aprecia el efecto que la señal de entrada de distintos niveles de magnitud tiene sobre la señal de salida.

En la figura 58 se muestra los datos adquiridos mediante esta prueba. Se observa que existe una zona razonablemente lineal entre 10% y 25% de apertura de la válvula. También se puede inferir que la zona lineal se prolonga incluso por encima de la región sujeta a experimentación, pero que no puede considerarse por tener la restricción de seguridad (no exceder la presión de trabajo).

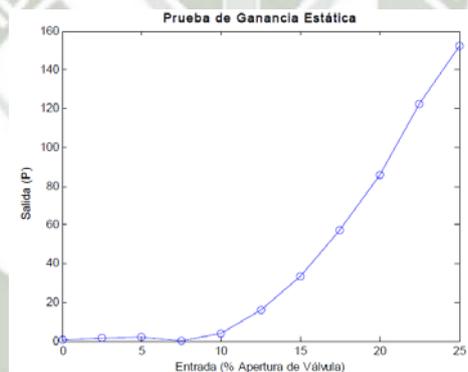


Figura 58: Análisis de ganancia Estática, en el que se grafica la salida del sistema en estado estacionario, para diversas magnitudes de la señal de entrada

Luego, se realizó un segundo examen preliminar, que consiste en:

- Introducir un paso escalón en la señal de ingreso válvula de ingreso de condensado del sistema de alimentación de agua hacia calderas, entre un valor inicial y final. Ambos valores se deben encontrar dentro de la zona lineal encontrada en la prueba de

ganancia estática (10% - 25% apertura de válvula). Los valores elegidos fueron 12.5% a 22.5% de apertura de válvula.

- Medir la presión de la salida del sistema y registrar estos datos y el tiempo en el que fueron producidos.

Con esta prueba se espera encontrar las principales características dinámicas del sistema como son las constantes de tiempo más significativas, el retardo de tiempo y la ganancia. Los datos adquiridos mediante esta prueba preliminar se muestran en la figura 59, donde también se muestra la señal escalón aplicada a la entrada.

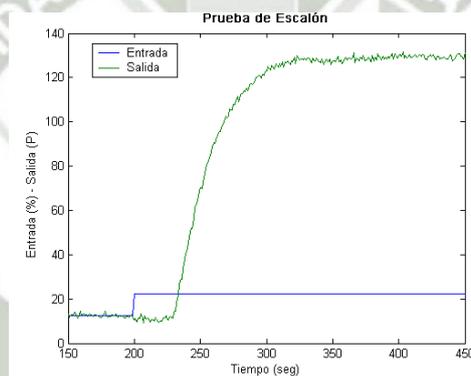


Figura 59: Prueba paso escalón para una entrada entre 12.5% y 22.5% de apertura de válvula

Se observa que con este escalón de entrada se cubre casi toda la región lineal de comportamiento dinámico de la presión del sistema de alimentación de agua hacia caldera.

De la figura 60 se obtiene los siguientes parámetros:

- Retardo de tiempo = 30 seg
- Constante de tiempo principal del sistema = 32 seg

- *Tiempo de estabilización = 120 seg*
- *Ganancia = 9.85 P/%*
- *Orden del Proceso = Segundo Orden*

Entonces se puede afirmar, que el comportamiento dinámico de la presión del sistema de alimentación de agua hacia calderas a la salida se representa mediante la expresión:

$$G_p(s) = \frac{K}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}$$

donde:

$G_p(s)$ *Función de transferencia del proceso de variación de la presión del sistema de alimentación de agua hacia calderas*

K, τ_1, τ_2 *Ganancia y constantes de tiempo del proceso respectivamente*

Así mismo $G_p(s)$ se define como:

$$G_p(s) = \frac{Y_p(s)}{U_p(s)}$$

donde:

$Y_p(s)$ *Presión de salida del sistema*

$U_p(s)$ *Señal de entrada del sistema*

Por ser una prueba preliminar, estos resultados son aun aproximados.

Con estos resultados se puede diseñar el experimento para obtener los datos necesarios para realizar la identificación paramétrica del proceso de variación de la presión en el sistema de alimentación de agua hacia calderas.

Las propiedades de los datos son usados en la estimación de los parámetros, son cruciales para obtener un modelo de buena calidad. Uno de estos parámetros es el periodo de muestreo, el cual no debe ser muy pequeño ya que los polos del modelo identificado se sitúan alrededor de $z=1$, ni muy grandes, que se pierda información fundamental de la dinámica del sistema. En líneas generales, un buen criterio para obtener un periodo de muestreo adecuado consiste en dividir el tiempo de estabilización entre 10 o 2- aprox. Para este proceso, se determina un periodo de muestreo de 5s.

Una de las propiedades más importantes de la señal de entrada que se utilizara para identificar el proceso es la "excitación persistente". Esto implica que la matriz de covarianzas de esta señal sea definida positiva. Bajo estas circunstancias, el proceso es excitado en distintas frecuencias, lo que permite estimar un modelo que contenga la mayor cantidad de información posible acerca del sistema real.

Una señal que posee estas características es la secuencia binaria pseudoaleatoria (PRBS). Las características de esta señal (amplitud, periodo y anchos de pulso mínimo y máximo) se obtienen directamente de la información recogida con las experiencias preliminares.

La amplitud de la PRBS es este caso se determina de tal forma que abarque la mayor parte de la región lineal. Como se expresó un rango adecuado es entre 12.5% y 22.5% de apertura de válvula.

Los anchos de pulso mínimo y máximo, se determinan aplicando las siguientes reglas prácticas:

$$T_{max} \approx \frac{2\pi T}{0.15}$$

$$\frac{2\pi T}{10} < T_{min} < \frac{2\pi T}{5}$$

Donde:

T Periodo de muestreo

T_{max} Ancho de pulso máximo

T_{min} Ancho de pulso mínimo

Los anchos de pulso mínimo y máximo calculados son entonces $T_{max}=190\text{seg}$ y $T_{min}=10\text{seg}$.

El periodo de cada pulso (T_{PRBS}) se elige como la suma de $T_{max}+T_{min}$. De esta forma $T_{PRBS} = 200\text{seg}$.

La duración del experimento también afecta los parámetros estimados. Una regla general consiste en aplicar entre 10 y 20 ciclos completos de la PRBS. La señal de excitación diseñada se muestra en la figura 60.

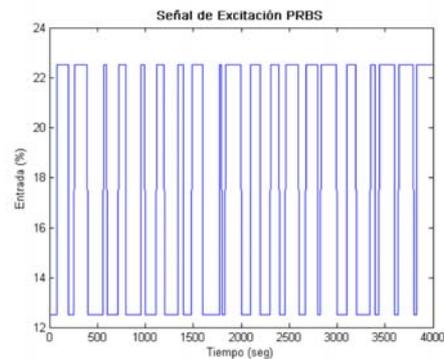


Figura 60: Señal PRBS de excitación de la presión de vapor en la caldera. Amplitud entre 12,5% y 22,5% de apertura de valvula, $T_{min}=10\text{seg}$, $T_{max}=190$, $T_{prbs}=200\text{seg}$, duracion total=20seg

La respuesta del sistema ante la excitación con PRBS se muestra en la figura 61. Los datos correspondientes a la figura 60 fueron almacenados en un archivo para su posterior utilización en el cálculo de los coeficientes del modelo paramétrico del sistema de alimentación de agua hacia calderas de Agroindustrial del Perú.

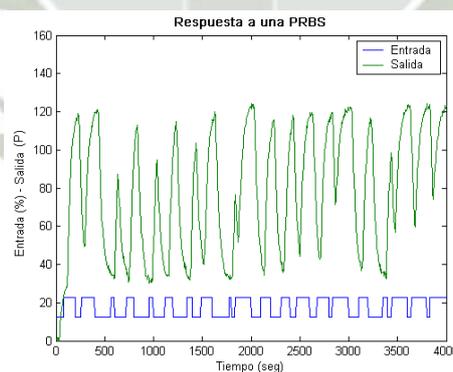


Figura 61: Respuesta de la presión del sistema de alimentación de agua hacia calderas frente a una señal de entrada tipo PRBS

4.1.3 Preprocesamiento de los Datos Experimentales

Una vez se dispone de los datos del proceso de variación de la presión en el sistema de alimentación de agua hacia caldera, es necesario realizar un tratamiento previo de los mismos antes de ser utilizados en los algoritmos de identificación. Existen distintas deficiencias en los datos adquiridos que deben ser corregidos para garantizar una correcta estimación de parámetros, entre las que se encuentran:

- *Perturbaciones de altas frecuencias en los datos.*
- *Ocasionales datos incorrectos y/o olvidados.*
- *Derivas, offset y perturbaciones a bajas frecuencias*
- *Los valores numéricos de las distintas señales no tienen el mismo orden de magnitud.*
- *Presencia de tiempos de retardo importantes*

Las perturbaciones de altas frecuencias aparecen cuando se elige un tiempo de muestreo muy pequeño. En los datos adquiridos no se aprecia la presencia de esta deficiencia.

Los datos incorrectos y olvidados por otra parte se presentan cuando existe deficiencia en el sistema de adquisición de datos. Para corregir esta situación, existen algoritmos que permiten “arreglar” los datos adquiridos sin falsificarlos. En el caso estudiado, se presenta un pequeño periodo transitorio al inicio de la adquisición de datos, el cual se elimina para que no influya en la estimación de los parámetros.

Las derivas, offset y perturbaciones a bajas frecuencias se deben a factores externos, que es deseable incluir en el modelo. Aso mismo, se tiene que el modelo paramétrico a determinar, se

encuentra en función del operador de desplazamiento hacia atrás (q^{-1}), el cual implica que la respuesta del proceso debe ocurrir alrededor de un punto de operación al que se considera como “cero”. Para solucionar esta deficiencia se utiliza la función *detrend* de Matlab, la cual permite eliminar el *offset* y las derivas de los datos adquiridos.

La diferencia de valores numéricos entre señales se presenta frecuentemente en sistemas MIMO, la utilizar señales de entrada y de salida que numéricamente tienen elevada diferencia de magnitudes. Finalmente, la presencia de tiempo de retardo se analiza durante la identificación no paramétrica, la cual en este caso ofrece resultados más confiables.

Un procedimiento adicional es la división de los datos en “datos para la identificación” u “datos para la validación”. Esto se realiza con el objetivo de validar los modelos con datos que no han sido utilizados durante la identificación. Los datos adquiridos luego de ser preprocesados se muestran en la figura 62.

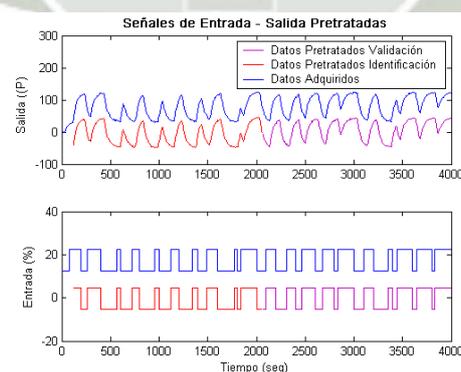


Figura 62: Pretratamiento de datos adquiridos

4.1.4 Comprobación de los resultados obtenidos en la Identificación no paramétrica

Utilizando Análisis por Correlación

El análisis por correlación es un método basado en técnicas estadísticas y tiene como objetivo estimar la respuesta impulso del proceso. Con este método no se obtiene una función de transferencia sino una secuencia o una gráfica de la respuesta impulso del proceso. Este análisis es útil para comprobar la información obtenida durante la identificación no paramétrica.

La respuesta impulso del proceso se determina a partir de la correlación que existe entre la señal de entrada y a la señal de salida. Las señales de prueba más utilizadas en este ensayo son las secuencias de ruido blanco o en la práctica, las PRBS. En resumen, el método consiste en solucionar la siguiente ecuación:

$$\widehat{R}_{yu}(\tau) = \sum_{k=0}^{\infty} \widehat{g}(k) \widehat{R}_u(\tau - k)$$

Donde:

\widehat{R}_{yu} *Correlación cruzada entre la salida "y" y la entrada "u"*

\widehat{R}_u *Autocorrelacion de la entrada "u"*

\widehat{g} *Respuesta impulso estimada del proceso*

k, τ *Número de la muestra y del desplazamiento respectivamente*

La correlación cruzada entre la salida, la entrada y la auto correlación de la entrada se pueden definir como:

$$\widehat{R}_{yu}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{k=1-\min(\tau,0)}^{N-\max(\tau,0)} y(k)u(k+\tau) \quad \tau = 0, \pm 1, \pm 2, \dots,$$

$$\widehat{R}_u(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N-\tau} u(k)u(k+\tau)$$

Donde:

N – Número total de muestras

El problema queda muy simplificado en el caso en que se utilicen señales de entrada especiales con funciones de auto correlación sencillas. Cuando se utiliza, por ejemplo, un ruido blanco como señal de prueba, sabiendo que $\widehat{R}_u(\tau) = 0$ para $\tau > 0$ la solución se reduce a:

$$\hat{g}(\tau) = \frac{\widehat{R}_{yu}(\tau)}{\widehat{R}_u(0)}$$

Siendo fácilmente calculable a partir de los datos experimentales

En el caso en que la señal de excitación no sea un ruido blanco, el cálculo de la solución no es trivial. Por esto, es que se proponen varios métodos para resolverla. Uno de ellos es el método de la respuesta impulsional finita (FIR). En este caso se considera que la función impulso es de orden finito: $g(k)=0$ para $k \geq M$. Para ser utilizado, es necesario que M sea mayor que la constante dominante del sistema. Así, la respuesta impulso puede calcularse según:

$$\widehat{R}_{yu}(\tau) = \sum_{k=0}^{M-1} \widehat{g}(k) \widehat{R}_u(\tau - k)$$

Si se desarrolla la ecuación anterior y se ordena en forma matricial, podemos encontrar un sistema de ecuaciones lineales:

$$\widehat{R}_{yu} = \widehat{R}_u x \widehat{g}$$

Las propiedades básicas del análisis por correlación son:

- Da una rápida información sobre la constante de tiempo dominante del sistema y del retardo puro
- Da como resultado una tabla de datos o una gráfica que no pueden ser utilizados directamente en simulación
- Los resultados obtenidos parten del hecho de que la entrada es independiente de las perturbaciones y/o ruido, esto limita el uso de este método a sistemas sin retroalimentación (lazo abierto)

En Matlab, el algoritmo de análisis por correlación se encuentra implementado en el System Identification Toolbox en la función *cra*, la misma que estima la respuesta impulso del sistema, partiendo de los datos de entrada y de salida del mismo. Aplicando esta función a los datos adquiridos de la caldera, se obtuvo la respuesta impulsiva que se muestra en la figura 63.

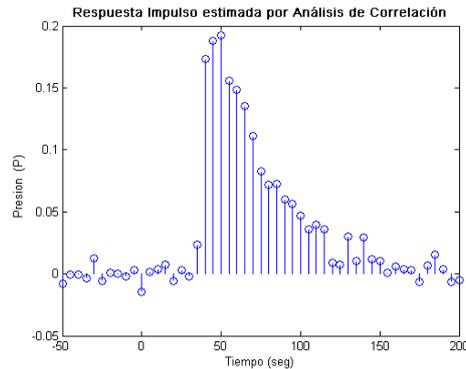


Figura 63: Respuesta impulso de la presión del sistema de alimentación de agua hacia calderas

Se observa que la respuesta impulso encontrada mediante análisis por correlación tiene la forma característica de la respuesta de un proceso de segundo orden, lo que verifica la observación realizada en la identificación no paramétrica. Así mismo, se logra una mejor estimación del retardo de tiempo del proceso, el cual es de $t=35$ seg.

4.1.5 Comprobación de los resultados Obtenidos en la Identificación no Paramétrica utilizando Análisis Espectral

Los sistemas lineales pueden también definirse a partir de la respuesta frecuencial $G(j)$. Mientras que las respuestas transitorias y el análisis por correlación tienen por objetivo estimar la respuesta impulsional, las técnicas frecuenciales tiene por objetivo la estimación directa de la respuesta del sistema en el dominio de la frecuencia.

El espectro de una señal $u(t)$ o periodograma, $\Phi_u(\omega)$, se puede interpretar como una media de su contenido frecuencial y se define como:

$$\Phi_u(w) = \frac{1}{N} |U(w)|^2$$

Donde

$U(w)$ Transformada de Fourier de la señal de entrada $u(t)$

N Número total de muestras

Las propiedades de los periodogramas son:

- *Una señal puramente senoidal presenta picos en este diagrama*
- *Con otros tipos de señales el resultado obtenido es muy fluctuante*
- *Suavizando visualmente los resultados obtenidos puede obtenerse una idea del contenido frecuencial de la señal*

Dada una señal $u(t)$ obtenida de un proceso estocástico con una densidad especial $\Phi_u(w)$, el valor estimado $\hat{\Phi}_u^N(w)$ para N muestras será:

$$\hat{\Phi}_u^N(w) = \Phi_u(w) + R_N$$

Donde

R_N Término residual, responsable de las fluctuaciones

El término R_N se caracteriza por tener un valor medio y una variancia que depende del tipo de señal y puede tender a cero a medida que se aumenta N .

Como resultado de aplicar la transformada de Fourier al modelo representado por:

$$y(t)=G(q)u(t)+v(t)$$

dónde:

$y(t)$ Salida o respuesta del proceso

$u(t)$ Entrada al proceso

$G(q)$ Función de Transferencia del proceso

$v(t)$ Perturbaciones medibles como no medibles

Se obtiene:

$$Y(w)=G(jw)U(w)+V(w)$$

Dónde:

$Y(w), U(w), V(w)$ Transformada de Fourier de las señales correspondientes.

$G(iw)$ Función de Transformada del proceso expresada en el dominio de la frecuencia.

Considerando que las señales $u(t)$ y $v(t)$ son independientes, al multiplicar la ecuación anterior por $U(w)$ tenemos:

$$\widehat{\Phi}_{yu}^N(w) = \widehat{G}_N(jw)\widehat{\Phi}_n^N(w)$$

Dónde:

$\hat{\Phi}_{yu}^N(\omega)$ *Estimación del espectro cruzado entre la señal de salida y la señal de entrada para N muestras.*

$\hat{\Phi}_n^N(\omega)$ *Estimación del espectro de la señal de entrada para N muestras*

$\hat{G}_N(j\omega)$ *Estimación de la respuesta espectral del sistema para N muestras*

La estimación de la función espectral se realiza mediante:

$$\hat{G}_N(j\omega) = \frac{\hat{\Phi}_{yu}^N(\omega)}{\hat{\Phi}_u^N(\omega)}$$

En Matlab, el algoritmo de análisis espectral se encuentra implementado en función `spa`, la misma que estima valores de la función de transferencia sistema para determinadas frecuencias, con los que se obtiene su diagrama de Bode. Aplicando esta función a los datos adquiridos en el sistema de alimentación de agua hacia calderas, se obtuvo el diagrama de Bode que se muestra en la figura 64.

Se observa que el diagrama de Bode obtenido se asemeja bastante a la respuesta en frecuencia de un sistema de segundo grado. Las irregularidades presentes en el diagrama de ganancia se deben al ruido de alta frecuencia que se observa en los datos. Así mismo, a bajas frecuencias se observa la influencia de dos retardos de primer orden superpuestos, es decir, un retardo de segundo orden. En el diagrama de fase se observa una tendencia hacia el infinito, la que es característica de los procesos con retardo de tiempo.

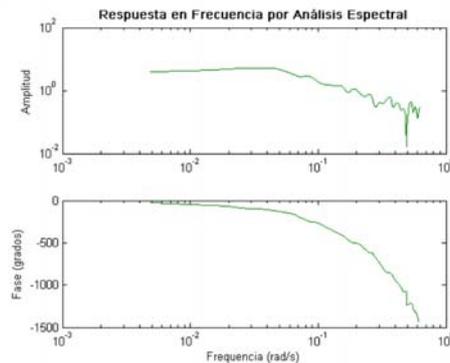


Figura 64: Diagrama de Bode del sistema estudiado obtenido por análisis espectral

4.1.6 Selección de la Estructura del Modelo

Las aplicaciones de control requieren modelos que permiten relacionar la entrada aplicada con la salida. Sin embargo, los datos experimentales no solo muestran esta relación, sino también la influencia de las perturbaciones en la salida.

Los métodos de estimación por mínimos cuadrados y por probabilidad máxima, permiten identificar estructuras Auto-regresiva Controlada (ARX) y Auto/Regresiva de Media Móvil Controlada (ARMAX). Ambas consideran la influencia de las perturbaciones en la salida.

De particular interés es la estructura ARMAX, ya que permite obtener una función de transferencia de la parte determinística (relación entrada-salida). Esto provee al controlador una mejor estimación de las perturbaciones, que permiten realizar mejores predicciones de la respuesta del sistema. Por estas razones, la estructura candidatas son ARX y ARMAX.

La siguiente selección importante, se refiere al orden de los parámetros de cada estructura. En base a la identificación no paramétrica realizada, como también en base a la identificación no

paramétrica realizada, como también en base al análisis por correlación y al análisis espectral, puede hacerse una aproximación tentativa. En estas pruebas se observó que la respuesta del proceso bajo estudio es similar a la respuesta de un sistema de segundo orden. Sin embargo, por consideraciones prácticas el modelo debe tener un orden más elevado ya que el actuador y el sensor tienen dinámicas o incluidas en los datos. Se probaron entonces modelos de orden 2,3 y 4, a manera de comprobación también se probaron modelos de primer orden. En cuanto al número de “ceros” o de los polinomios $B(q^{-1})$ y $C(q^{-1})$, solo se puede inferir que debe ser igual o menor que el número de polos estimados, para obtener funciones de transferencia propias. Por último, es necesario incluir en el modelo el retardo de tiempo del sistema, el análisis por correlación. En este caso se observa un retardo de $t=35\text{seg}$, que corresponde a $d=7$ muestras.

Cuando se formula un problema de identificación se introduce un criterio para tener una medida hasta qué punto un modelo se ajusta a los datos experimentales. Mediante hipótesis estadísticas se pueden deducir criterios de base probabilística. Con frecuencia los criterios para los sistemas discretos se expresan de forma.

$$J(\theta) = \sum_{t=1}^n g(\varepsilon(t))$$

Donde

$J(\theta)$ Función de costo de estimación

$g(\varepsilon(t))$ Función de ponderación del error

ε Error de entrada, error de salida o un error generalizado

Para este estudio vamos a utilizar el criterio de mínimo cuadrados y una variante de este, la estimación de probabilidad máxima. El criterio de mínimo cuadrados es bueno para estimar parámetros de sistemas que se pueden modelar mediante estructura ARX, en donde se puede separar claramente el ruido blanco del modelo determinístico, obteniendo regresores lineales. En cambio, cuando se requiere identificar un modelo ARMAX, cuyo regresor es pseudo-lineal, es necesario utilizar la estimación de máxima probabilidad, debido a que el método de mínimo cuadrados produce una desviación indeseable de los parámetros estimados.

Los algoritmos de identificación que utilizan estos criterios se encuentran implementados en Matlab. Las funciones a utilizar son *arx* y *armax*, en las que se ingresan los datos de entrada – salidas y los órdenes tentativos del modelo. Las funciones devuelven el modelo paramétrico encontrado.

La función *arx*, realiza la estimación de mínimo cuadrados, usando factorización QR para ecuaciones lineales sobre determinadas. La función *armax* minimiza un criterio de máxima probabilidad utilizando un algoritmo de búsqueda iterativa. Adicionalmente, el predictor se somete a una prueba de estabilidad, para asegurar que solo modelos correspondientes a predictores estables sean estimados.

Se procedió entonces a realizar la estimación de varios modelos con estructuras ARMAX y ARX utilizando los criterios de selección expuestos y los algoritmos implementados en Matlab. Los

órdenes de los polinomios y el retardo de tiempo de los modelos candidatos se muestran en la tabla 14.

<i>Estructura</i>	<i>na</i>	<i>nb</i>	<i>nc</i>	<i>d</i>
ARX	2	2	0	7
ARX	3	3	0	7
ARMAX	1	1	1	7
ARMAX	1	2	2	7
ARMAX	2	2	2	7
ARMAX	3	3	3	7
ARMAX	4	4	4	7

Tabla 14: Ordenes de los polinomios A(q), B(q) y C(q) y retardo de tiempo que se utilizan en el procesos de identificación paramétrica utilizando estructuras ARX y ARMAX

Los modelos identificados tienen las siguientes estructuras:

$$ARX227: y(t) + a_1y(t - 1) + a_2y(t - 2) = b_0u(t - 1 - 7) + b_1u(t - 2 - 7) + e(t)$$

$$ARX337: y(t) + a_1y(t - 1) + a_2y(t - 2) + a_3y(t - 2) = b_0u(t - 1 - 7) + b_1u(t - 2 - 7) + b_2u(t - 3 - 7) + e(t)$$

$$ARMAX1117: y(t) + a_1y(t - 1) = b_1u(t - 1 - 7) + e(t) + c_1e(t - 1)$$

$$ARMAX1227: y(t) + a_1y(t - 1) = b_1u(t - 1 - 7) + b_2u(t - 2 - 7) + e(t) + c_1e(t - 1) + c_2e(t - 2)$$

$$\text{ARMAX2227: } y(t) + a_1y(t - 1) + a_2y(t - 2) = b_1u(t - 1 - 7) + b_2u(t - 2 - 7) + e(t) + c_1e(t - 1) + c_2e(t - 2)$$

$$\text{ARMAX3337: } y(t) + a_1y(t - 1) + a_2y(t - 2) + a_3y(t - 3) = b_1u(t - 1 - 7) + b_2u(t - 2 - 7) + b_3u(t - 3 - 7) + e(t) + c_1e(t - 1) + c_2e(t - 2) + c_3e(t - 3)$$

$$\text{ARMAX4447: } y(t) + a_1y(t - 1) + a_2y(t - 2) + a_3y(t - 3) + a_4y(t - 4) = b_1u(t - 1 - 7) + b_2u(t - 2 - 7) + b_3u(t - 3 - 7) + b_4u(t - 4 - 7) + e(t) + c_1e(t - 1) + c_2e(t - 2) + c_3e(t - 3) + c_4e(t - 4)$$

Los parámetros estimados de los polinomios $A(q)$, $B(q)$ y $C(q)$ se muestran en las tablas 15,16 y 17.

Estructura	a_1	a_2	a_3	a_4
ARX227	-1.020	0.1291	0	0
ARX337	-0.645	-0.3022	0.1013	0
ARMAX1117	-0.884	0	0	0
ARMAX1227	-0.881	0	0	0
ARMAX2227	-1.197	0.2899	0	0
ARMAX3337	-1.09	0.122	0.06548	0
ARMAX4447	-1.811	1.915	-1.251	0.2637

Tabla 15: Parámetros estimados del polinomio $A(q)$ para los modelos ARX y ARMAX

Estructura	b_0	b_1	b_2	b_3
ARX227	<i>0.1060</i>	<i>0.8875</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
ARX337	<i>0.1174</i>	<i>0.8086</i>	<i>0.4022</i>	<i>0</i>
ARMAX1117	<i>1.078</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
ARMAX1227	<i>0.06305</i>	<i>1.063</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
ARMAX2227	<i>0.1084</i>	<i>0.7205</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
ARMAX3337	<i>0.1152</i>	<i>0.7517</i>	<i>0.01058</i>	<i>0</i>
ARMAX4447	<i>0.1176</i>	<i>0.6566</i>	<i>-0.3784</i>	<i>0.6577</i>

Tabla 16: Parámetros estimados del polinomio $B(q)$ para los modelos ARX y ARMAX

Estructura	c_1	c_2	c_3	c_4
ARMAX1117	<i>0.09445</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
ARMAX1227	<i>-0.2606</i>	<i>-0.00208</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
ARMAX2227	<i>-0.6890</i>	<i>0.2381</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
ARMAX3337	<i>-0.6341</i>	<i>-0.01793</i>	<i>0.1202</i>	<i>0</i>
ARMAX4447	<i>-1.394</i>	<i>1.575</i>	<i>-0.7952</i>	<i>0.1485</i>

Tabla 17: Parámetros estimados del polinomio $C(q)$ para los modelos ARMAX

4.1.7 Validación y Selección del Modelo

La validación de los modelos calculados es uno de los pasos esenciales en un proceso de identificación. Luego que la fase de estimación de parámetros ha sido realizada, se debe validar el modelo obtenido.

Validación significa evaluar el grado de confianza de nuestro modelo. Esto puede ser muy impreciso y en realidad, no existe una medida de validación definitiva. La aceptación del modelo no solo depende del modelo en sí, sino del propósito de su uso.

En lugar de una prueba simple, validar el modelo involucrado analizar su respuesta bajo diferentes puntos de vista. Es este grupo de pruebas, y la coherencia de los resultados obtenidos, lo que nos permite aceptar el modelo. Hay varias formas de probar un modelo:

- *Prueba de error final de predicción y análisis de polos y ceros*
- *Validación cruzada*
- *Índices de performance*
- *Verificación cruzada con otros modelos*
- *Medidas estadísticas*

En primer lugar debemos verificar la correcta estimación del orden del modelo. El método más simple es mirar la función de costo $V(\hat{\theta})$, directamente vinculada con el orden del modelo. Cuando se incrementa el orden, la función de costo decrece hasta que se mantiene constante o cambia lentamente. Otros métodos se basan en pruebas estadísticas de la función de costo o en la evaluación de diferentes criterios que tiene en cuenta la complejidad del modelo.

Una de estas pruebas, es el criterio propuesto por Akaike llamado “final prediction error criterion (FPE)”. En este criterio no solo se toma en cuenta la función de costos, sino que se penaliza la complejidad del modelo:

$$FPE(p) = \frac{N + p}{N - p} J(\theta)$$

Donde:

$J(\theta)$ Función de costos de la estimación de parámetros

p Número de parámetros del modelo

N Número de muestras

Si bien es cierto que este criterio tiene a subestimar el modelo del sistema, permite determinar el orden del mismo como el valor mínimo del criterio y no es necesario evaluarlo en función de unos niveles de confianza.

Otro método utilizado para verificar el orden de los parámetros del modelo estimado, es la evaluación de sus polos y ceros. Si el orden del modelo es S y es superior al orden del proceso real N , se originan pares de polos-ceros muy próximos que pueden ser cancelados. En este caso se dice que el modelo está sobredimensionado y se debe reducir el orden.

Para los modelos estimados, la aplicación del criterio FPE dio los resultados que se muestran en la tabla 18.

Estructura	$[n \ a \ b \ n \ c \ d]$	FPE
ARX	$[2 \ 2 \ 0 \ 7]$	1.7294
ARX	$[3 \ 3 \ 0 \ 7]$	1.4178
ARMAX	$[1 \ 1 \ 1 \ 7]$	1.8126
ARMAX	$[1 \ 2 \ 2 \ 7]$	1.8219
ARMAX	$[2 \ 2 \ 2 \ 7]$	1.3039
ARMAX	$[3 \ 3 \ 3 \ 7]$	1.3077
ARMAX	$[4 \ 4 \ 4 \ 7]$	1.2888

Tabla 18: Valor del error final de predicción (FPE) de los modelos estimados

Se observa que para los modelos ARMAX, el FPE se estabiliza alrededor de 1.30. Con este resultado se puede eliminar los modelos ARMAX de primer orden. Aun no se pueden sacar conclusiones acerca de los modelos ARX, puesto que no se tiene suficiente base comparativa.

La localización de los polos y ceros de los modelos restantes, se muestran en las siguientes figuras. Por ahora solo interesa la evaluación de las cancelaciones polo/cero y dado que todos los modelos son estables, se muestran solo los elementos que se encuentran dentro del círculo unitario:

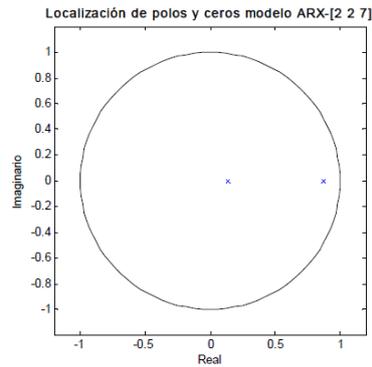


Figura 65: Localización de polos y ceros para el modelo estimado con estructura ARX y orden $n_a=2$, $n_b=2$, $d=7$

Solo se muestran los elementos en el interior del círculo unitario.

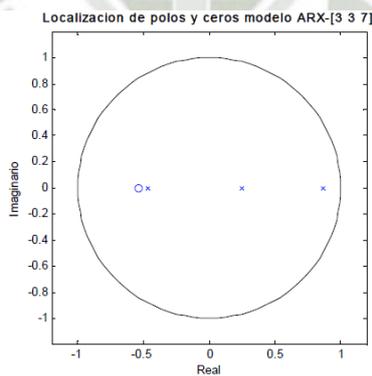


Figura 66: Localización de polos y ceros para el modelo estimado con estructura ARX y ordenes $n_a=3$, $n_b=3$, $d=7$

Solo se muestran los elementos en el interior del círculo unitario.

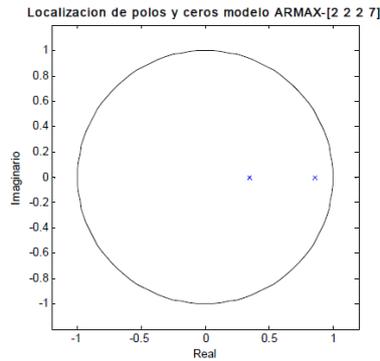


Figura 67: Localización de polos y ceros para el modelo estimado con estructura ARMAX y ordenes $n_a=2$, $n_b=2$, $n_c=2$, $d=7$

Solo se muestran los elementos en el interior del circuito unitario

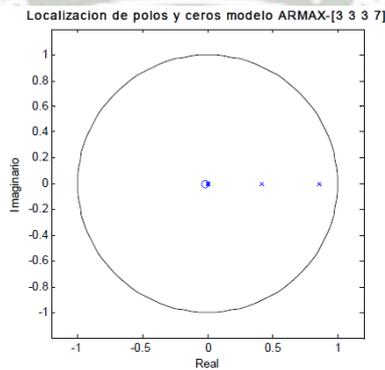


Figura 68: Localización de polos y ceros para el modelo estimado con estructura ARMAX y ordenes $n_a=3$, $n_b=3$, $n_c=3$, $d=7$.

Solo se muestran los elementos en el interior del circuito unitario.

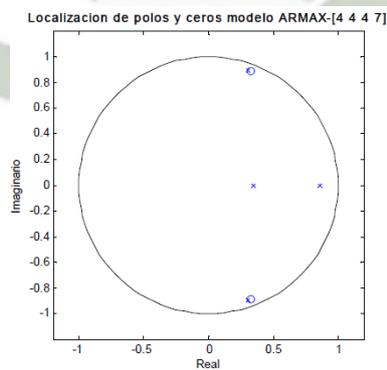


Figura 69: Localización de polos y ceros para el modelo estimado con estructura ARMAX y ordenes $n_a=4$, $n_b=4$, $n_c=4$, $d=7$.

De este análisis se observa que los modelos ARMAX de tercer y cuarto orden presentan cancelación de polos y ceros, dejando en cada caso 2 polos sin cancelar. Esto muestra que el orden preponderante del sistema es 2, por lo que no se consideraran estos modelos en adelante.

Una vez verificado el correcto orden de los modelos, se procede a realizar la validación cruzada. Este es un paso en la validación del modelo que consiste en comparar gráficamente en el dominio del tiempo la respuesta del modelo y la respuesta del sistema real. Para esto, se utilizan los datos experimentales de validación. De este modelo se puede estudiar la independencia de los resultados del conjunto de los experimentos.

La comparación entre los datos observados y la salida del modelo se realiza generalmente mirando las anomalías del modelo no detectadas previamente. La validación cruzada se considera la mejor manera de validar el modelo y la única prueba verdadera para su aplicabilidad general.

Los resultados de la validación cruzada para los modelos restantes se muestran en la figura 70-72.

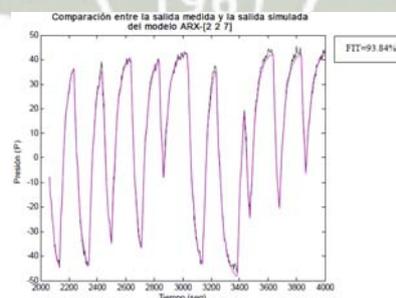


Figura 70: Validación cruzada del modelo ARX-[2 2 7] utilizando datos adquiridos para validación

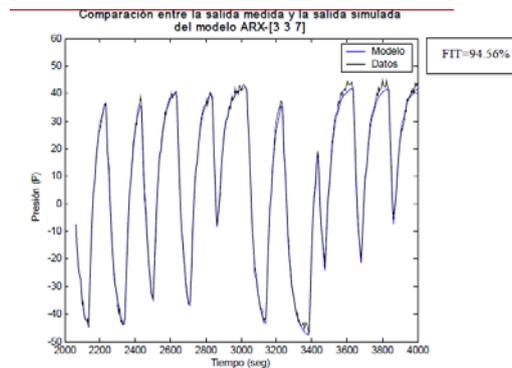


Figura 71: Validación cruzada del modelo ARX-[3 3 7] utilizado datos adquiridos para validación

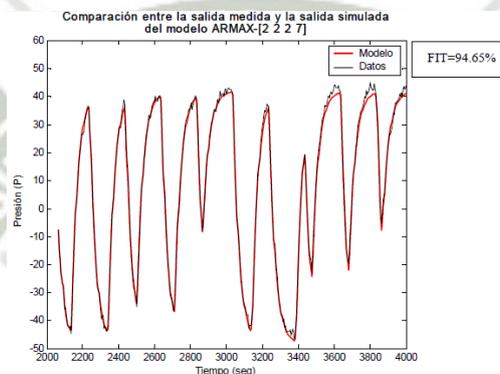


Figura 72: Validación cruzada del modelo ARMAX-[2 2 2 7] utilizado datos adquiridos para validación

A partir de estos resultados, se aprecia que las salidas de los tres modelos se aproximan bastante bien a los datos de validación adquiridos de la caldera. En este caso se puede cuantificar la aproximación del modelo utilizando un “índice de performance”. Este es una medida cuantitativa de la calidad del modelo que puede obtenerse a partir de la norma de errores residuales. Una fórmula que utiliza Matlab como índice de performance (FIT) es la siguiente:

$$FIT = \left(1 - \frac{\|y - \hat{y}\|}{\|y - \bar{y}\|}\right) \times 100\%$$

Donde:

y salida medida

\hat{y} salida estimada

Este índice corresponde a las variaciones de la salida real que son reproducidas por el modelo.

Un número más cercado a 100% significa un mejor modelo. Para los modelos estimados se obtuvieron los índices de performance que se muestran en la tabla 19.

Estructura	[na nb nc d]	FIT
ARX	[2 2 0 7]	93.84%
ARX	[3 3 0 7]	94.56%
ARMAX	[2 2 2 7]	94.65%

Tabla 19: Índice de performance de los modelos ARX y ARMAX restantes

Se observa que si bien todos los modelos dan una buena estimación, el modelo ARMAX es el que tiene la mejor performance.

Para comprobar aún más las propiedades de los modelos estimados se realiza una “verificación cruzada de modelos”. Hasta ahora, varios tipos de modelos han sido identificados: funciones de transferencia, gráficos de respuesta transitoria (impulso) y de respuesta en frecuencia (diagrama de bode).

Si el modelo paramétrico estimado es correcto, todos los modelos identificados deben ser coherentes entre sí. Se puede comparar la respuesta transitoria obtenida utilizando análisis por correlación con la respuesta que se obtiene del modelo como se muestra en las figuras 73 – 75. También se puede comparar la respuesta en frecuencia obtenida por análisis espectral con la respuesta que se obtiene del modelo como se muestra en las figuras 76 – 78.

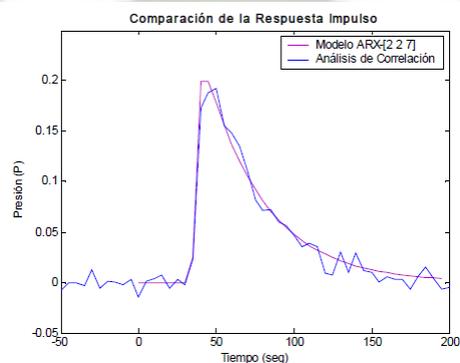


Figura 73: Comparación de la respuesta impulsiva obtenida por correlación con la obtenida utilizando el modelo ARX-[2 2 7]

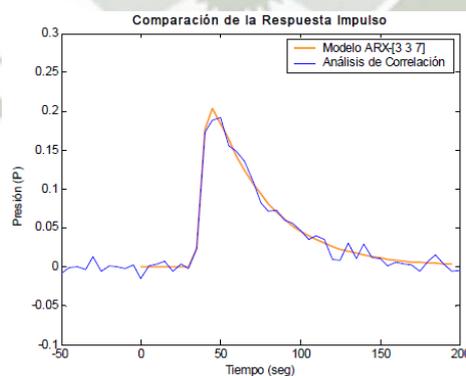


Figura 74: Comparación de la respuesta impulsiva obtenida por correlación con la obtenida utilizando el modelo ARX-[3 3 7]

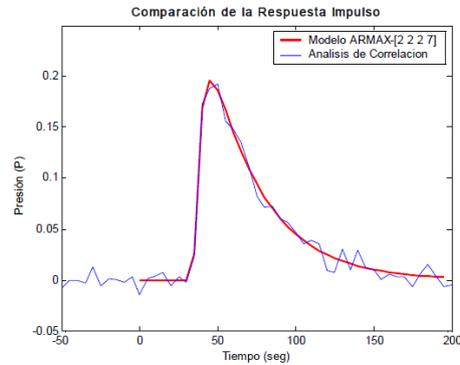


Figura 75: Comparación de la respuesta impulsiva obtenida por correlación con la obtenida utilizando el modelo ARMAX-[2 2 2 7]

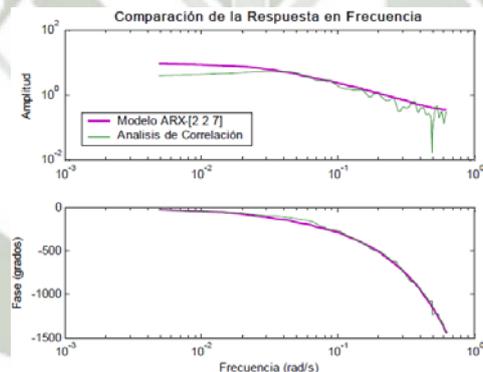


Figura 76: Comparación de la respuesta frecuencial obtenida por análisis espectral con la obtenida utilizando el modelo ARX-[2 2 7]

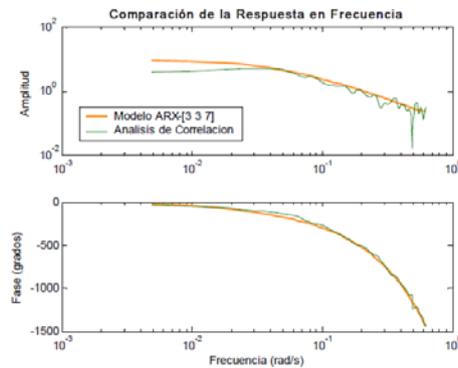


Figura 77: Comparación de la respuesta frecuencial obtenida por análisis espectral con la obtenida utilizando el modelo ARX-[3 3 7]

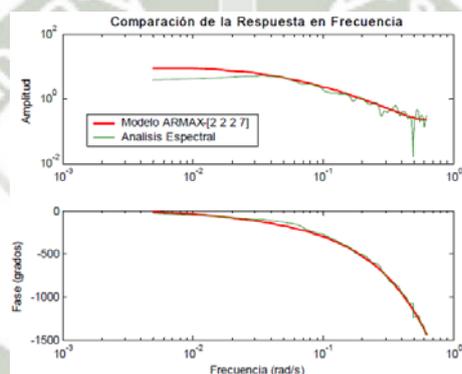


Figura 78: Comparación de la respuesta frecuencial obtenida por análisis espectral con la obtenida utilizando el modelo ARMAX-[2 2 2 7]

Finalmente, se valida el modelo utilizando “medidas estadísticas”. Si un modelo es una representación válida del proceso, los errores o residuos deben ser estadísticamente independientes de la entrada de excitación. Esto quiere decir que la correlación cruzada entre la entrada y los residuos, no debe ser significativamente diferente de cero para k diferente de cero. De la misma manera, la auto correlación de los residuos permite verificar si no hay más

información posible a modelar. Las gráficas de correlación de cada modelo se muestran de las figuras 79 – 81.

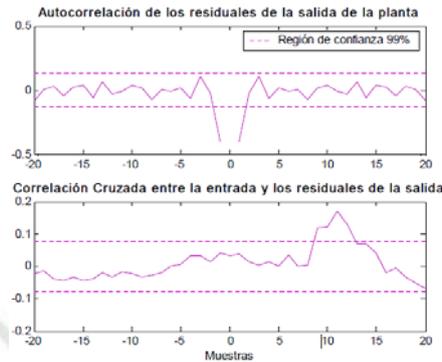


Figura 79: Correlación cruzada entre la entrada de excitación y los residuales de la salida de la planta y auto correlación de los residuales de la salida de la planta para el modelo ARX-[2 2 7]

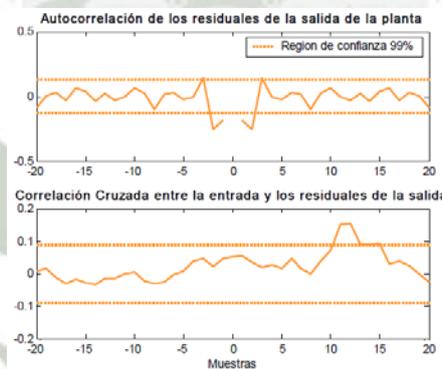


Figura 80: Correlación cruzada entre la entrada de excitación y los residuales de la salida de la planta y auto correlación de los residuales de la salida de la planta para el modelo ARX-[3 3 7]

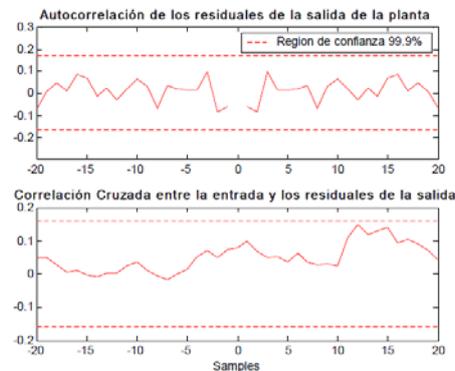


Figura 81: Correlación cruzada entre la entrada de excitación y los residuales de la salida de la planta y auto correlación de los residuales de la salida de la planta para el modelo ARMAX-[2 2 2 7]

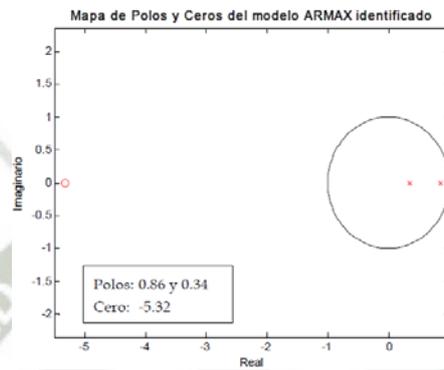
De las figuras presentadas se puede apreciar que la estimación de la respuesta impulso y de la respuesta en frecuencia de los tres modelos queda validada con los modelos no paramétricos obtenidos por correlación y por análisis espectral. Asimismo, con las gráficas de la respuesta transitoria se confirma el valor del retardo de tiempo de 35 seg.

Sin embargo, se observa que los errores residuales de ambos modelos ARX, se encuentran correlacionados alrededor de un desplazamiento de 12 muestras. Esto es un indicador que es recomendable utilizar una estructura que emplee un moldeo de ruido “coloreado” para modelar las perturbaciones, en lugar de un modelo de ruido coloreado utilizando un filtro de media móvil.

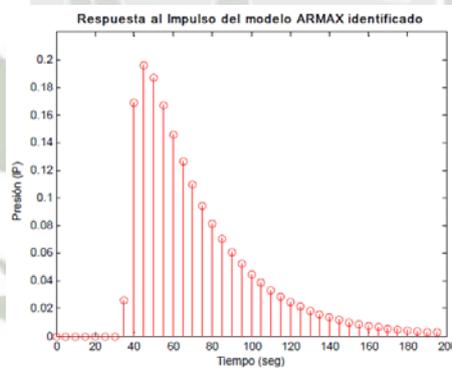
Por esta razón, cuando se aplica la prueba de auto correlación de errores residuales al modelo ARMAX-[2 2 2 7], la gráfica indica que no están correlacionados en un intervalo de confianza de 99.9%. También se observa que los errores residuales tampoco se encuentran correlacionados con la entrada a la planta.

Con esto se finaliza el proceso de validación y selección de modelos, y por las razones expuestas se elige el modelo ARMAX-[2 2 2 7], cuyas principales características presentan a en las siguientes figuras.

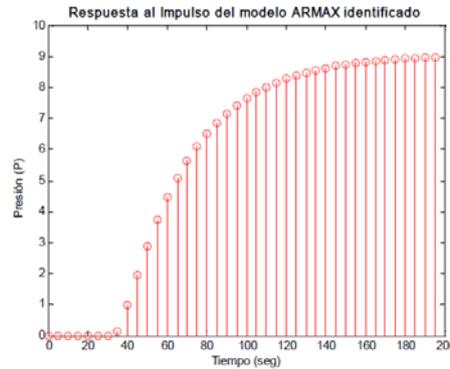
- *Mapa de polos y Ceros:*



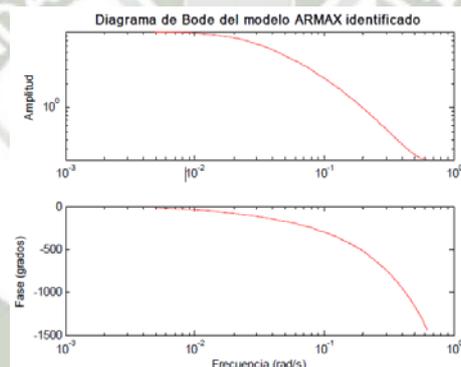
- *Respuesta Impulsiva:*



- *Respuesta al Escalón Unitario:*



- *Diagrama de Bode:*



Tenemos entonces un modelo estable amortiguado que posee una elevada ganancia de estado estacionario al tener su único cero en un posición bastante alejada del círculo unitario. La respuesta escalón unitario confirma esta conclusión. Finalmente, tenemos que el proceso presenta un retardo de tiempo de 35 seg.

El modelo ARMAX hallado tiene la siguiente estructura:

$$\text{ARMAX2227: } y(t) + a_1y(t - 1) + a_2y(t - 2) = b_1u(t - 1 - 7) + b_2u(t - 2 - 7) + e(t) + c_1e(t - 1) + c_2e(t - 2)$$

Los modelos ARX337 y ARX227 que no fueron elegidos pero que presentaron un desempeño aceptable y que pueden utilizarse en algunas aplicaciones básicas, tienen las siguientes estructuras:

$$\text{ARX227: } y(t) + a_1y(t - 1) + a_2y(t - 2) = b_0u(t - 1 - 7) + b_1u(t - 2 - 7) + e(t)$$

$$\text{ARX337: } y(t) + a_1y(t - 1) + a_2y(t - 2) + a_3y(t - 3) = b_0u(t - 1 - 7) + b_1u(t - 2 - 7) + b_2u(t - 3 - 7) + e(t)$$

Los parámetros estimados para los tres modelos se muestran en la tabla 20:

Estructura	a₁	a₂	a₃	b₀	b₁	b₂	c₁	c₂
ARMAX2227	-1.197	0.2899	0	0.1084	0.7205	0	-0.689	0.2381
ARX227	-1.02	0.1291	0	0.106	0.8875	0	0	0
ARX337	-0.645	-0.3022	0.1013	0.1174	0.8086	0.4022	0	0

Tabla 20: Parámetros estimados del polinomio para los modelos ARX y ARMAX

Como se ha visto, en el modelo ARMAX2227, la transferencia dinámica hacia la salida proviene de dos fuentes: la señal de entrada (modelo determinístico) y las perturbaciones que estadísticamente pueden modelarse como un ruido blanco filtrado (modelo estocástico). A partir de este modelo, se pueden obtener las respectivas funciones de transferencia en tiempo continuo utilizando el método de zoh, como se muestra:

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{-0.1273s + 0.05703}{s^2 + 0.2419s + 0.006299} e^{-35s}$$

$$\frac{Y(s)}{E(s)} = \frac{s^2 + 0.3286s + 0.02815}{s^2 + 0.2419s + 0.006299}$$

Para verificar la validez de la función de transferencia determinística, se aplicó un escalón unitario tanto al modelo en tiempo discreto como al de tiempo continuo. El resultado se muestra en la siguiente figura.

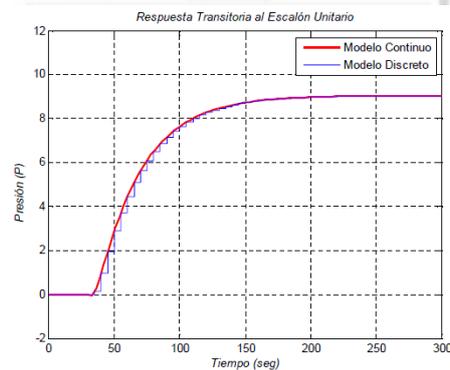


Figura 82: Comparación de la respuesta a un escalón unitario del modelo identificado en tiempo discreto y la respuesta del modelo aproximado en tiempo continuo.

Se observa que el modelo en tiempo continuo sigue apropiadamente la respuesta del modelo identificado.

4.2 Desarrollo de Control PID en Step 7 - SIEMENS

En este punto les mostrare la lógica utilizada para la programación y explicare paso a paso cada bloque utilizado en este proyecto de tesis.

- Abrimos el software STEP7 y seleccionamos nuestro proyecto, Archivo → Abrir → Proyecto → Fernandito (nombre del proyecto). Al abrir el proyecto podemos realizar modificaciones.

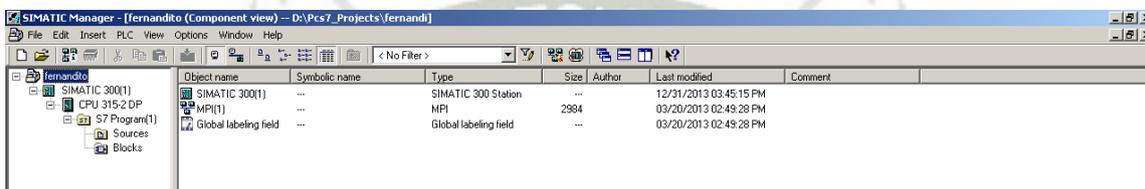


Figura 83: Abrimos el Proyecto Step7

- Al seleccionar en el árbol del proyecto el PLC utilizado, nos muestra la opción del Hardware y CPU.

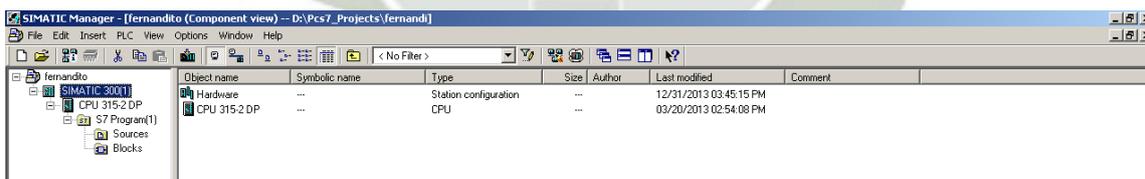


Figura 84: Hardware y CPU del Proyecto Step7

- Abrimos el Hardware, donde podemos escoger todos los módulos que utilizaremos para este proyecto, en el hardware escogemos desde el rack, CPU, entradas digitales. Salidas digitales, entradas analógicas y salidas analógicas. En la figura siguiente se muestra la

estructura de nuestros PLC utilizado para el proyecto y en la parte inferior se muestra más detallada cada componente escogido con su número de parte y dirección determinada, estos valores pueden ser modificados, en la posición uno del rack va la fuente utilizada para alimentar el PLC pero es opcional su elección ya que no afecta en la programación y en la posición tres se escoge un bloque de comunicación, que para nuestro caso no se utilizó. Una vez seleccionado todos los bloques se guarda y compila.

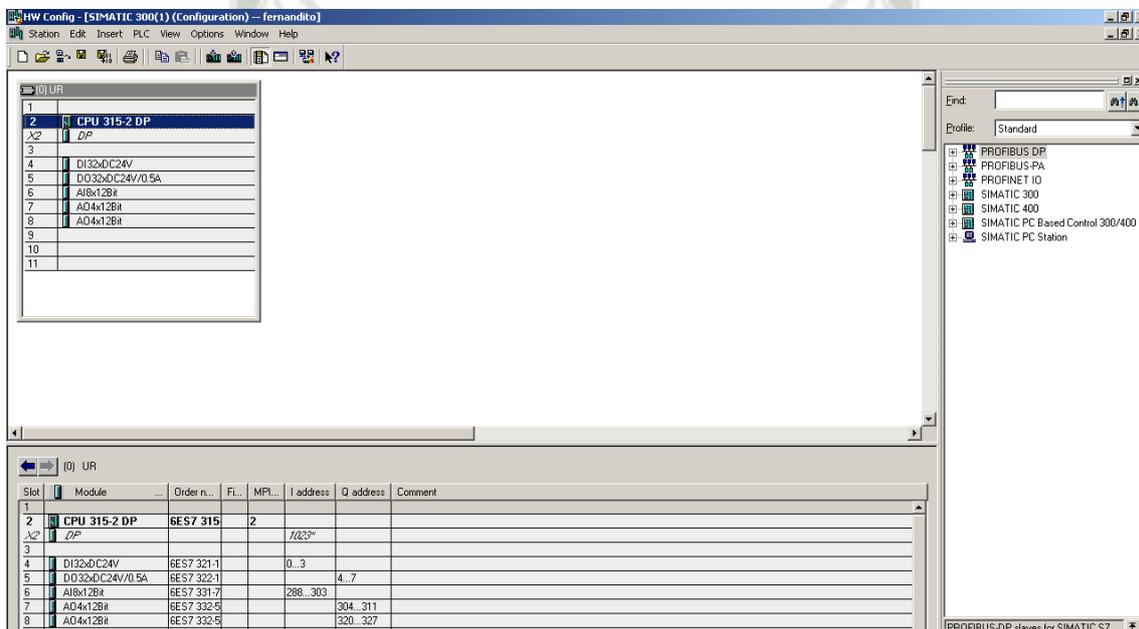
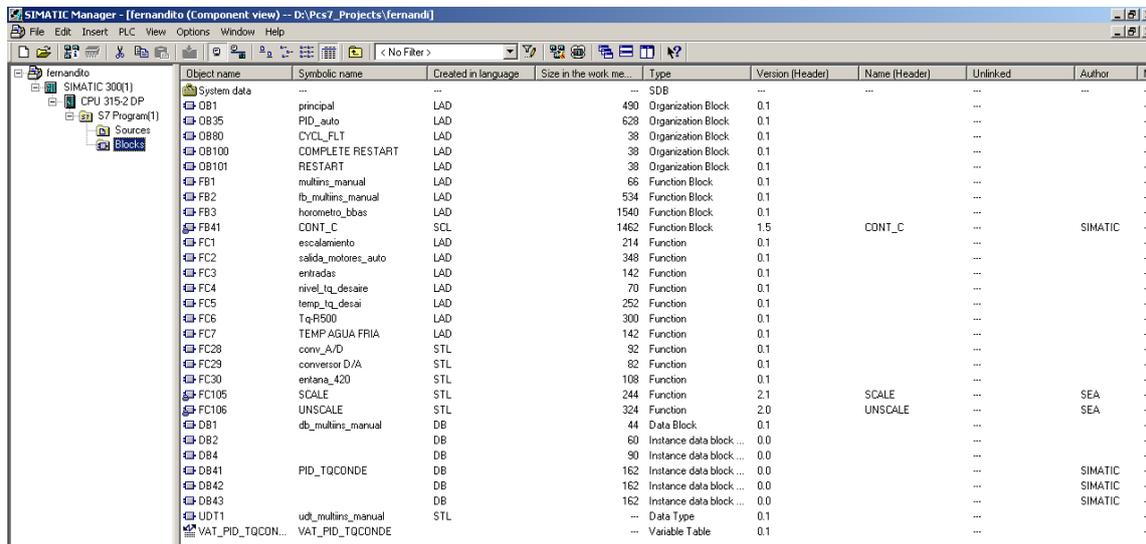


Figura 85 : Hardware del Proyecto Step7

- *Regresamos a la ventana del proyecto donde escogemos el icono de bloques, acá podremos observar todos los bloques programados que utilice para realizar este proyecto, acá podremos encontrar OB, FB, FC, DB, UDT y VAT, al costado de cada bloque se puede observar el nombre con que se creó e identificada cada uno de estos*

bloques con la finalidad de mantener un orden al momento de programar, estos bloques se describirán conforme se vayan mencionando.



Object name	Symbolic name	Created in language	Size in the work me...	Type	Version (Header)	Name (Header)	Unlinked	Author	Nc
System data	---	---	---	SDB	---	---	---	---	---
OB1	principal	LAD	490	Organization Block	0.1	---	---	---	---
OB35	PID_auto	LAD	628	Organization Block	0.1	---	---	---	---
OB80	CYCL_FLT	LAD	38	Organization Block	0.1	---	---	---	---
OB100	COMPLETE RESTART	LAD	38	Organization Block	0.1	---	---	---	---
OB101	RESTART	LAD	38	Organization Block	0.1	---	---	---	---
FB1	multins_manual	LAD	66	Function Block	0.1	---	---	---	---
FB2	fb_multins_manual	LAD	534	Function Block	0.1	---	---	---	---
FB3	horometro_bbas	LAD	1540	Function Block	0.1	---	---	---	---
FB41	CONT_C	SCL	1462	Function Block	1.5	CONT_C	---	SIMATIC	---
FC1	escalamiento	LAD	214	Function	0.1	---	---	---	---
FC2	salka_motores_auto	LAD	348	Function	0.1	---	---	---	---
FC3	entradas	LAD	142	Function	0.1	---	---	---	---
FC4	nivel_li_descaie	LAD	70	Function	0.1	---	---	---	---
FC5	temp_li_descaie	LAD	252	Function	0.1	---	---	---	---
FC6	TeRS00	LAD	300	Function	0.1	---	---	---	---
FC7	TEMP AGUA FRIA	LAD	142	Function	0.1	---	---	---	---
FC28	conv_A/D	STL	92	Function	0.1	---	---	---	---
FC29	convensor D/A	STL	82	Function	0.1	---	---	---	---
FC30	entana_420	STL	108	Function	0.1	---	---	---	---
FC105	SCALE	STL	244	Function	2.1	SCALE	---	SEA	---
FC106	UNSCALE	STL	324	Function	2.0	UNSCALE	---	SEA	---
DB1	db_multins_manual	DB	44	Data Block	0.1	---	---	---	---
DB2	---	DB	60	Instance data block ...	0.0	---	---	---	---
DB4	---	DB	90	Instance data block ...	0.0	---	---	---	---
DB41	PID_TQCONDE	DB	162	Instance data block ...	0.0	---	---	SIMATIC	---
DB42	---	DB	162	Instance data block ...	0.0	---	---	SIMATIC	---
DB43	---	DB	162	Instance data block ...	0.0	---	---	SIMATIC	---
UD11	udt_multins_manual	STL	---	Data Type	0.1	---	---	---	---
VAT_PID_TQCON...	VAT_PID_TQCONDE	---	---	Variable Table	0.1	---	---	---	---

Figura 86: Bloques de Programación del Proyecto

- *Abrimos el Bloque OB1 que es el principal, este bloque es creado automáticamente con la carpeta Bloques, este bloque es el que ejecuta el autómata, en este bloque debe estar el programa de control o debe llamar a todos los bloques utilizados en la programación. Dentro de este bloque se encontrara todos los bloques creados para el control del proyecto alimentación de agua hacia calderas, en este bloque encontraremos FB2, FB3, FC1, FC2, FC3, FC4, FC5, FC6 y FC7, estos bloques serán desarrollados en los puntos siguientes.*

LAD/STL/FBD - [OB1 -- "principal" -- fernandito\SIEMATIC 300(1)\CPU 315-2 DP\... \OB1]

File Edit Insert PLC Debug View Options Window Help

Contents Of: 'Environment\Interface'

OB1 : "Main Program Sweep (Cycle)"

Comment:

Network 1 : Title:
modo manual las bombas

```

    DB2
    *Ib_mult
    iinc_man
    ual1*
    EN      ENO
  
```

Network 2 : Title:
horómetros de las boa

```

    DB4
    *horometro_bbas*
    EN      ENO
  
```

Network	Address	Symbol	Value
"confi_ma1"	M9.1	aal	m1min -M936
"confirma_ma1"	M1.1	aml	m1hora -M938
"confi_ma2"	M9.2	ma2	m2min -M940
"confirma_ma2"	M1.3	am2	m2hora -M942
"confi_ma3"	M9.3	ma3	m3min -M944
"confirma_ma3"	M1.5	am3	m3hora -M946
"confi_ma4"	M9.4	ma4	m4min -M948
"confirma_ma4"	M1.7	am4	m4hora -M950
		prim1	"primerom1" -M5.6
		prim2	"primerom2" -M5.7
		prim3	"primerom3" -M5.4
		prim4	"primerom4" -M5.5
		segm1	"segundom1" -M6.6
		segm2	"segundom2" -M6.7
		segm3	"segundom3" -M7.0
		segm4	"segundom4" -M7.1
		tercm1	"tercerom1" -M7.2
		tercm2	"tercerom2" -M7.3

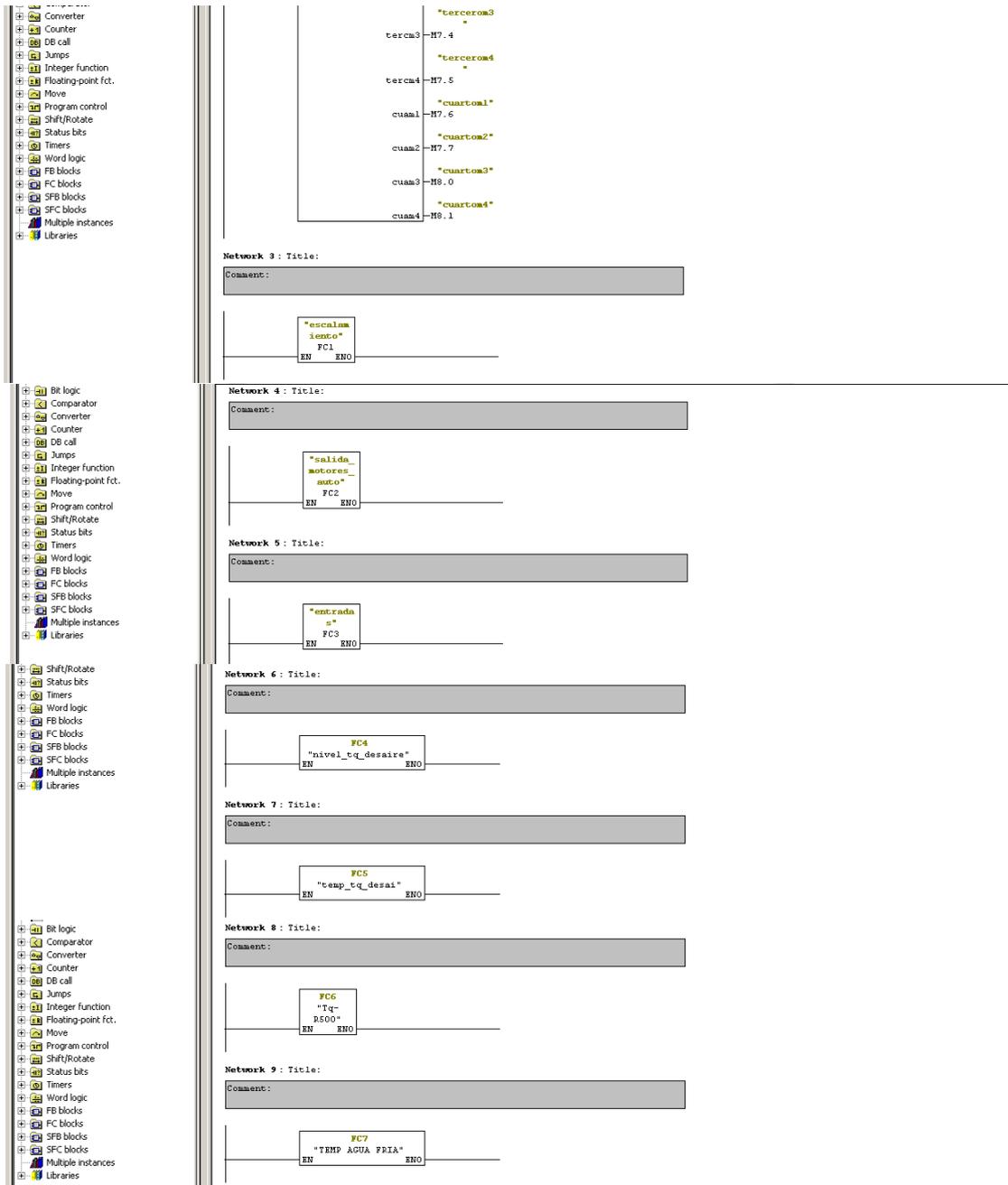


Figura 87: Boque Principal OB1 del Proyecto Step7

- *El proyecto de sistema de alimentación de agua hacia calderas, para esta parte de programación utilizaremos el sistema PID, para lo cual para el valor de entrada de la periferie se va a utilizar un sensor de presión con salida de 4-20mA, que enviara señal a una entrada analógica de nuestro PLC S7-300, para la programación el control lo realizaremos en el bloque OB35 (bloque cíclico), a continuación ampliare un poco más sobre porque se va a utilizar el OB35 y no se programa en un FB o OB1:*

Si se quiere utilizar una gran cantidad de reguladores en una CPU de S7-300 o S7-400, es necesario estimar como mínimo los tiempos de muestreo de los reguladores y los tiempos de ejecución de los bloques de función. Los bloques de función de regulación se llaman en el OB de ejecución por tiempo OBs 3x (normalmente el OB35). De esta forma se dispone de tiempos de muestreo o ciclos de regulación equidistantes (por ejemplo, 5 ms, 20 ms, 100 ms). Dependiendo del número de reguladores, es recomendable ejecutar varios reguladores en una misma llamada a un OB 3x para así conseguir tiempos de muestreo más cortos para cada uno de los reguladores. Cuantos más reguladores se elaboren en el OB3x, mayor son las repercusiones en el OB1 (carga del ciclo). Junto con el número de llamadas, también hay que tener en cuenta los tiempos de ejecución de los FBs llamados.

Ejemplo:

Punto de partida:

- Los tiempos de ejecución de los bloques de función para un bucle de regulación son de 5 ms.
- El tiempo de ejecución del OB1 (sin interrupciones) es de 30 ms.
- En el OB35 se ejecutan 2 bucles de regulación consecutivamente. Por tanto, el tiempo de ejecución del OB35 es 10 ms.
- El tiempo de ciclo de alarma del OB35 es de 20 ms.

El tiempo de ciclo de alarma del OB35 consta de:

- El tiempo de ejecución del OB35: 10 ms
- La pausa del OB35: 10 ms

Por tanto, el OB1 se interrumpe cada 10 ms por el OB35 con una duración de 10 ms, es decir, el ciclo del OB1 se alarga cada 10 ms en otros 10 ms más. El ciclo del OB1 dura entonces 60 ms, tal como se muestra a continuación.

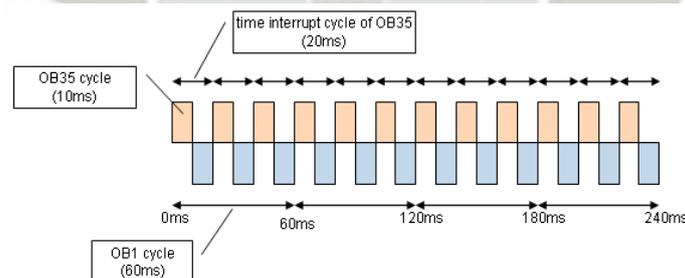


Figura 88: Tiempo de Ciclo del OB1 del Proyecto

- *A continuación el desarrollo de la lógica del bloque OB35, la secuencia de funcionamiento se empieza trabajando con un motor en forma automática que en este caso lo llamamos motor 1, una vez que este motor llegue a alcanzar su SetPoint y el variador este en 60Hz durante un tiempo de 3seg y se mantenga en 60Hz, el variador se configura para que este motor se mantenga en su potencia máxima y se pasa a controlar el motor2 de forma automática y regular para alcanzar la presión del SP y así sucesivamente para los cuatro motores, este bloque es el que posee nuestra programación principal.*



LAD/STL/FBD - [OB35 -- "PID_auto" -- fernandito\SIMATIC 300(1)\CPU 315-2 DP (...)\OB35]

File Edit Insert PLC Debug View Options Window Help

Contents of: 'Environment\Interface'

OB35 : "Cyclic Interrupt"
ojo con un solo rele activo el auto y manual

Network 1: Title:
habilito el star para la secuencia

M3.2 "AUTO" M4.0 "start_a"
(S)

Network 2: Title:
Coment:

M3.0 "manual" M4.0 "start_a"
(P)

Network 3: Title:
señal para activar motor auto bba 1

M4.0 "start_a" M2.3 "ba1>100" M2.5 "motor_a2" M2.6 "motor_a3" M2.7 "motor_a4" M2.4 "manual_1" M2.2 "motor_a1"

Network 4: Title:
señal para activar motor auto bb2

M4.0 "start_a" M3.3 "habil_ma2" M2.4 "manual_1" M3.5 "manual_2" M3.4 "ba2>100" M2.2 "motor_a1" M2.6 "motor_a3" M2.7 "motor_a4" M5.0 "ba2<min" M2.5 "motor_a2"

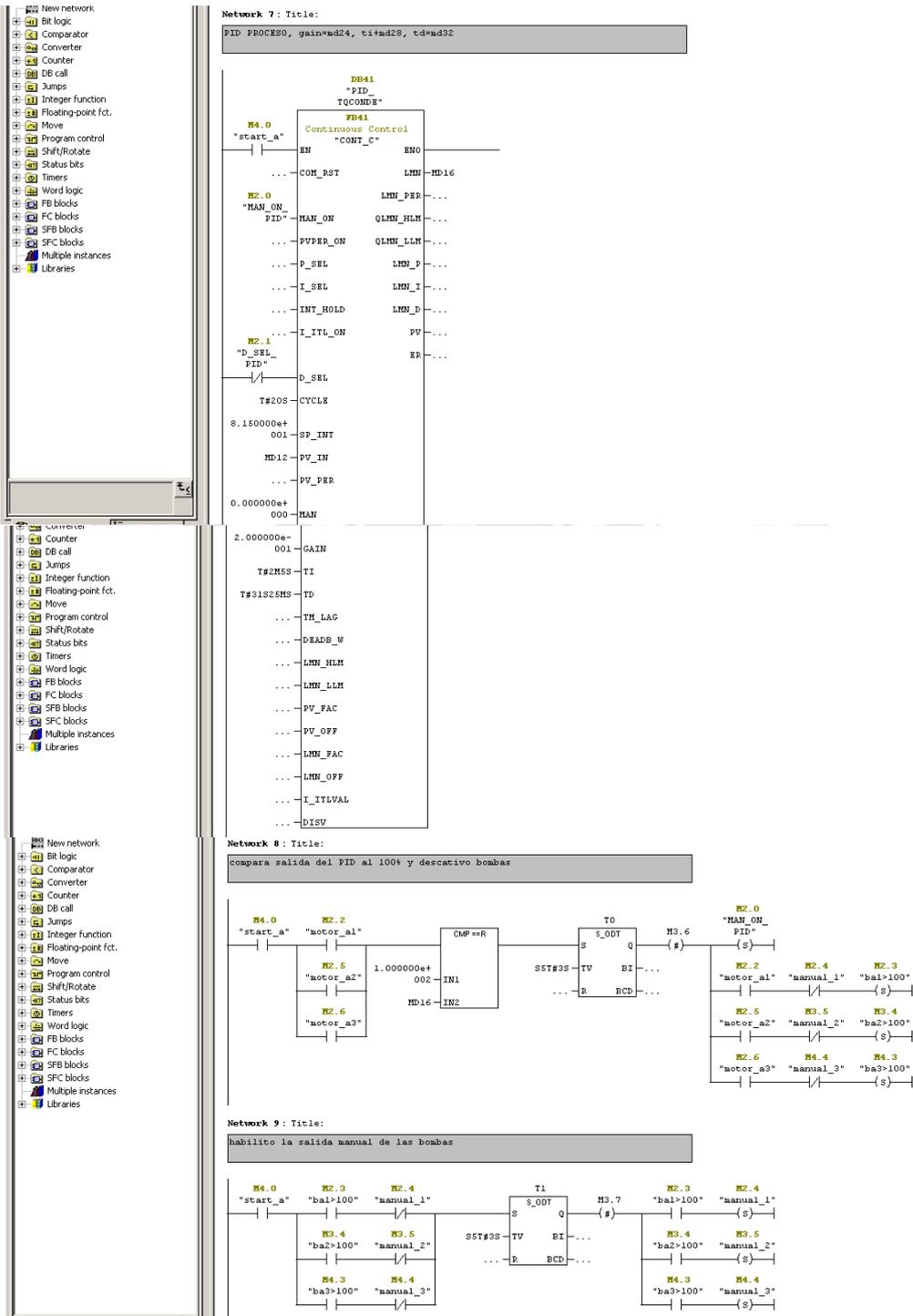
Network 5: Title:
señal para activar motor auto bb3

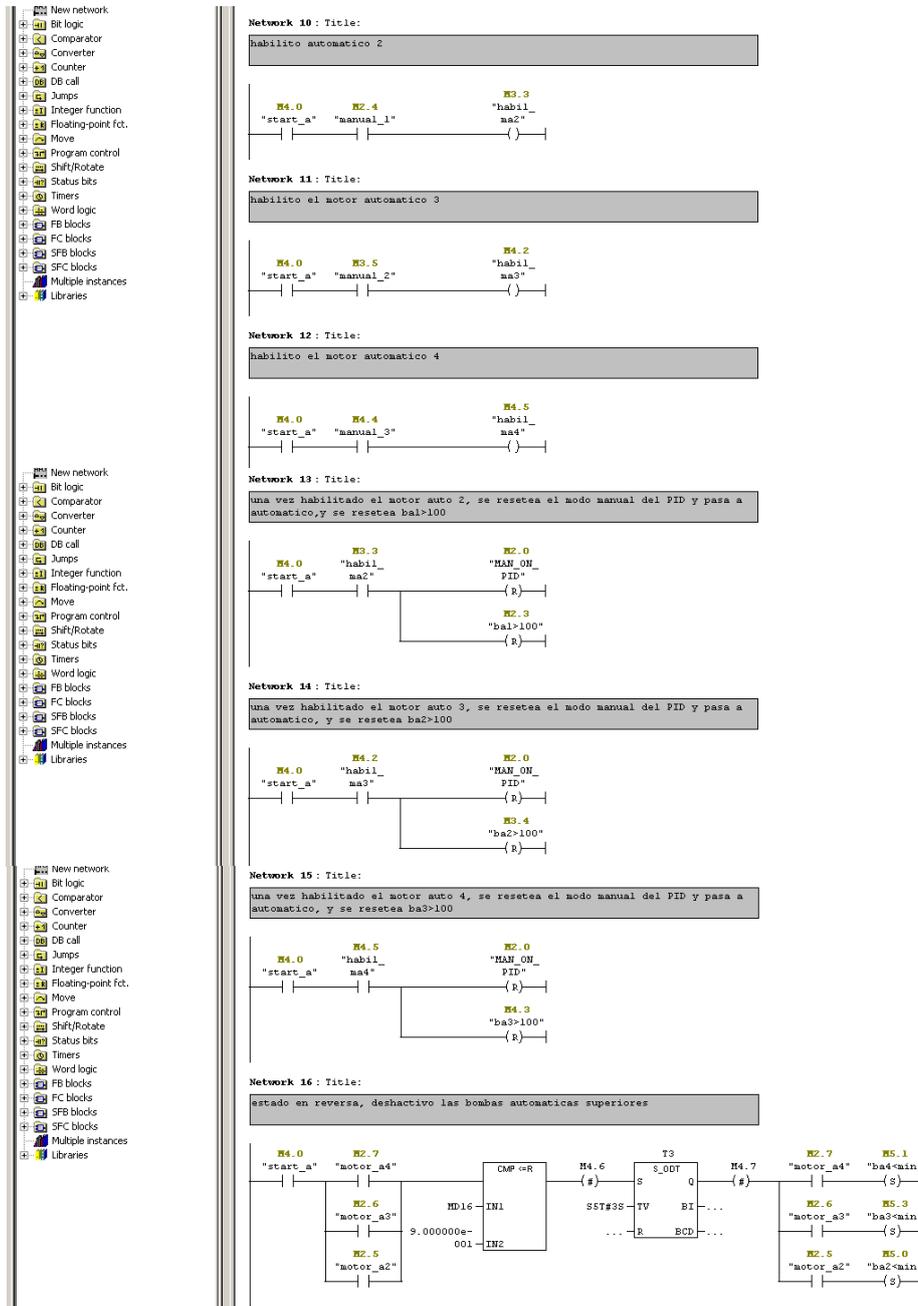
M4.0 "start_a" M4.2 "habil_ma3" M3.5 "manual_2" M4.3 "ba3>100" M4.4 "manual_3" M2.2 "motor_a1" M2.5 "motor_a2" M2.7 "motor_a4" M5.3 "ba3<min" M2.6 "motor_a3"

Network 6: Title:
señal para activar motor auto bb4

M4.0 "start_a" M4.5 "habil_ma4" M4.4 "manual_3" M2.2 "motor_a1" M2.5 "motor_a2" M2.6 "motor_a3" M5.1 "ba4<min" M2.7 "motor_a4"







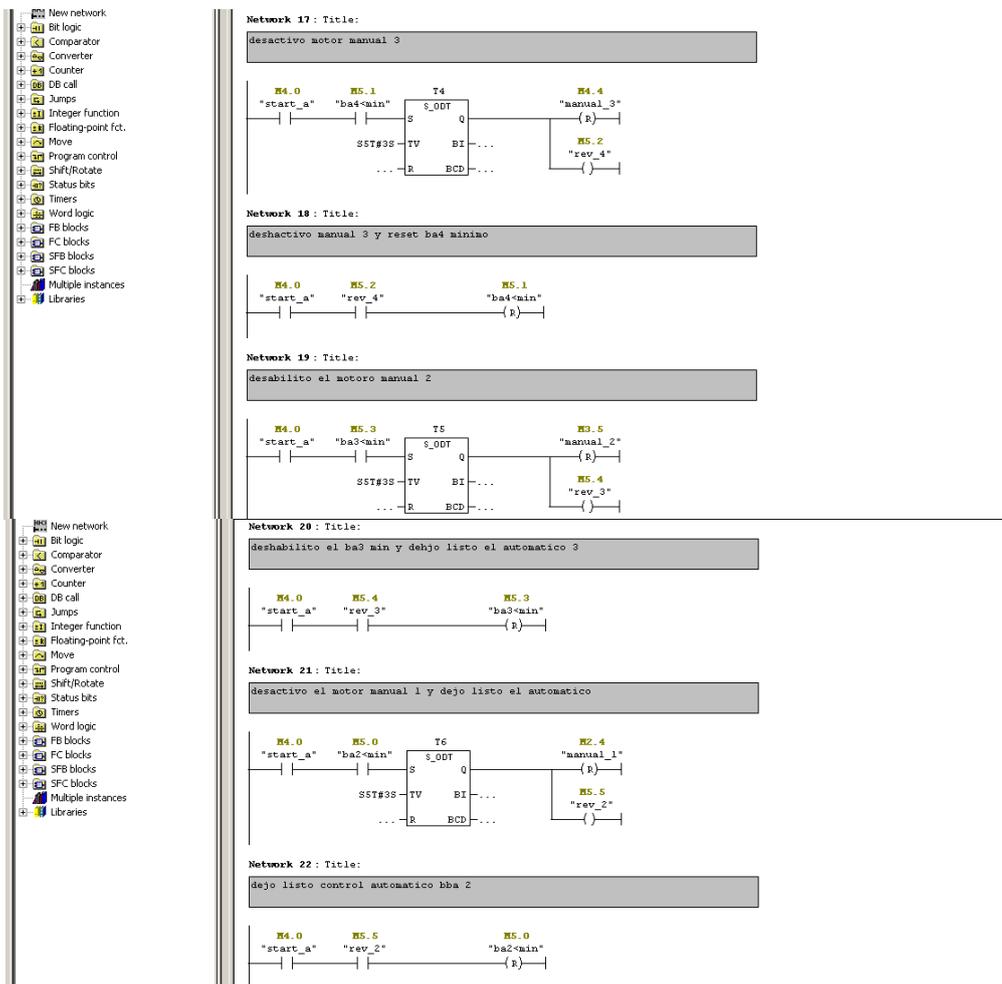
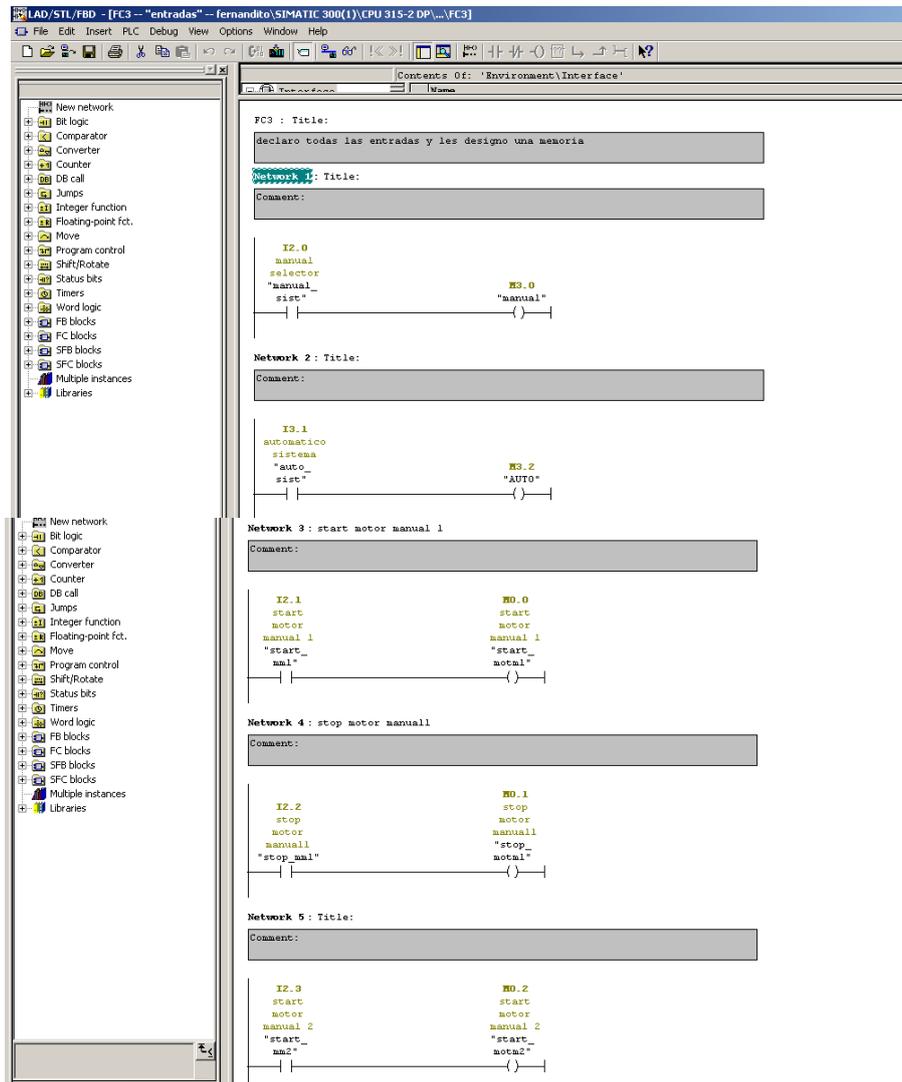


Figura 89: OB35 del Proyecto

- *En el siguiente bloque FC3 se desarrollara las señales de entrada, a las cuales se le asignara una memoria por motivos de orden de programación y para en algún momento se requiera poder utilizar o implementar un Scada, se pueda utilizar estas memorias. Este bloque se le llama "entradas", acá se menciona todas las entradas en los bloques y son renombrados.*



FC3 : Title:
 declaro todas las entradas y les designo una memoria

Network 1 : Title:
Comment:

```

I2.0      M3.0
annual   selector
"manual_   "annual"
sist"    "
|-----|-----|
|-----|-----|
  
```

Network 2 : Title:
Comment:

```

I3.1      M3.2
automatico sistema
"auto_   "AUTO"
sist"    "
|-----|-----|
|-----|-----|
  
```

Network 3 : start motor manual 1
Comment:

```

I2.1      M0.0
start    start
motor    motor
manual 1 manual 1
"start_  "start_
mal"    "actual"
|-----|-----|
|-----|-----|
  
```

Network 4 : stop motor manuall
Comment:

```

I2.2      M0.1
stop     stop
motor    motor
manuall  manuall
"stop_mal" "stop_
          "actual"
|-----|-----|
|-----|-----|
  
```

Network 5 : Title:
Comment:

```

I2.3      M0.2
start    start
motor    motor
manual 2 manual 2
"start_  "start_
mal"    "actual"
|-----|-----|
|-----|-----|
  
```



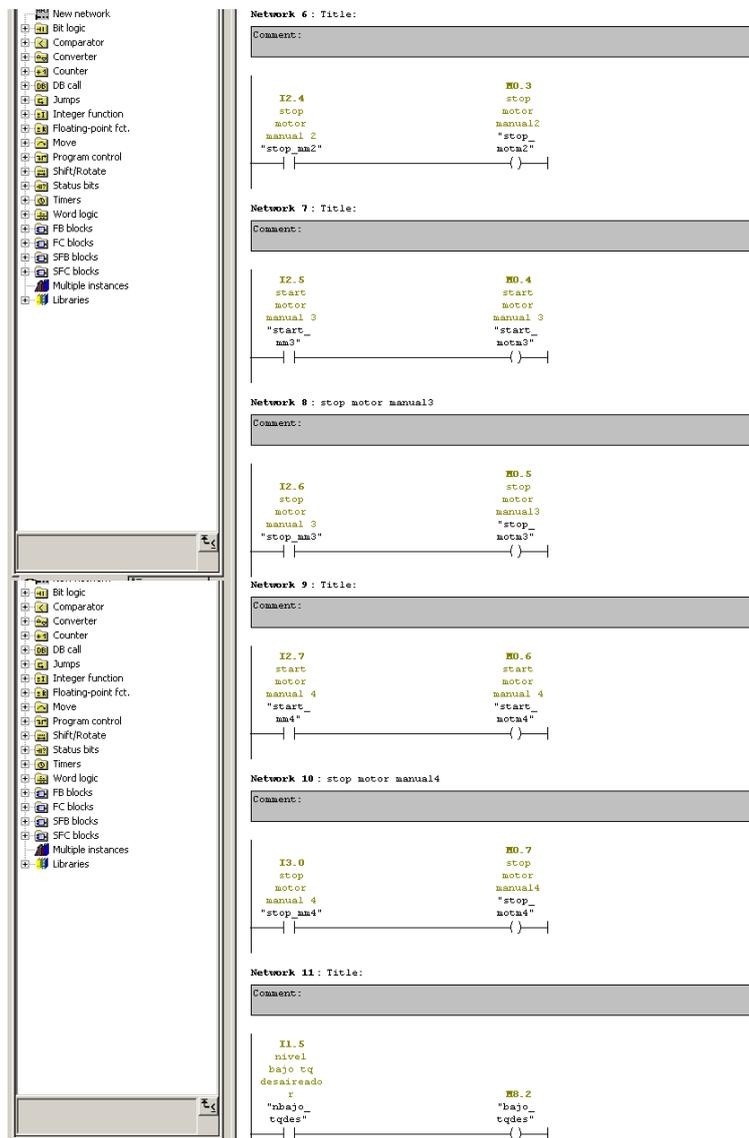
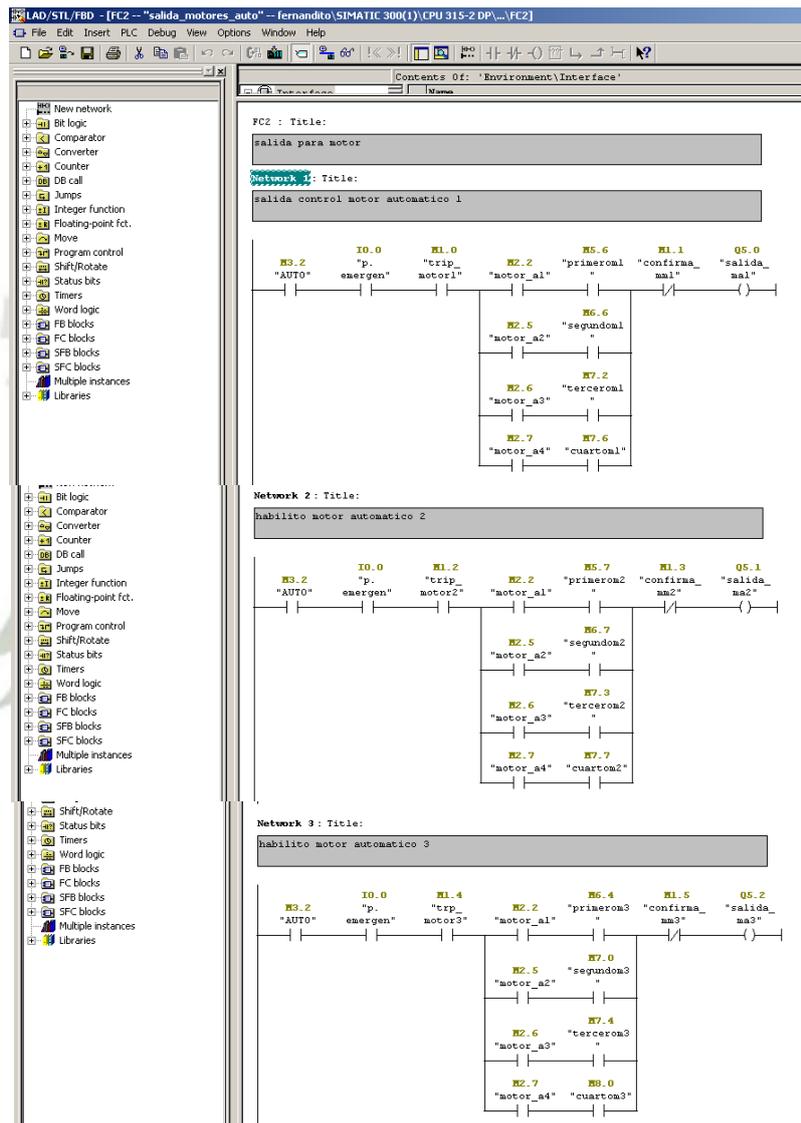


Figura 90: FC3 del Proyecto

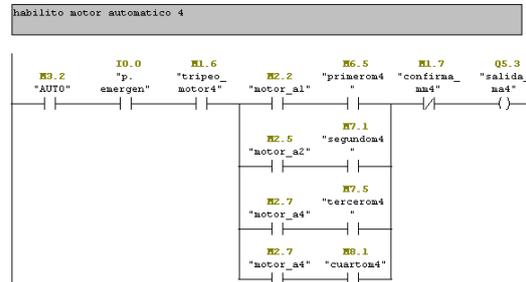
- En el bloque FC2, se denomina “salida_motores_auto”, en este bloque se tiene como señales de ingreso todas las memorias que activan una salida de algún motor, ya sea de forma automática o forma manual y realizamos la lógica para su activación de acuerdo a la necesidad del proceso, se optó por centralizar todas las salidas en un

mismo bloque para mantener el orden de la programación y ser más fácil al momento de la modificación del proyecto.

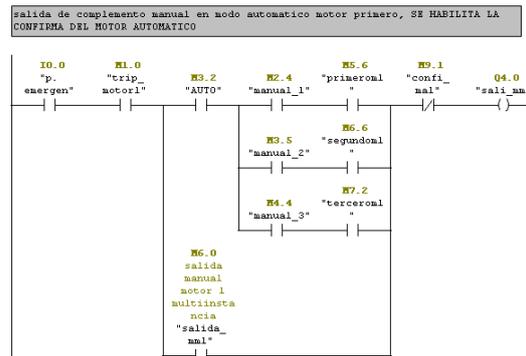


- New network
- Bit logic
- Comparator
- Converter
- Counter
- DB call
- Jumps
- Integer function
- Floating-point fct.
- Move
- Program control
- Shift/Rotate
- Status bits
- Timers
- Word logic
- FB blocks
- FC blocks
- SFB blocks
- SFC blocks
- Multiple instances
- Libraries

Network 4 : Title:

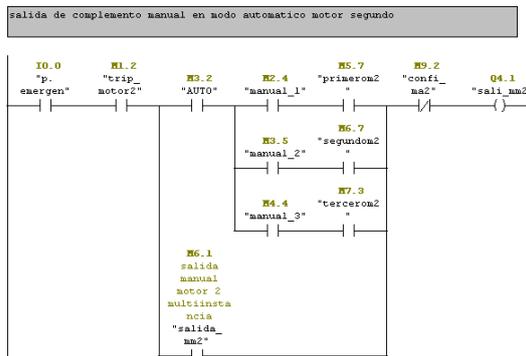


Network 5 : Title:



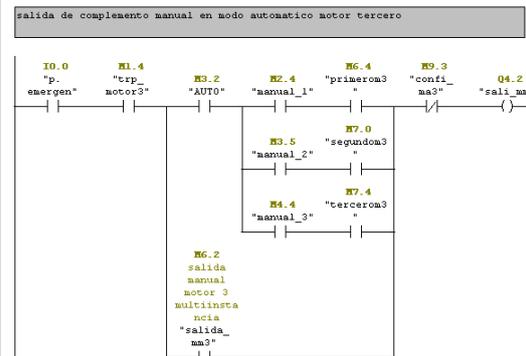
- Bit logic
- Comparator
- Converter
- Counter
- DB call
- Jumps
- Integer function
- Floating-point fct.
- Move
- Program control
- Shift/Rotate
- Status bits
- Timers
- Word logic
- FB blocks
- FC blocks
- SFB blocks
- SFC blocks
- Multiple instances
- Libraries

Network 6 : Title:



- New network
- Bit logic
- Comparator
- Converter
- Counter
- DB call
- Jumps
- Integer function
- Floating-point fct.
- Move
- Program control
- Shift/Rotate
- Status bits
- Timers
- Word logic
- FB blocks
- FC blocks
- SFB blocks
- SFC blocks
- Multiple instances
- Libraries

Network 7 : Title:



- New network
- Bit logic
- Comparator
- Converter
- Counter
- DB call
- Jumps
- Integer function
- Floating-point fct.
- Move
- Program control
- Shift/Rotate
- Status bits
- Timers
- Word logic
- FB blocks
- FC blocks
- SFB blocks
- SFC blocks
- Multiple instances
- Libraries

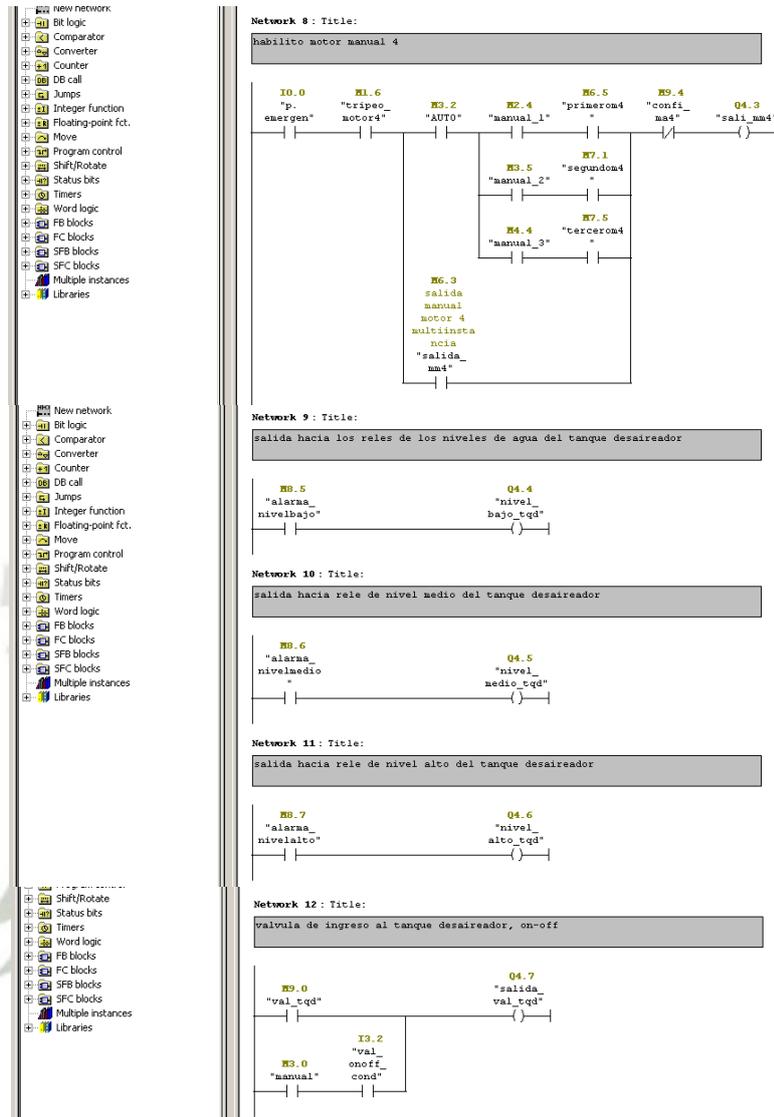


Figura 91 FC2 del Proyecto

- *En este proyecto se realiza un control automático de motores en el cual se base todo este proyecto de tesis, adicionalmente se programa una secuencia para el encendido manual de los motores sin regulación de variadores, es decir que cuando se acciona el método manual y encendemos un motor este motor tiene un arranque directo, pero*

para este arranque de forma manual utilizaremos DB de instancia para varios FB de instancia o más conocido como multiinstancia que nos permite ahorra memoria en nuestro PLC, les explicare de que trata la multiinstancia:

Un mismo DB puede estar asociado a varios DB's, a estos DB's se les llama instancias, y cada una de esas instancias contiene distintos datos; dependiendo de cómo se llame al FB éste utilizará un DB u otro.

Por ejemplo, si se asignan varios bloques de datos de instancia aun bloque de función FB que controle un motor, se puede utilizar el mismo FB para controlar varios motores.

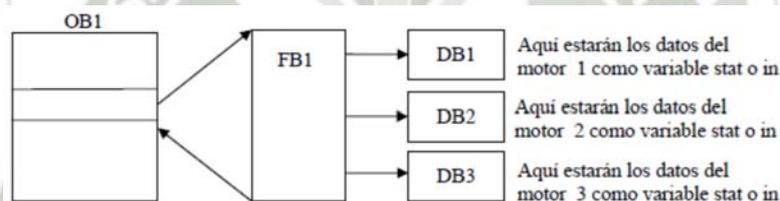


Figura 92: Diagrama de Programación de llamada de Instancia

Dependiendo de cómo se llame al FB1:

CALL FB1,DB1 → Utiliza los datos del motor 1

CALL FB1,DB2 → Utiliza los datos del motor 2

CALL FB1,DB3 → Utiliza los datos del motor 3

En el caso anterior si tuviéramos 100 motores, habría que hacer 100 instancias = 100 DB's de instancia. Esto consume mucha memoria en el autómatas.

A un FB se pueden transferir conjuntamente en un DB de instancia los datos de instancia para diferentes motores. A tal efecto, la llamada de los controles de motores se ha de efectuar en otro FB y en el área de declaración del FB invocante se deben declarar las variables estáticas con el tipo de datos de un FB para las diferentes instancias.

Utilizando un DB de instancia para varias instancias de un FB se ahorra capacidad de memoria y optimiza el uso de los bloques de datos.

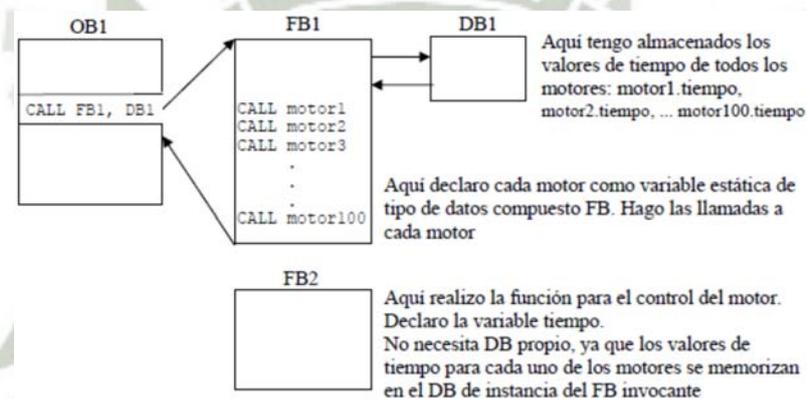


Figura 93: Diagrama de Bloques Instancia

Una vez visto las cualidades del DB de instancia procederemos a programar la lógica para la opción manual:

- Insertamos el FB1, en la cual definimos nuestras variables de entradas, salidas y programamos nuestra lógica.

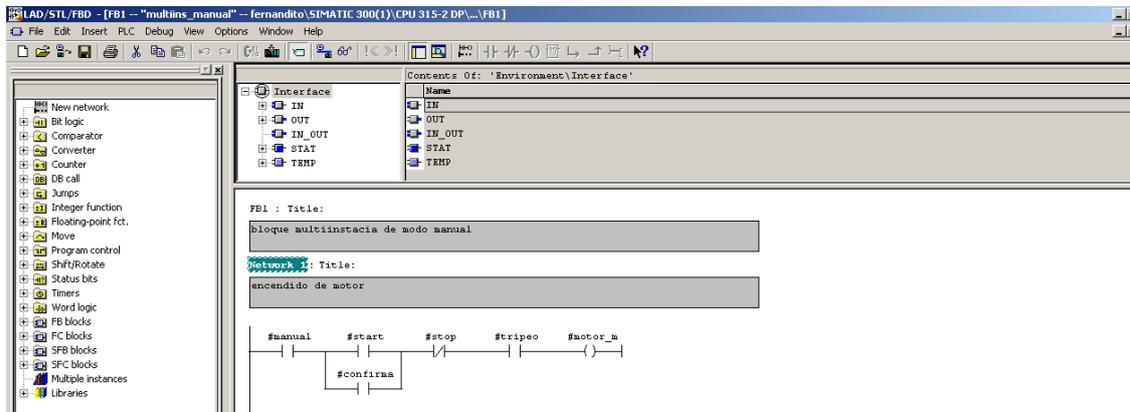
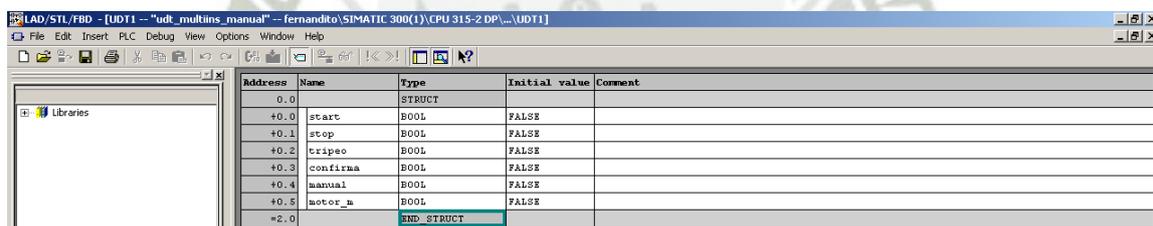


Figura 94: FB1 del Proyecto

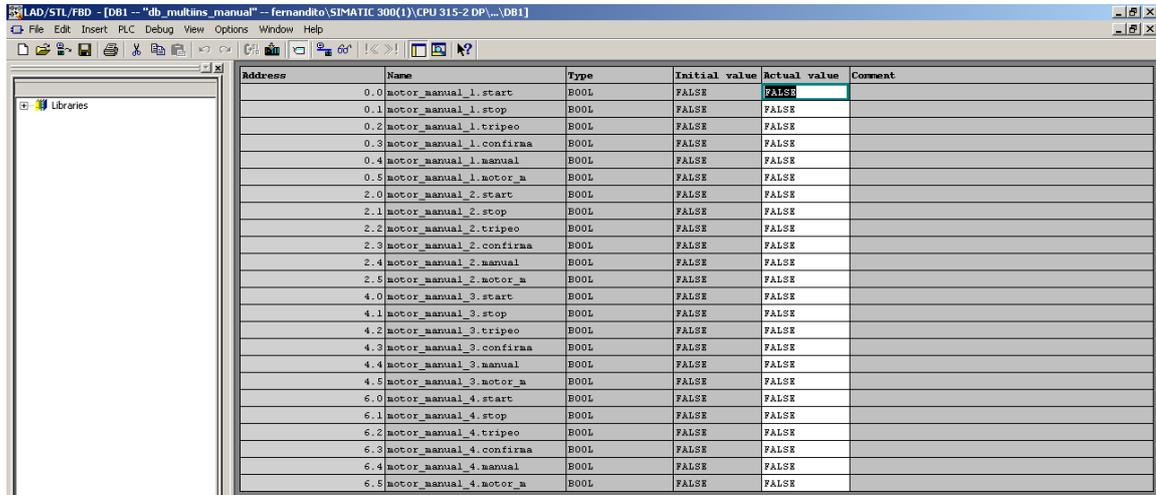
- Creamos una plantilla de datos de usuarios UDT1, en la cual definimos las mismas variables declaradas en el FB1.



Address	Name	Type	Initial value	Comment
0.0		STRUCT		
+0.0	start	BOOL	FALSE	
+0.1	stop	BOOL	FALSE	
+0.2	tripeo	BOOL	FALSE	
+0.3	confirma	BOOL	FALSE	
+0.4	manual	BOOL	FALSE	
+0.5	motor_m	BOOL	FALSE	
*2.0		END_STRUCT		

Figura 95: UDT1 del Proyecto

- EL siguiente paso es crear un bloque de datos en este caso DB1, al abrir este bloque de datos declaramos los 4 motores con la extensión UDT, utilizados para este proyecto en la figura se desglosa para poder ver los datos que jalo para cada motor, estos datos deben de coincidir con los declarados en FB1.



Address	Name	Type	Initial value	Actual value	Comment
0.0	motor_manual_1_start	BOOL	FALSE	FALSE	
0.1	motor_manual_1_stop	BOOL	FALSE	FALSE	
0.2	motor_manual_1_tripeco	BOOL	FALSE	FALSE	
0.3	motor_manual_1_confirma	BOOL	FALSE	FALSE	
0.4	motor_manual_1_manual	BOOL	FALSE	FALSE	
0.5	motor_manual_1_motor_m	BOOL	FALSE	FALSE	
2.0	motor_manual_2_start	BOOL	FALSE	FALSE	
2.1	motor_manual_2_stop	BOOL	FALSE	FALSE	
2.2	motor_manual_2_tripeco	BOOL	FALSE	FALSE	
2.3	motor_manual_2_confirma	BOOL	FALSE	FALSE	
2.4	motor_manual_2_manual	BOOL	FALSE	FALSE	
2.5	motor_manual_2_motor_m	BOOL	FALSE	FALSE	
4.0	motor_manual_3_start	BOOL	FALSE	FALSE	
4.1	motor_manual_3_stop	BOOL	FALSE	FALSE	
4.2	motor_manual_3_tripeco	BOOL	FALSE	FALSE	
4.3	motor_manual_3_confirma	BOOL	FALSE	FALSE	
4.4	motor_manual_3_manual	BOOL	FALSE	FALSE	
4.5	motor_manual_3_motor_m	BOOL	FALSE	FALSE	
6.0	motor_manual_4_start	BOOL	FALSE	FALSE	
6.1	motor_manual_4_stop	BOOL	FALSE	FALSE	
6.2	motor_manual_4_tripeco	BOOL	FALSE	FALSE	
6.3	motor_manual_4_confirma	BOOL	FALSE	FALSE	
6.4	motor_manual_4_manual	BOOL	FALSE	FALSE	
6.5	motor_manual_4_motor_m	BOOL	FALSE	FALSE	

Figura 96: DB1 del Proyecto

- Creamos un bloque de funciones que en este caso es FB2 y en la creación escogemos la opción multiinstancia, al abrir este bloque y dentro de los tipos de datos Staticas, en nombre creamos los cuatro motores y el tipo de dato es FB1. En el primer segmento al lado izquierdo desplegamos la carpeta MULTIINSTANCIA e insertamos en el segmento uno el motor_manual_1 y así sucesivamente hasta llegar al motor 4.

LAD/STL/FBD - [FB2 -- "fb_multiins_manual" -- fernandito.SIMATIC 300(1).CPU 315-2 DP... \FB2]

File Edit Insert PLC Debug View Options Window Help

Contents Of: 'Environment\Interface\STAT'

Name	Data Type	Address	Initial Value	Exclusion address	Termination address	Comment
motor_manual_1	multiins_manual	0.0				
motor_manual_2	multiins_manual	6.0				
motor_manual_3	multiins_manual	12.0				
motor_manual_4	multiins_manual	18.0				

las memorias que empiecen con 0 son entradas, las que empiecen con 1 son salidas

Network 1: Title:
Bloque manual del motor 1, se arma con memorias y entradas depues reemplazar por Datos para la pancalla.

```

#motor_manual_1
EN          ENO
M0.0       start
motor      motor
manual_1   manual
"start"    "start"
"notal"    "start"
M0.1       stop
motor      motor
mamall    mamall
"stop_"    "stop"
"notal"    "stop"
M1.0       "trip_
motor1"    tripeo
M1.1       "confirma_
ma1"       confirma
M3.0       "manual"
manual     manual
    
```

Network 2: Title:
Bloque de arranque manual motor 2

```

#motor_manual_2
EN          ENO
M0.2       start
motor      motor
manual_2   manual
"start"    "start"
"notal"    "start"
M0.3       stop
motor      motor
manual2    manual2
"stop_"    "stop"
"notal"    "stop"
M1.2       "trip_
motor2"    tripeo
M1.3       "confirma_
ma2"       confirma
M3.0       "manual"
manual     manual
    
```



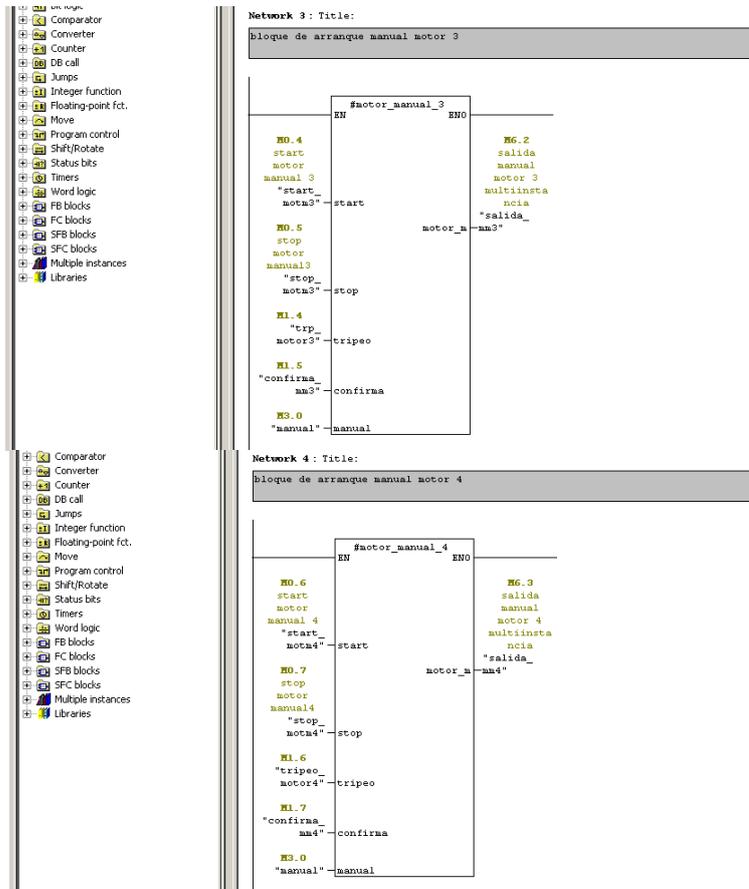
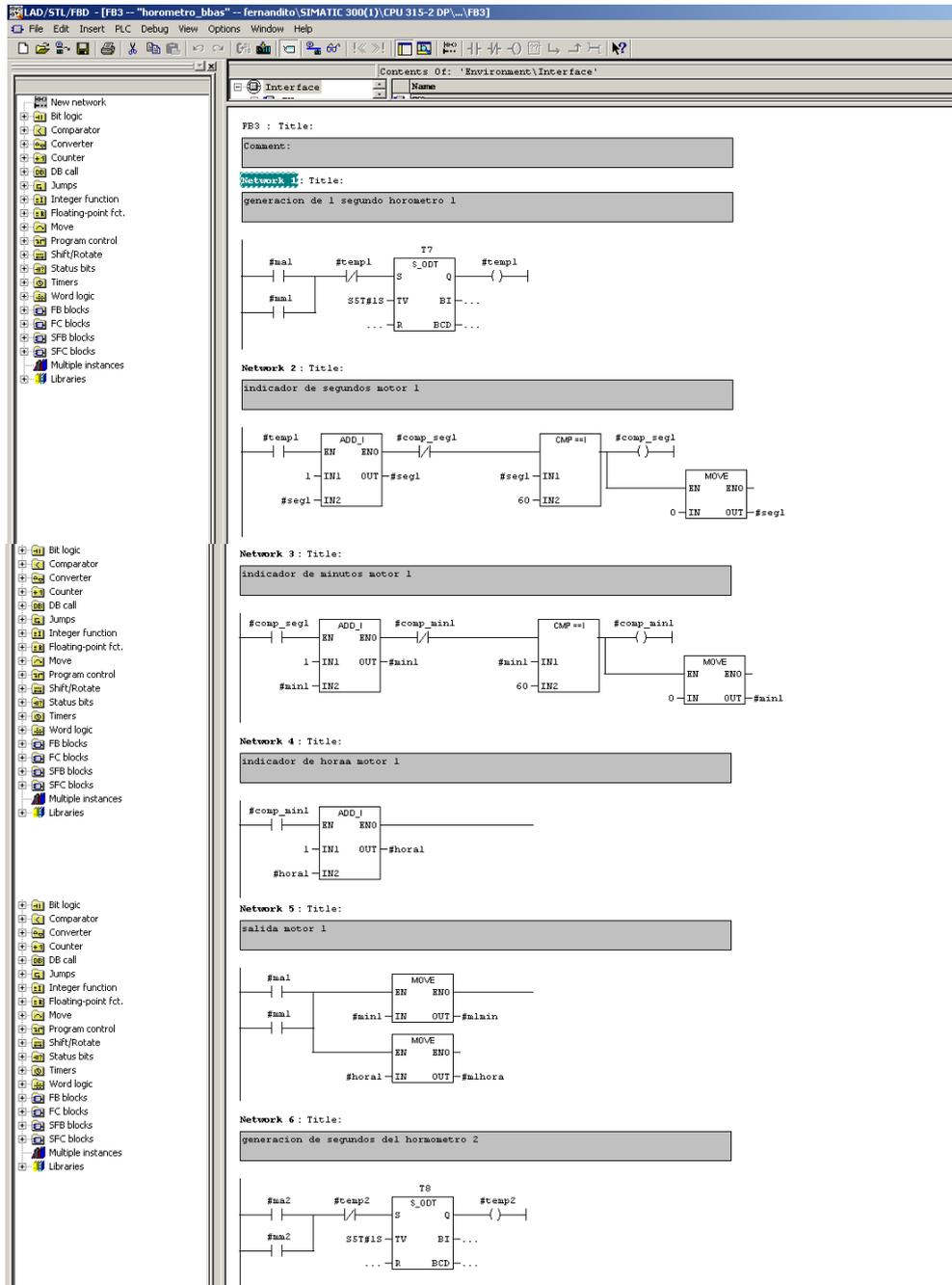
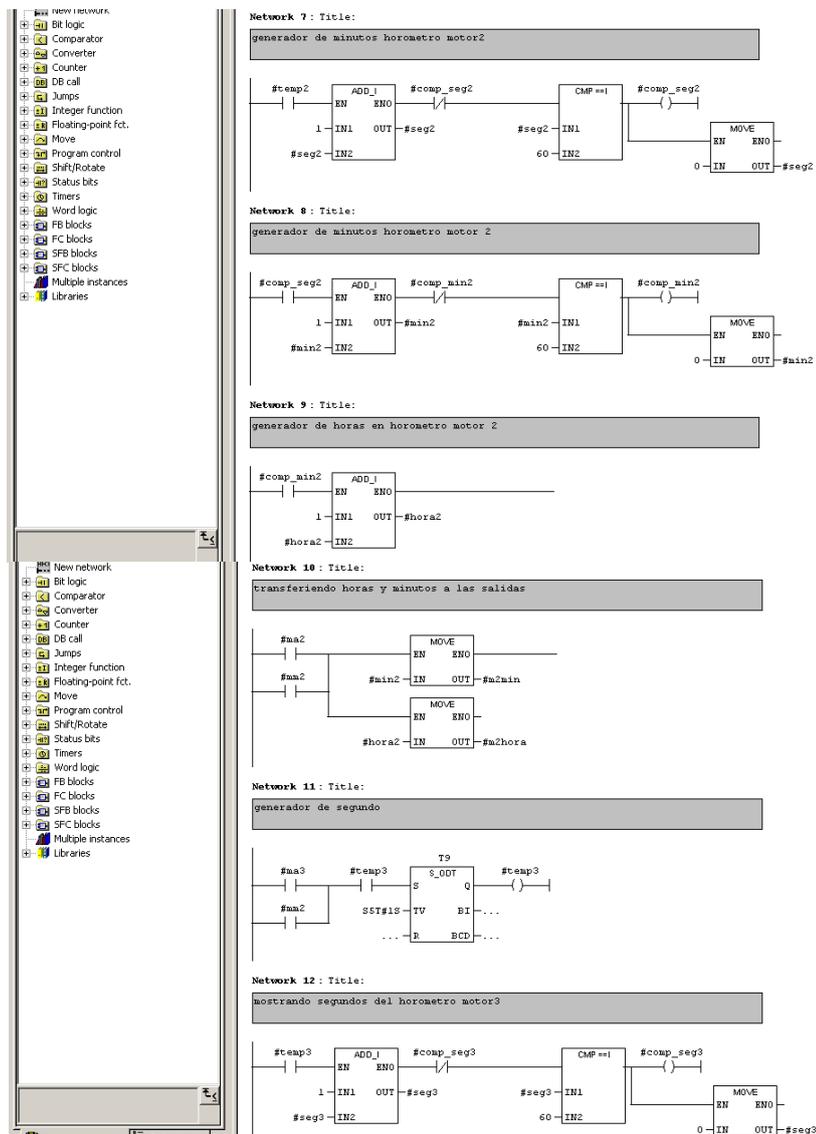


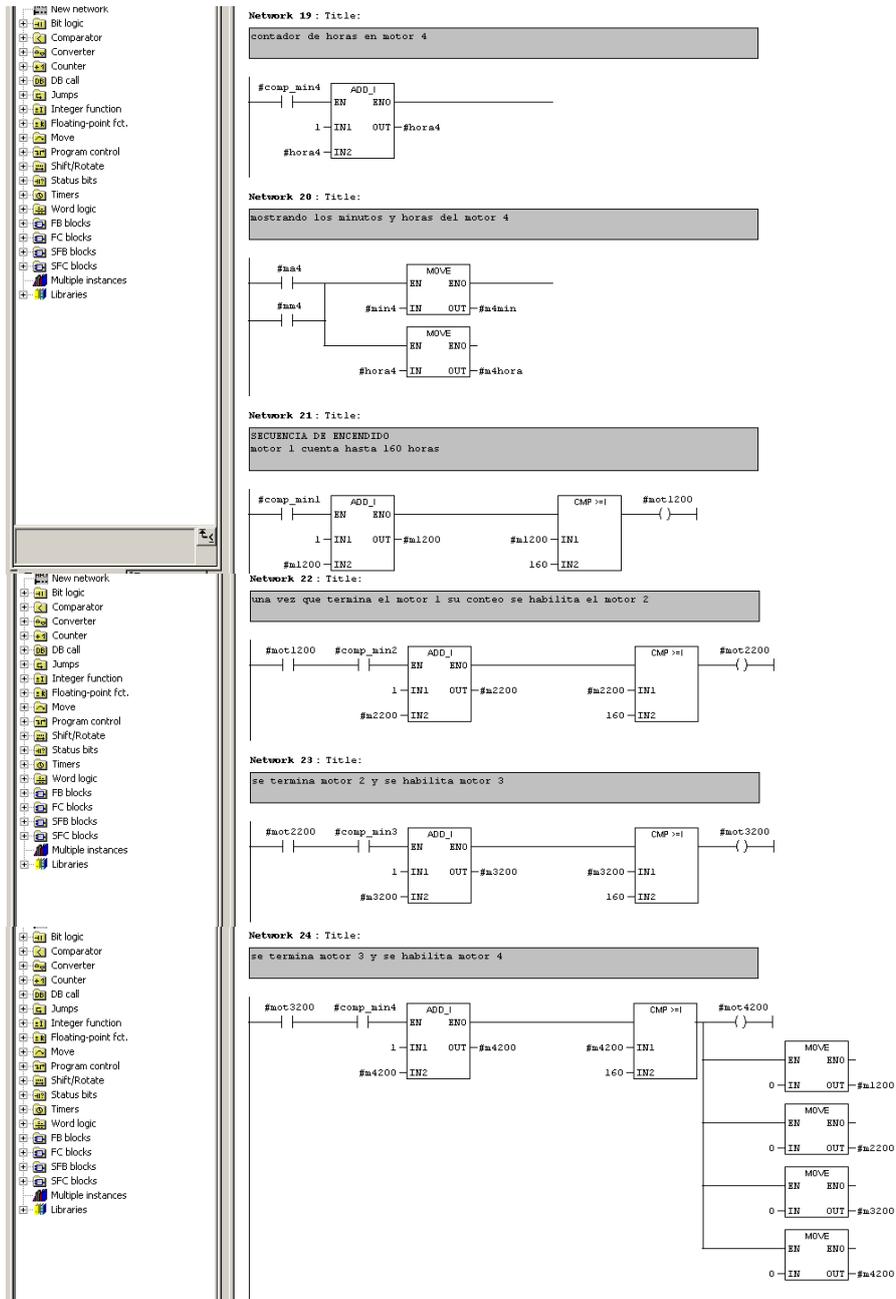
Figura 97: FB2 del Proyecto

- *En este proyecto los motores que más trabajan serían el motor 1 y 2, el motor 3 tendría un desgaste regular y el motor 4 tendría un desgaste menor ya que solo se utilizaría en caso extremo, es por eso que para poder tener un desgaste parejo en todos los equipos se va a programar un horometro y se le aplicara a cada bomba y poder llegar a un desgaste parejo en todos los equipos, es decir que cada uno de los cuatro motores se turnaran para arrancar como primeros cada 160 horas, así el desgaste en*

los equipos sería iguales, la señales de salida de los horómetros son memorias los cuales serán utilizados en FC2.







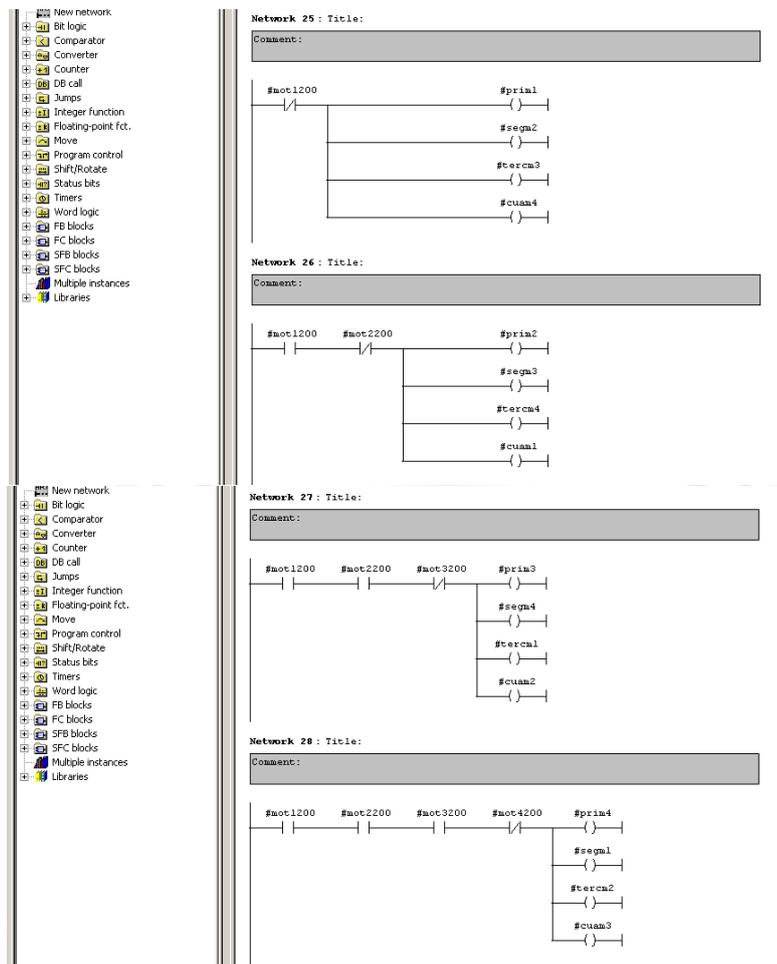


Figura 98: FC2 del Proyecto

- *Parte este proyecto utilizamos un sensor de presión que está instalado en el manifold a las salidas de las bombas, esta presión marcada por este sensor tiene que ser enviada hacia nuestro PLC entradas analógicas y de acuerdo al valor que nos lee nosotros prendemos y apagamos bombas para poder abastecer de agua hacia las calderas, pero para poder leer los datos enviados por el sensor de salida de 4 – 20 mA, al tener esta señal en el módulo de entradas analógicas, tendremos que tratar esta señal y*

convertirla en una señal que se pueda trabajar en el PLC, este procedimiento se llama desescalamiento.

El desescalamiento consiste en tener una señal de entrada analógica de 4-20mA y nosotros poderlos convertir a unidades de ingeniería para poderlas trabajar es decir de 0 – 100% o 0-300 psi, o 20 – 100 Litros, etc. Para esta aplicación de desescalamiento crearemos el bloque de funciones FC30 y lo llamaremos “entana_420”, para poderlo distinguir de los demás bloques, en este bloque ingresaremos el valor de 4-20 mA y lo escalaremos en un valor de 0 – 100 % para poderlos enviar hacia el bloque de funciones FC1 que es el bloque encargado de desescalar.

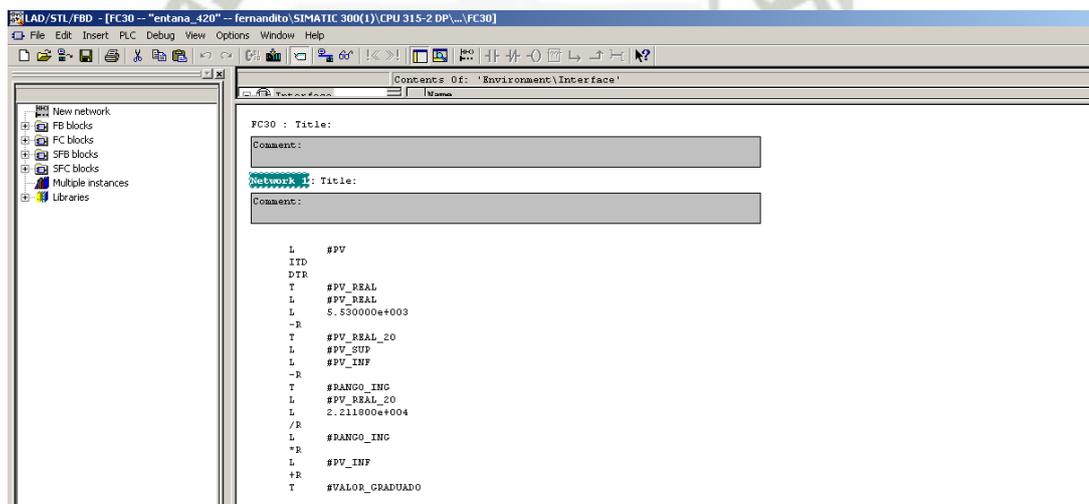


Figura 99: FC30 del Proyecto

Una vez creado el bloque FC30, este bloque se llama en el bloque FC1 para poder hacer uso de él y realizar el desescalamiento, en el bloque FC1 también llega la señal de

salida del PID y se escala de para poder enviar una señal de 4-20mA, hacia el variador de velocidad y poder controlar la velocidad de los motores.

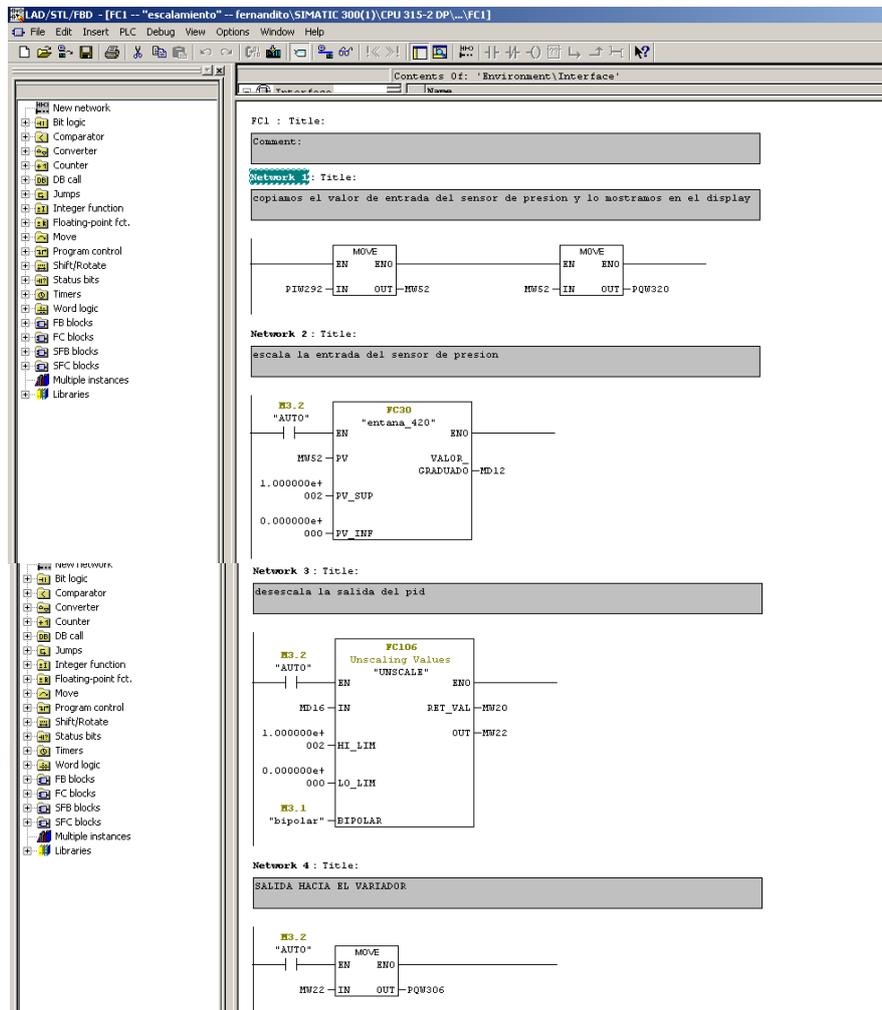


Figura 100: FC1 del Proyecto

- *Para este proyecto la configuración del sistema de alimentación de agua hacia calderas ya fue solucionado, pero como se mencionó en los capítulos anteriores si no se ingresa el agua a la temperatura determina podría causar daños en la infraestructura*

de las calderas y un consumo adicional de combustible para poder llegar a las temperaturas deseadas, es por eso que es muy importante también poder mantener el agua a una temperatura superior a los 80°C y adicionalmente poder control el nivel del agua en el tanque desaereador. Por eso se realizó unos bloques los cuales podrán cumplir con este requerimiento y así poder completar un sistema de control de nivel agua hacia calderas de forma eficiente.

Para esto también se utilizan sensores los cuales nos ayudan a cumplir con estas funciones mencionadas, para el control de la temperatura utilizaremos un PT100 y una válvula proporcional la cual regulara el ingreso de vapor hacia el tanque desaereador y para el control de nivel utilizaremos tres electrodos de nivel los cuales nos marcan nivel bajo, medio y alto. La señal de entrada del PT100 también será que ser tratada para poder trabajarla en la lógica del PLC, para lo cual cree un bloque de conversión de señales Analógicas en Digitales y poderla acondicionar estas señales de entrada el bloque utilizado para esta función es FC28 y este bloque será llamado desde el bloque FC5 (temp_tq_desai), el cual controlara la temperatura del tanque desaereador.

El bloque FC28 es:

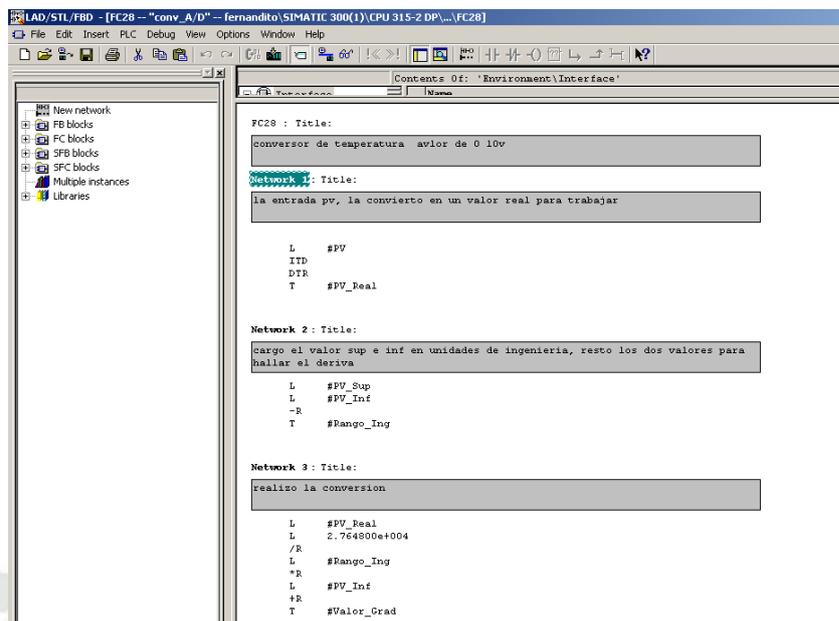


Figura 101: FC28 del Proyecto

Una vez configurado el bloque FC28, programamos la lógica para el control de ingreso de vapor, este control se realizara regulando una válvula proporcional, a continuación se muestra la programación del bloque FC5:

LAD/STL/FBD - [FCS -- "temp_tq_desal" -- fernandito\SIMATIC 300(1)\CPU 315-2 DP\...FCS]

File Edit Insert PLC Debug View Options Window Help

Contents Of: "Environment\Interface"

FC5 : Title:
programa para la valvula proporcional del tanque desaireador

Network 1 : Title:
piw288 entrada de sensor temp. tanque desaireador, se escala en un valor de 0 a 150C y la salida esta en md50

```

graph TD
    subgraph FC288 [FC288  
"conv_A/D"]
        EN --> ENO
        PIW288 -- PV --> Valor
        PIW288 -- Grad --> MD54
        1.500000e+002 -- PV_Sup --> Valor
        0.000000e+000 -- PV_Inf --> Valor
    end

```

Network 2 : Title:
se realiza un PID y tiene una salida md58

```

graph TD
    subgraph DB42 [DB42  
FB41  
Continuous Control  
"CONT_C"]
        EN --> ENO
        COM_RST -- LMN --> MD58
        MAN_ON -- LMN_PER --> ...
        PVPER_ON -- QLMN_HLM --> ...
        P_SEL -- QLMN_LLM --> ...
        I_SEL -- LMN_P --> ...
        INT_HOLD -- LMN_I --> ...
        I_ITL_ON -- LMN_D --> ...
        D_SEL -- PV --> ...
        CYCLE -- ER --> ...
        8.500000e+001 -- SP_INT --> ...
        MD54 -- PV_IN --> ...
        PV_PER --> ...
        MAN --> ...
        2.100000e+001 -- GAIN --> ...
        T#4H32S -- TI --> ...
        T#54S -- TD --> ...
        TM_LAG --> ...
        DEADB_W --> ...
        LMN_HLM --> ...
        LMN_LLM --> ...
        PV_FAC --> ...
        PV_OFF --> ...
        LMN_FAC --> ...
        LMN_OFF --> ...
        I_ITLVAL --> ...
        DISV --> ...
    end

```

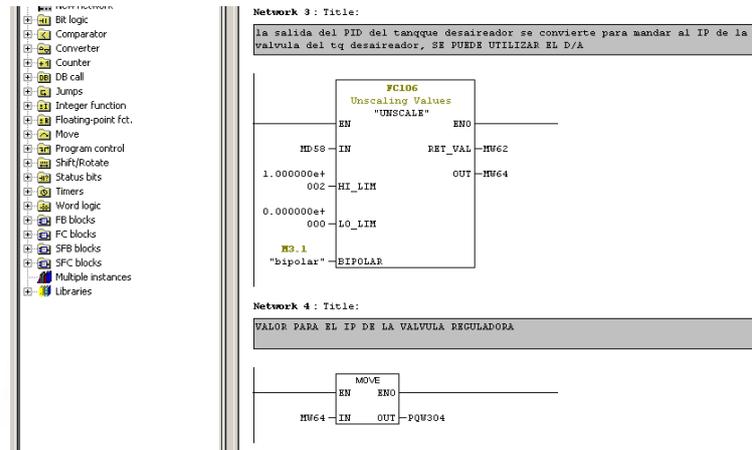


Figura 102: FC5 del Proyecto

- *Para el control del nivel en el tanque desaerador utilizamos tres electrodos y la configuración se realizara en el bloque FC4, cuando se esté en nivel bajo se prendera una alarma sonora.*

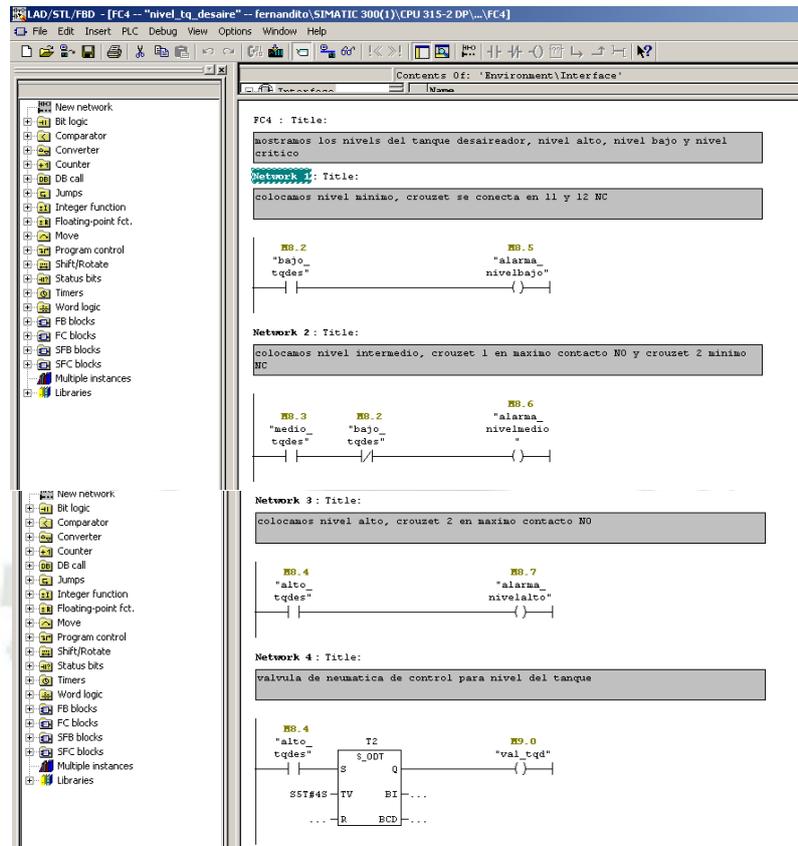


Figura 103: FC4 del Proyecto

4.3 Implementación de la Estructura del Sistema de Alimentación de Agua Hacia Calderas

En los puntos anteriores se detalló la programación de la lógica y los equipos que se utilizaron en este proyecto, en este punto mostraremos los cambios realizados en todo el proceso de alimentación de agua hacia calderas, su acabo final y la puesta en marcha. Estas mejoras se realizaron para un mejor control y funcionamiento de todo el diseño.

- *La renovación completa del tablero eléctrico, antes de la implementación se estaba trabajando con un tablero antiguo que no contaba con algún grado de protección para los elementos eléctricos en su interior, como se aprecia en la Figura 104, el tablero estaba sobredimensionado y con desorden en su interior no contando con un plano eléctrico lo cual podría ser un problema en caso se quiera detectar algún inconveniente.*

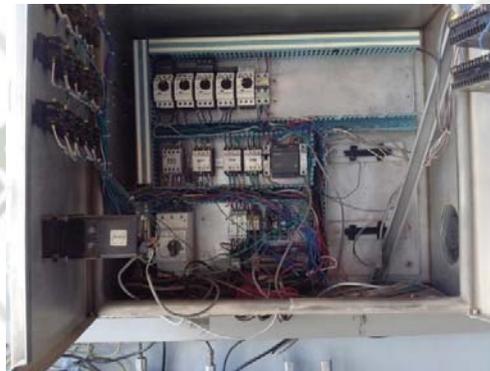


Figura 104: Tablero eléctrico Inicial del proyecto

Se optó por renovar el tablero eléctrico por uno nuevo con protección IP66, que nos garantiza protección contra partículas de polvo y agua, así manteniendo una hermeticidad dentro del tablero y garantizando un adecuado funcionamiento de los equipos eléctricos y electrónicos dentro del mismo, también se realizó el dimensionamiento de acuerdo a los componentes que utilizamos para este proyecto, en la Figura.105, se muestra el nuevo tablero implementado con PLC, Variador, guardamotores, relés y contactores.

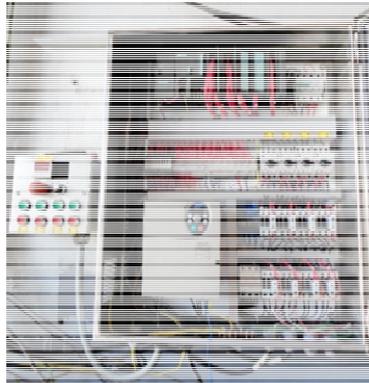


Figura 105: Tablero Eléctrico Nuevo del Proyecto

- En la línea de ingreso de Vapor hacia el tanque desaereador, se mejoró implementando una válvula proporcional la cual controlamos para poder dejar ingresar la cantidad adecuada de vapor para realizar un calentamiento homogéneo durante todo el proceso. Como podemos ver en la Figura 106, no se contaba con ninguna válvula de regulación para lo cual este control lo realizaba el operador de sala calderas con una válvula de bola manual, lo que implica que se tenía que estar monitoreando la temperatura las 24 horas del día para no tener algún inconveniente que pueda poner en riesgo el proceso.*



Figura 106: Línea de Ingreso Vapor Inicial

Para obtener una mejor temperatura en el tanque desaereador, optamos por instalar una válvula proporcional de la marca SAMSON, que nos controlara el ingreso de vapor hacia el tanque desaereador con la señal que mande el PLC, esto garantiza un mejor funcionamiento y evitamos posibles descuidos por parte del personal. La válvula es monitoreada y controlada por el PLC que se encuentra en el tablero eléctrico, la válvula instalada se puede apreciar en la Figura 107.



Figura 107: Línea de Ingreso de vapor Modificado

- *Para poder realizar el control de las bombas de alimentación de agua hacia calderas, se explicó en los capítulos anteriores se realizaría con un sensor de presión, el cual se instalaría en el manifold de salida, esto garantiza poder medir la presión de salida del sistema de alimentación de agua hacia calderas, enviar esta señal al PLC para poder trabajar y realizar la lógica de control, en la Figur108, se muestra instalado el sensor de presión.*



Figura 108: Bombas de Alimentación de Condensado a Calderas del Proyecto

4.4 Puesta en Marcha del Sistema de Alimentación de Agua hacia Calderas

Realizadas las mejoras en el sistema de alimentación de agua hacia calderas de Agroindustrial del Perú, mostraremos como se realizó la implementación y puesta en marcha de este proyecto, cada imagen será descrita y detallada con los trabajos realizados.

- *Para la instalación de la válvula proporcional, se procedió a calibrar dicha válvula para poder tener un mejor control de la misma, como se puede apreciar en la Figura 109, se conecta la señal de 4-20mA y la línea de aire, una vez instalado estos pasos procedemos a especificar en el display los parámetros de trabajo y características de la válvula para poder tener un control adecuado de la misma.*



Figura 109: Calibración de la válvula Proporcional de Ingreso Vapor

- *Realizamos la programación del Variador de Frecuencia, al cual le introducimos el valor de los motores que va a controlar, configuramos la entrada analógica para poder controlar el motor y rango de trabajo, en la Figura.110, se muestra el variador utilizado en este proyecto ya configurado.*



Figura 110: Programación del Variador de Velocidad

- *Realizamos también la descarga del programa y antes desarrollado hacia nuestro PLC el cual controlara todo nuestro proceso, esta programación se prueba en vacío y también en funcionamiento, para la programación utilizamos una Laptop y para la comunicación el cable de programación el PC Adapter, se puede ver en la Figura 111 – 112.*



Figura 111: Descarga del Programa hacia el PLC S7-300



Figura 112: PC Adapter, para programar el PLC

- *Una vez programada la válvula y lista para trabajar, instalamos en la línea de ingreso de vapor hacia el Tanque desaereador, como se aprecia en la Figura.113.*



Figura 113: Implementación de una Válvula Proporcional

- *Programado el Variador y el PLC, armamos el tablero eléctrico y lo ponemos en su posición para empezar a trabajar, estos pasos se verán en las siguientes figuras.*



Figura 114: Tablero Eléctrico Final del proyecto



Figura 115: Cambio de Tablero Antiguo por el Tablero Nuevo



Figura 116: Puesta en Marcha y Monitoreo del Programa con la CPU

- *En los videos del CD adjunto se muestran la puesta en marcha del proyecto.*

4.5. Implementación del Control Fuzzy en el Entorno LabView

Este punto de este capítulo, desarrollaremos la otra alternativa que es el control Fuzzy, este control será desarrollado en el entorno LabView, esta alternativa deja como una opción para el Control del Sistema de Alimentación de Agua hacia Calderas de Agroindustrial del Perú para un futuro, no se desarrolló por motivos de que la planta no cuenta con el material adecuado para poder implementar en el entorno LabView, actualmente solo cuenta con PLC s7-300 y los módulos detallados en los capítulos anteriores que nos servirán para poder realizar nuestra programación ya explicada en los puntos pasados.

4.5.1 Lógica Difusa

Es una lógica alternativa a la lógica clásica que pretende introducir un grado de vaguedad en las cosas que evalúa. En el mundo en que vivimos existe mucho conocimiento ambiguo e impreciso por naturaleza. El razonamiento humano con frecuencia actúa con este tipo de información. La lógica difusa fue diseñada precisamente para imitar el comportamiento del ser humano.

La lógica difusa tiene sus raíces en la teoría de conjuntos difusos desarrollada por Zadeh en la década de los 60, la que propone que un elemento siempre pertenece en un cierto grado a un conjunto y nunca pertenece del todo al mismo, esto permite establecer una manera eficiente para trabajar con incertezas, así como para acondicionar el conocimiento en forma de reglas hacia un plano cuantitativo, factible de ser procesado por computadores.

La lógica difusa en comparación con la lógica convencional permite trabajar con información que no es exacta para poder definir evaluaciones convencionales, contrario con la lógica tradicional que permite trabajar con información definida y precisa.

4.5.2 Teoría de Conjuntos Difusos

La lógica difusa permite tratar con información que no es exacta o con un alto grado de imprecisión a diferencia de la lógica convencional la cual trabaja con información precisa.

4.5.2.1 Conjuntos Clásicos

Los conjuntos clásicos surgen por la necesidad del ser humano de clasificar objetos y conceptos. Estos conjuntos pueden definirse como un conjunto bien definido de elementos o mediante una función de pertenencia “u” que toma valores de 0 o 1, de un universo en discurso para todos los elementos que pueden o no pertenecer al conjunto.

Un conjunto clásico se puede definir con la función de pertenencia mostrada en la ecuación.

$$u_A(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \notin A \\ 1 & \text{si } x \in A \end{cases}$$

De acuerdo a lo mencionado en la Lógica Clásica existen dos estados posibles para una puerta.

Una Puerta está abierta (1)



Una puerta está cerrada (0)

4.5.2.2 Conjuntos Difusos

La necesidad de trabajar con conjuntos difusos surge del hecho que existen conceptos que no tienen límites claros. Un conjunto difuso se encuentra asociado por un calor lingüístico que está definido por una palabra, etiqueta lingüística o adjetivo. En los conjuntos difusos la función de pertenencia puede tomar valores del intervalo entre 0 y 1, y la transición del valor entre cero y uno es gradual, y no cambia de manera instantánea como pasa con los conjuntos clásicos. Un conjunto difuso en un universo en discurso puede definirse como lo muestra la siguiente ecuación.

$$A = \{(x, u_A(x)) | x \in U\}$$

Donde $u_A(x)$ es la función de pertenencia de la variable "x", y "u" es el universo en discurso.

Cuando más cerca este la pertenencia del conjunto A al valor de 1, mayor será la pertenencia de la variable "x" al conjunto A, esto se puede ver en la Figura 107.

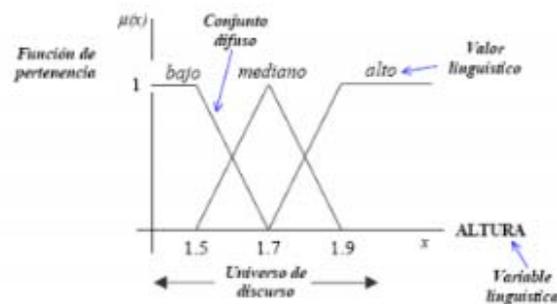


Figura 117: Conjuntos Difusos

Por lo mencionado y tomando el ejemplo anterior una puerta no tiene por qué estar necesariamente abierta o cerrada, existen además otros estados.

Puerta Abierta (1)

Puerta bastante abierta (0.8)

Puerta abierta a medias (0.5)

Puerta casi cerrada (0.1)

Una puerta está cerrada (0)



4.5.3 Funciones de Pertenencia

Aun cuando cualquier función puede ser válida para definir un conjunto difuso, existen ciertas funciones que son más comúnmente utilizadas por su simplicidad matemática, entre estas se encuentran las funciones de tipo triangular, trapezoidal, gaussiana, exponenciales, polinómicas, etc.

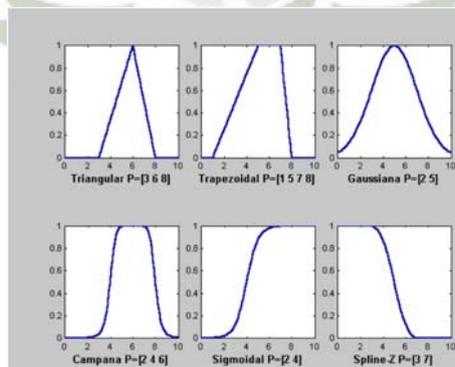


Figura 118: Función de Pertenencia

4.5.4 El Controlador Difuso

La lógica difusa se aplica principalmente en sistemas de control difuso, que utilizan expresiones ambiguas para formular reglas que controlen el sistema. Un sistema de control difuso trabaja de manera muy diferente a los sistemas de control convencionales. Estos usan el conocimiento experto para generar una base de conocimientos que darán al sistema la capacidad de tomar decisiones sobre ciertas acciones que se presentan en su funcionamiento. Los sistemas de control difuso permiten describir un conjunto de reglas que utilizaría una persona para controlar un proceso y a partir de estas reglas generar acciones de control. El control difuso puede aplicarse tanto en sistemas muy sencillos como en sistemas cuyos modelos matemáticos sean muy complejos. La estructura de un controlador difuso se muestra en la Figura 109.

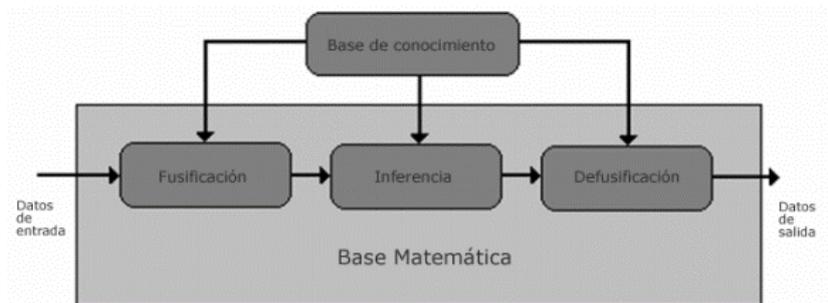


Figura 119: Estructura de la Lógica Difusa

En un controlador a partir del valor de referencia (setpoint) y del valor de entrada del proceso, se calcula el error (E) y el cambio del error (CE). El controlador difuso toma como variable de partida E y CE y tiene como variable de salida el cambio en la acción de control a

aplicar (CU), o bien una acción de control absoluta (U). El controlador difuso se compone internamente de reglas lingüísticas, que tienen como condiciones los valores posibles de las variables de entrada, y que concluyen la variación a efectuar en la acción de control, en términos también lingüísticos. Posteriormente se transforma en un valor determinista.

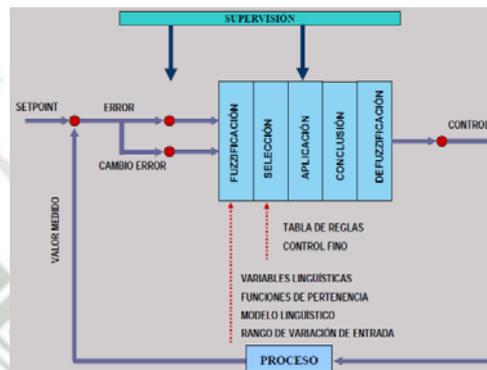


Figura 120: Estructura de un Control Difuso detallado

4.5.5 Fusificación

La fusificación, tiene como objetivo valores crisp o valores reales en valores difusos. En la fusificación se asignan grados de pertenencia a cada una de las variables de entrada con relación a los conjuntos difusos previamente definidos utilizando las funciones de pertenencia asociada a los conjuntos difusos.

4.5.6 Base de Conocimiento

La base de conocimiento, contiene el conocimiento asociado con el dominio de la aplicación y los objetivos del control. En esta etapa se deben definir las reglas lingüísticas de control que realizaran la toma de decisiones que decidirán la forma en la que debe actuar el sistema.

4.5.7 Inferencia

La inferencia, relaciona los conjuntos difusos de entrada y salida para representar las reglas que definirán el sistema. En la inferencia se utiliza la información de la base de conocimiento para generar reglas mediante el uso de condiciones, por ejemplo: si caso1 y caso2, entonces accion1.

4.5.8 Defusificación

La defusificación, realiza el proceso de acuerdo los valores difusos generados en la inferencia en valores crisp, que posteriormente se utilizaran en el proceso de control. En la defusificación se utilizan métodos matemáticos simples como el método del Centroide, Método del Promedio Ponderado y método de membresía del método del máximo.

4.5.9 Ejemplo Aplicación de Lógica Difusa

Para poder aplicar lo indicado en los puntos anteriores mostraremos un ejemplo de control con lógica difusa. Se requiere calificar los restaurantes de acuerdo a su precio. Se consideran dos variables: la calidad del servicio y de la comida.

Las variables lingüísticas son por lo tanto:

- *Variable de Servicio*
 - *Pobre*
 - *Bueno*
 - *Excelente*
- *Variable Comida*
 - *Mala*
 - *Buena*
- *Variable Restaurante*
 - *Barato*
 - *Promedio*
 - *Caro*

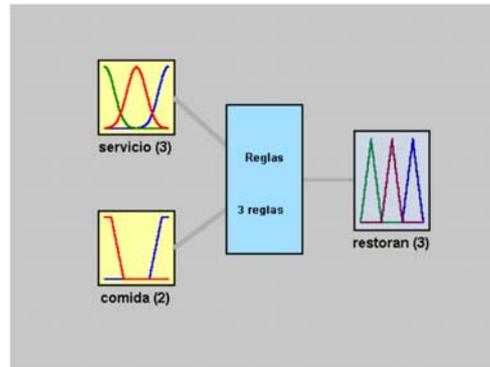


Figura 121: Esquema General de Lógica Difusa

Realizamos la función de pertenencia para Servicio, donde indicamos los valores dados para cada una de las variables.

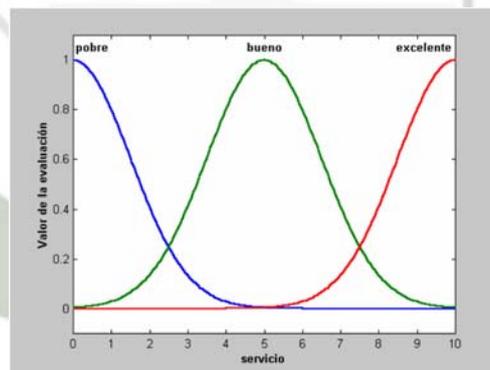


Figura 122: Función de pertenencia para Servicio

Realizamos la función de pertenencia para Comida, donde indicamos los valores dados para cada una de las variables, escogemos la forma trapezoidal.

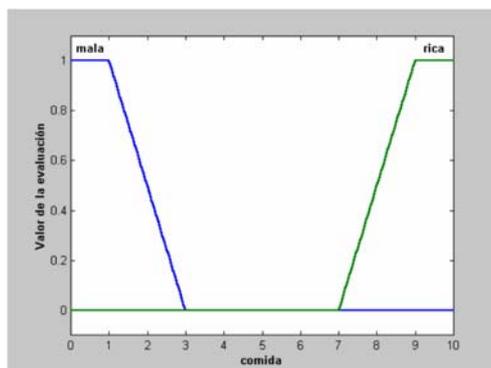


Figura 123: Función de pertenencia para Comida

Por ultimo declaramos la función de pertenencia para Restaurant, esta variable seria nuestros valores de salida.

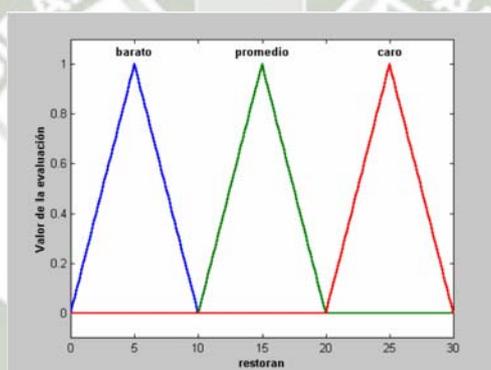


Figura 124: Función de pertenencia para Restaurant

En este paso vamos a definir las reglas, teniendo en cuenta las variables de entrada y salida el enunciado de las reglas son:

1. Si (**servicio** es pobre) o (**comida** es mala) entonces (**restaurant** es barato)
2. Si (**servicio** es bueno) entonces (**restaurant** es promedio)
3. Si (**servicio** es excelente) o (**comida** es rica) entonces (**restaurant** es caro)

4.5.10 Agregación de Reglas

Las reglas para lo Lógica Difusa se basan en el IF...THEN. Los conjuntos y los operadores difusos son los sujetos y predicadores de la lógica difusa. Las reglas if-then son usadas para formular las expresiones condicionales que abarcan la lógica difusa.

IF "X" is A THEN "Y" is B

Donde A y B, son los valores lingüísticos definidos por los conjuntos definidos en los rangos de los universos de discurso llamado X e Y, respectivamente. La parte **if** de la regla "X es A" es llamada el antecedente o premisa, mientras la parte **then** de la regla "Y es B" es llamada la consecuencia o conclusión.

4.5.11 Estructura Del Sistema

Según los puntos vistos anteriormente la estructura de la lógica difusa es la siguiente:

- La fusificación de las variables de entrada.
- Aplicación del operador difuso en el antecedente.
- Implicación del antecedente con el consecuente.
- Agregación de los consecuentes a través de las reglas
- La defusificación

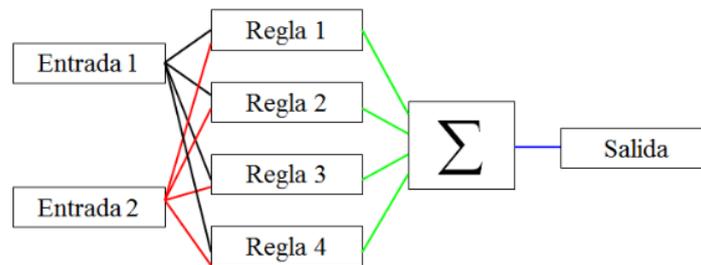


Figura 125: Estructura del Sistema Difuso

4.5.12 Que es Labview

LabView (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) es un sistema de desarrollo basado en programación gráfica, orientado a desarrollar aplicaciones para instrumentación que integra una serie de librerías para comunicación con instrumentos electrónicos como GPIB, RS232 o RS485 con tarjetas de adquisición de datos, sistemas de adquisición y acondicionamiento como VXI o SCXI, comunicaciones en redes TCP/IP, UDP, o en los estándares de software COM, OLE, DDE, DLL o ActiveX para Windows, así como AppleEvents para MacOS o PIPE para UNIX.

Los programas realizados en LabView, se llaman instrumentos virtuales “Vis”, ya que tienen la apariencia de los instrumentos reales, sin embargo, poseen analogías con funciones provenientes de lenguajes de programación convencionales.

Las principales características de los Vis se pueden describir como:

Los Vis contienen una interface interactiva de usuario, la cual se llama panel frontal, ya que simula el panel de un instrumento físico. Se puede entrar datos usando el teclado o el ratón y

tener una visualización de los resultados en la pantalla de computador. El Panel Frontal es la interface hombre-máquina de un VI.

Los Vis reciben instrucciones de un diagrama de bloques construido en lenguaje G, el cual suministra una solución grafica a un problema de programación. El diagrama de bloques es el código fuente de un VI.

Los Vis usan una estructura hereditaria y modular que permite realizar programas por niveles o hacer programas con otros programas o subprogramas. Un VI contenido en otro VI es denominado subVI. Todo VI se puede convertir en subVI sin ningún tipo de cambio en su estructura.

Con estas características LabVIEW, permite dividir un programa en una serie de tareas las cuales son divisibles nuevamente hasta que una aplicación complicada se convierte en una serie de subtareas simples. Todos los anteriores conceptos están de acuerdo con las concepciones moderna de la programación modular.

Además LabVIEW puede ser usado con poca experiencia en programación pues utiliza metodologías familiares a técnicos, ingenieros, doctores y la comunidad científica en general.

Cada VI de LabVIEW cuenta con dos interfaces: panel frontal y diagrama de bloques. Estas cuentan con paletas que contienen los objetos necesarios para implementar y desarrollar tareas. La Figura 126, muestra estas interfaces dentro de un entorno Windows.

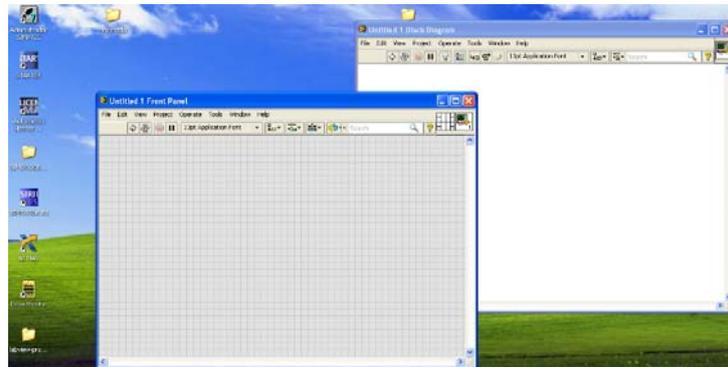


Figura 126: Entorno LabView

4.5.12.1 Panel Frontal

Es la interface gráfica que simula el panel de un instrumento real, permite la entrada y salida de datos, puede contener pulsadores, perillas, botones, gráficos y en general controles e indicadores.

Los controles son objetos que sirven para entrar datos al programa y pueden ser manipulados por el usuario. Los controles son variables de entrada.

Los indicadores sirven para presentar los resultados entregados por el programa que no pueden ser manipulados por el usuario. Los indicadores son variables de salida. En Figura 127, se muestra el panel frontal de una aplicación.

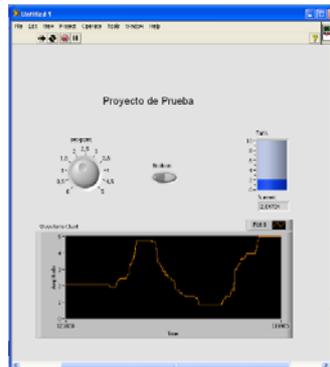


Figura 127: Panel Frontal del LabView

4.5.12.2 Diagrama De Bloques

En diagrama de bloques contiene el código fuente gráfico del VI, posee funciones y estructuras que relacionan las entradas con las salidas creadas en el panel frontal.

En un diagrama se distinguen: Terminales, que representan los controles e indicadores del panel. Funciones y SubVIs, que realizan tareas específicas. Estructuras y Cables que determinan el flujo de los datos en el programa. En general, cualquier de estas partes del diagrama de un VI se denomina NODO.

El diagrama de bloques de la Figura 128, muestra el código fuente correspondiente al panel de la Figura 127.

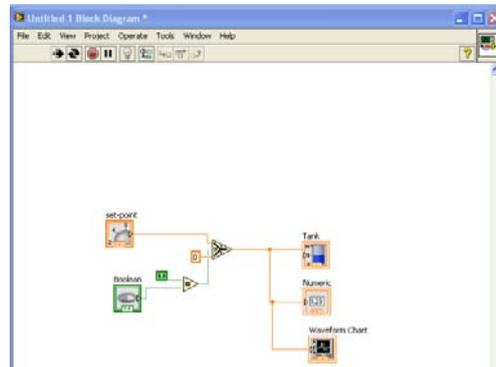


Figura 128: Diagrama de Bloque

4.5.12.3 Programa de Control de Bombas

En esta sección de este capítulo desarrollaremos la alternativa que se planteó en este proyecto de tesis, desarrollaremos el control Control Fuzzy utilizando el entorno grafico LabVIEW, para esta tesis utilizaremos el método de Mamdani.

A continuación mostraremos todos los pasos realizados en la creación de este proyecto y explicaremos paso a paso cada punto.

- *En la Figura 129, abrimos el proyecto con LabVIEW.*



Figura 129: Proyecto en entorno LabView

- *En la Pantalla Frontal del LabView, nos ponemos a crear todos los componentes necesarios para poder realizar un pequeño escada del sistema de alimentación de agua hacia calderas de Agroindustrial del Perú, en la figura siguiente se muestra un avance de lo trabajado en nuestro proyecto, donde simulamos el tanque desaereador, las calderas, el proceso y demás accesorios.*

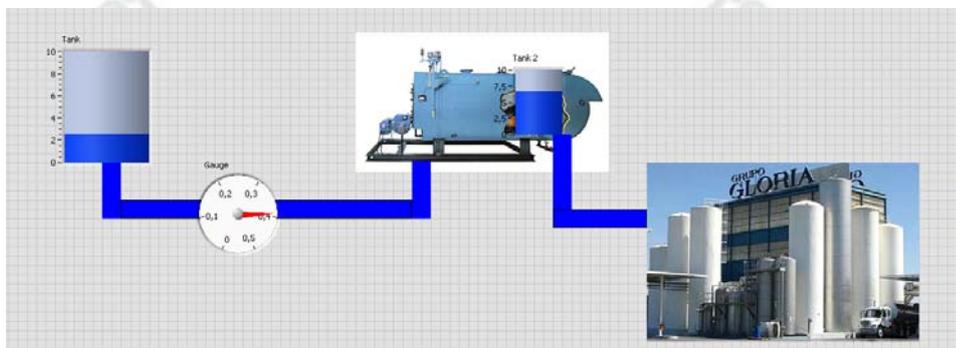


Figura 130: Panel Frontal del proyecto en entorno LabView

- *Cada parte o pieza que se va colocando en el panel frontal de nuestro proyecto, se muestra en el diagrama de bloques, donde empezamos a realizar el control de nuestro proyecto, definimos las entradas, salidas, formulas, control que realicemos.*



Figura 131: Diagrama de Bloque del proyecto en entorno LabView

- En la figura 132, mostramos el Panel Frontal finalizado, en donde se realizó un pequeño Scada de todo el proceso de Alimentación de Agua hacia calderas, en la pantalla dibujamos el Tanque Desaereador, la válvula proporcional de ingreso de vapor para el calentamiento, para poder simular las bombas colocamos un manómetro que simula cuando las bombas están encendidas, la caldera donde simulamos el consumo, la planta de Agroindustrial que es la que realiza el consumo de todo nuestro vapor, adicionalmente mostramos indicadores, un control para simular el consumo, una pantalla para graficar diferentes variables del proceso, un selector de automático o manual, una parada de emergencia y un cuadro donde mostramos las diferentes reglas utilizadas en nuestro control Fuzzy, con un led alado que indica que regla se está utilizando.

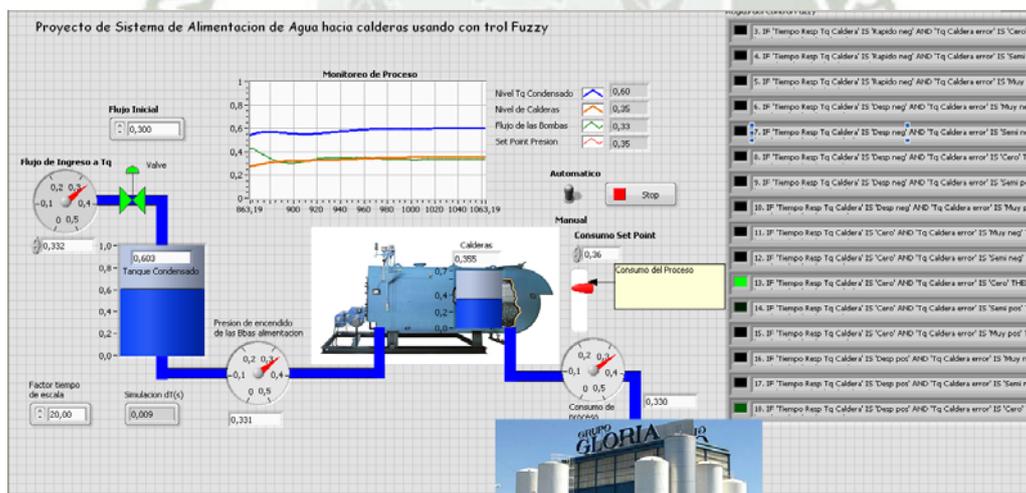


Figura 132: Panel Frontal Final Proyecto en entorno LabView

- Una vez realizado el Bloque Frontal, procedemos a trabajar con el cuadro de Diagrama de Bloques, que es donde realizamos todo nuestro control Fuzzy, interpretamos las señales de entrada, las tratamos y las mostramos en todas las salidas que simulan el resultado. En el Diagrama de Bloques hacemos llamado a nuestros bloques para el control Fuzzy, pero previas condiciones fueron configuradas de acuerdo a nuestro proceso en el siguiente paso detallare como se realizaron las reglas para este proyecto, adicionalmente todas las señales de entrada se trabajan dentro del cuadro para poder realizar la lógica y simulación, también dentro nuestro Diagrama de Bloques, realizamos una operación para simular el consumo del nivel del vapor para nuestro proceso y la configuración de las reglas que se mostraran en el Panel Frontal de nuestro proyecto.

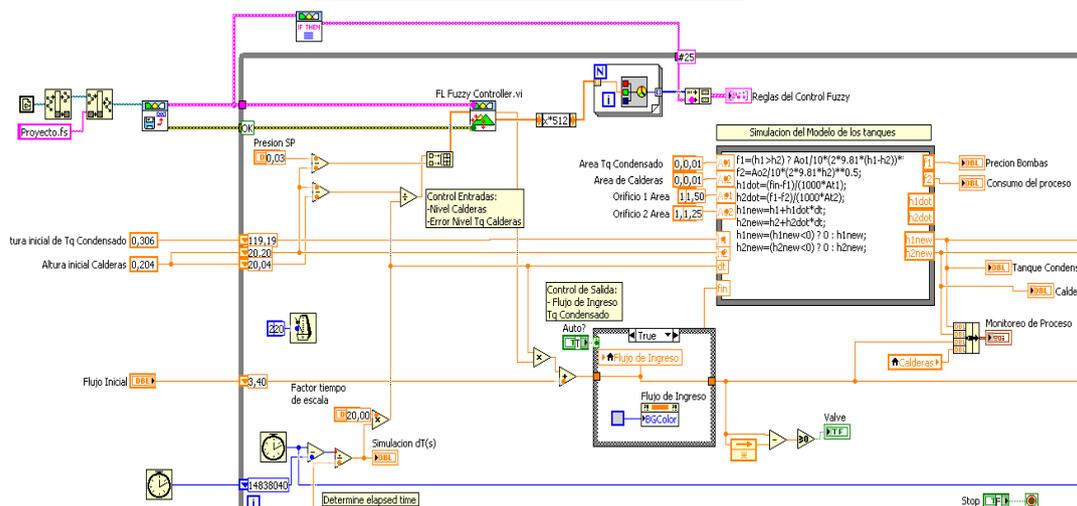


Figura 133: Diagrama de Bloque Final de nuestro Proyecto en entorno LabView

- *En este punto detallaremos la creación de nuestro Control Fuzzy, dentro de nuestro diagrama de Bloques, en la Figura 134, mostramos los primeros pasos para crear el control Fuzzy, en la pantalla de Diagrama de Bloques vamos a la opción Tools y escogemos la opción Control Design and Simulation, desglosamos la opción seleccionada y hacemos clic sobre la opción Fuzzy System Designer.*

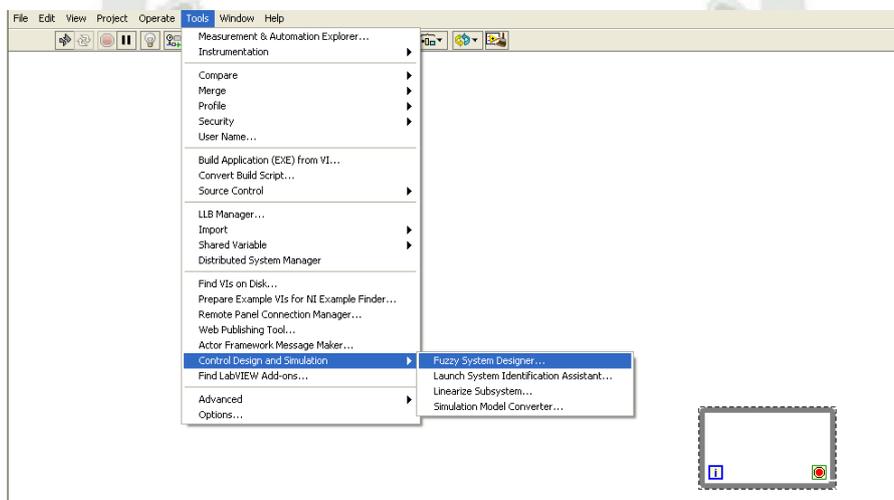


Figura 134: Fuzzy System Designer

- *Seleccionado la opción Fuzzy System Designer, nos muestra la ventana de la Figura 135, donde nosotros declaramos nuestras variables de entrada y las variables de salida, que es donde nosotros ingresamos los valores para nuestro control, adicionalmente esta misma ventana tienen las pestañas de reglas y Test del Sistema que las desarrollaremos con los valores ingresados.*

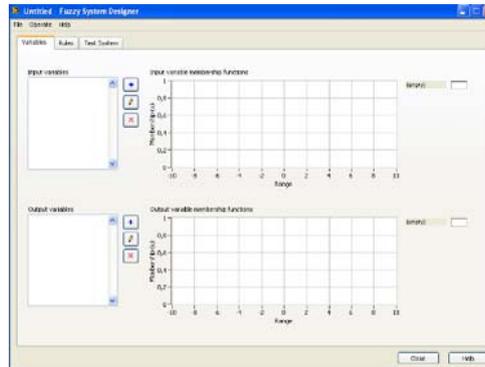


Figura 135: Fuzzy System Designer Pantalla

- *Para realizar nuestro control Fuzzy, primero tenemos que determinar nuestras variables de entrada y nuestras variables de salida. Graficaremos la función de pertenencia del control fuzzy y declaramos los límites en el membership functions, de cada valor de entrada como de salida. Como se explicó en los puntos anteriores detallaremos dos variables como señales de entrada y una salida la cual será la que actué sobre mi proceso.*
- *Para nuestro proceso de Sistema de Alimentación de Agua hacia calderas, consideramos como variables de entrada Tiempo de Respuesta Tanque Calderas, que en nuestro proyecto lo declaramos como Tiempo de Respuesta T_q Calderas y el Error de Tanque Calderas que lo definiremos como T_q Caldera Error. La salida para nuestro control fuzzy lo denominaremos Cambio de Flujo.*

Una vez definidas nuestras variables de entrada y salida, mostraremos las variables y sus reglas que se aplicarían para nuestro control, definida las reglas desarrollaremos el control en el entorno LabView, en la Tabla.21: detallaremos la regla de nuestro control.

		<i>Tiempo de Respuesta Tq Calderas</i>				
<i>Tq Caldera Error</i>		<i>Rapido Neg</i>	<i>Desp. Neg</i>	<i>Cero</i>	<i>Desp. Pos</i>	<i>Rapido Pos</i>
	<i>Muy Neg</i>	<i>No cambia</i>	<i>Sem Neg</i>	<i>Muy Neg</i>	<i>Muy Ne</i>	<i>Muy Neg</i>
	<i>Semi Neg</i>	<i>Sem Pos</i>	<i>No cambia</i>	<i>Sem Neg</i>	<i>Med Neg</i>	<i>Muy Neg</i>
	<i>Cero</i>	<i>Med Pos</i>	<i>Semi Pos</i>	<i>No cambia</i>	<i>Sem Neg</i>	<i>Med Neg</i>
	<i>Semi Pos</i>	<i>Muy Pos</i>	<i>Med Pos</i>	<i>Sem Pos</i>	<i>No Cambia</i>	<i>Sem Neg</i>
	<i>Muy Pos</i>	<i>Muy Pos</i>	<i>Muy Pos</i>	<i>Muy Pos</i>	<i>Sem Pos</i>	<i>No Cambia</i>

Tabla 21: Regla de Control Fuzy

- Como se desarrollaron las reglas para nuestro control, en el entorno LabView se realizan la declaración de las variables de entra y salida definiendo la función de pertenencia para cada variable mostrada en la tabla 20. En las siguientes figuras se muestra la gráfica para la variable de entrada Tiempo de respuesta del Tanque Calderas, se puede apreciar los rangos tomados en la funciones de pertenencia, así mismo para cada función definimos un color, para poder identificarlo. Para esta entrada se tomó como referencia el rango de -0.01 hasta 0.01 y dentro de estos valores definimos las variables *Rapido Neg*, *Des Neg*, *Cero*, *Des Pos*, *Rapido Pos*.

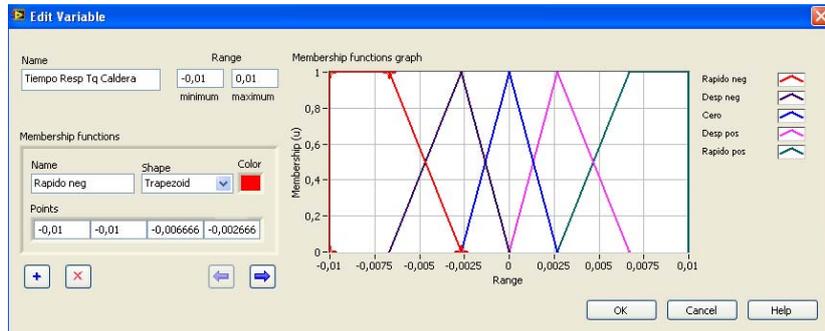


Figura 136: Función de pertenencia: Tiempo Resp Tq Calderas, Rápido Neg

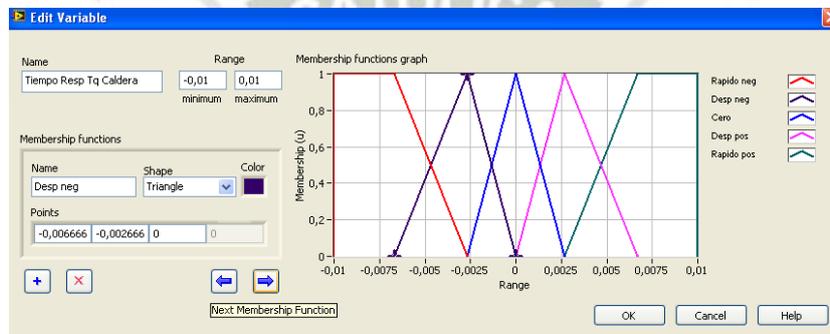


Figura 137 : Función de pertenencia: Tiempo Resp Tq Calderas, Des. Neg

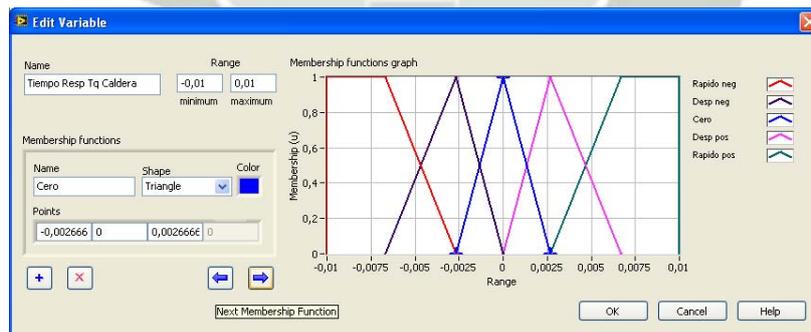


Figura 138 : Función de pertenencia: Tiempo Resp Tq Calderas, Cero

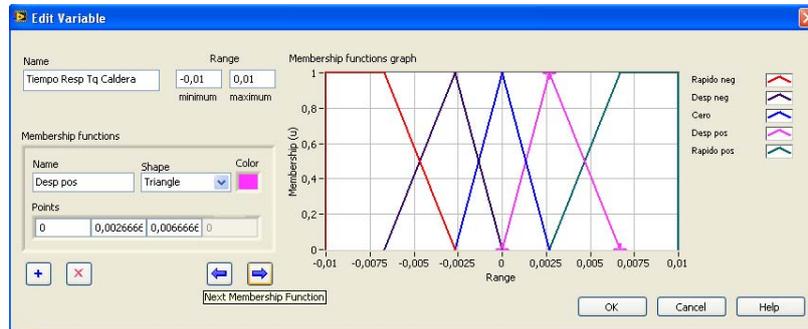


Figura 139 : Función de pertenencia: Tiempo Resp Tq Calderas, Desp Pos

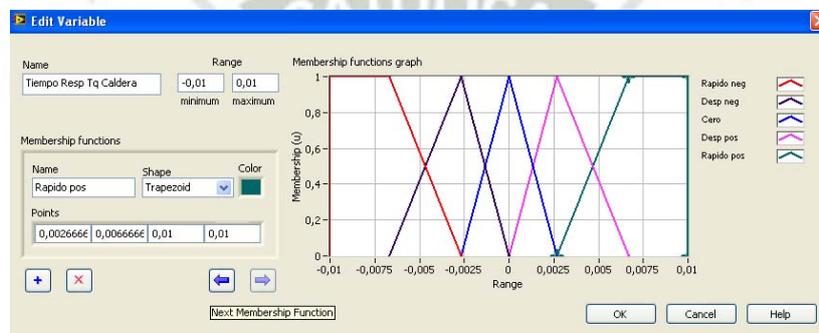


Figura 140 : Función de pertenencia: Tiempo Resp Tq Calderas, Rap. Pos

- *En las siguientes figuras se muestra la gráfica para la variable de entrada Tanque Caldera Error, se puede apreciar los rangos tomados en la funciones de pertenencia, así mismo para cada función de definimos un color el para poder identificarlo. Para esta entrada se tomó como referencia el rango de -0.5 hasta 0.5 y dentro de estos valores definimos las variables Muy Neg, Semi Neg, Cero, Semi Pos, Muy Pos.*

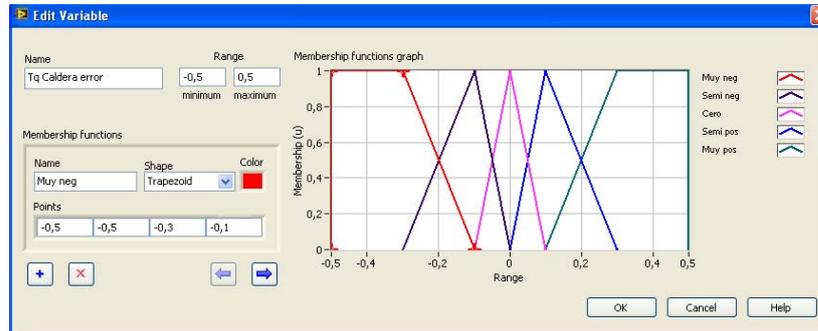


Figura 141 : Función de pertenencia: Tq Caldera Error, Muy Neg

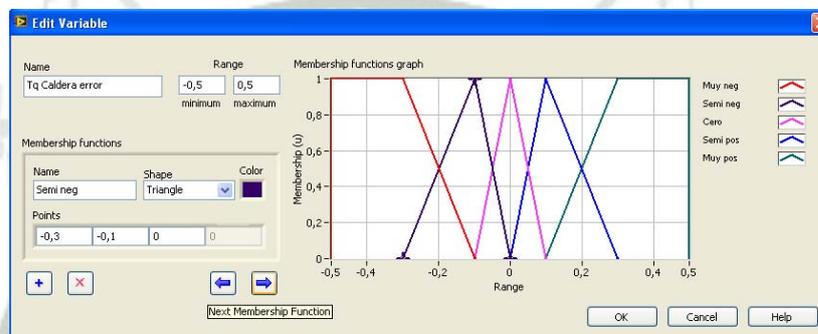


Figura 142 : Función de pertenencia: Tq Caldera Error, Semi Neg

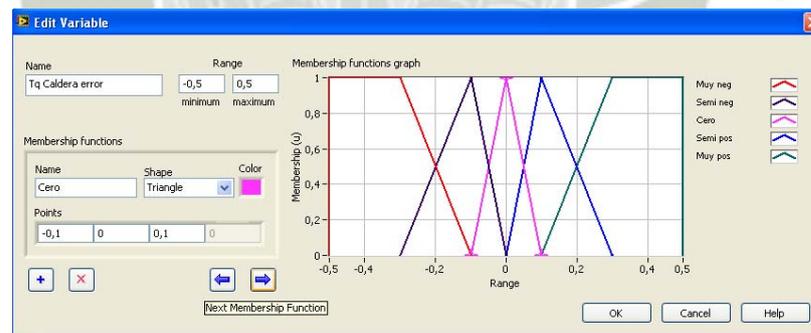


Figura 143 : Función de pertenencia: Tq Caldera Error, Cero

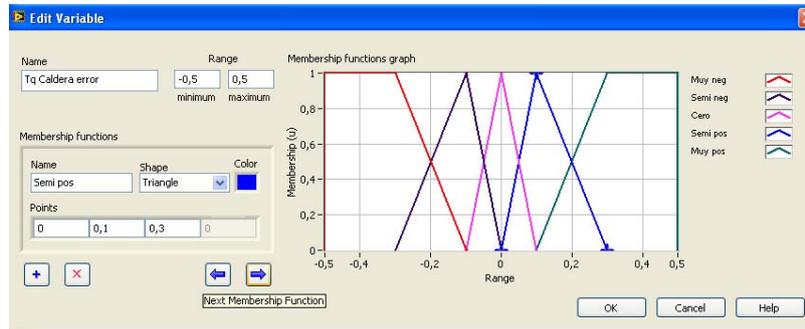


Figura 144 : Función de pertenencia: Tq Caldera Error, Semi Pos

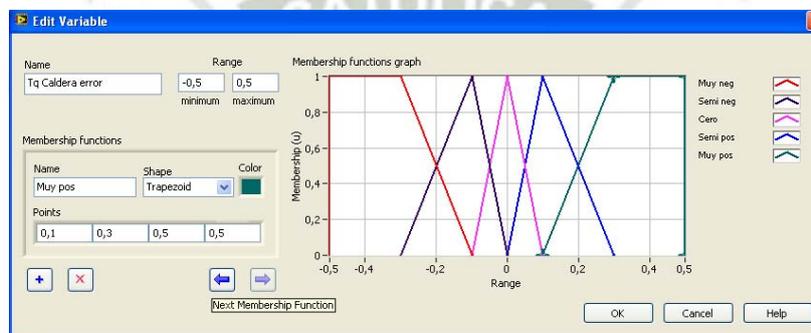


Figura 145 : Función de pertenencia: Tq Caldera Error, Muy Pos

Declaradas las dos variables al lado izquierdo de la gráfica se detalla los nombres que se le puso a cada variable y el color que se seleccionó.

- *De igual forma que se declararon la función de pertenencia para las entradas, se procede a desarrollar la función de pertenencia para las salidas. En las figuras se muestra la gráfica para la variable de salida Cambio de Flujo, se puede apreciar los rangos tomados en la funciones de pertenencia, así mismo para cada función de definimos un color el para poder identificarlo. Para la salida se tomó como referencia*

el rango de -0.05 hasta 0.05 y dentro de estos valores definimos las variables Muy Neg, Med Neg, Semi Neg, No Cambia, Semi Pos, Medio Pos y Muy Pos

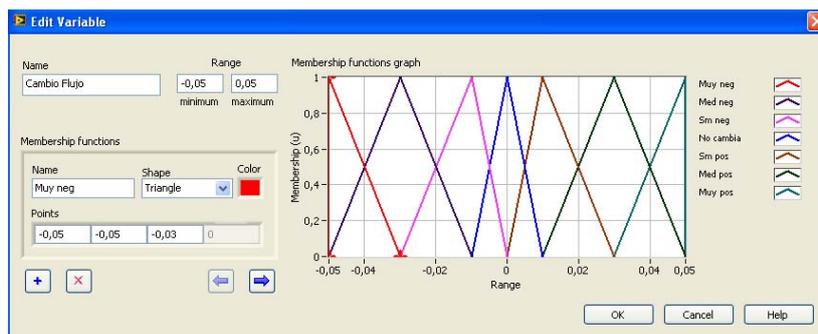


Figura 146 : Función de pertenencia: Cambio Flujo, Muy Neg

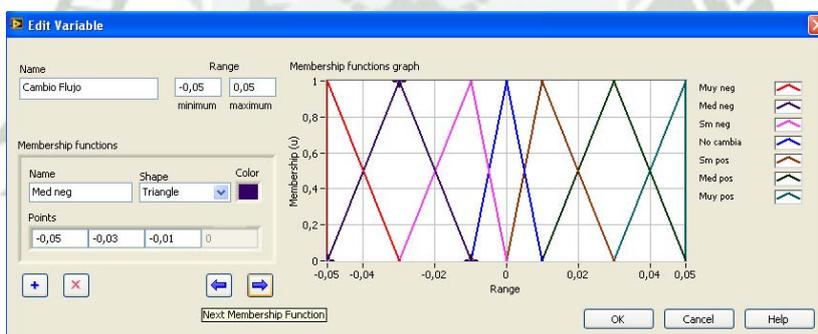


Figura 147 : Función de pertenencia: Cambio Flujo, Med Neg

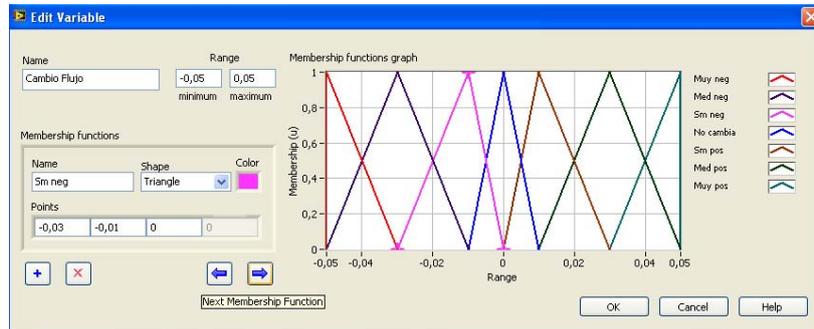


Figura 148 : Función de pertenencia: Cambio Flujo, Semi Neg

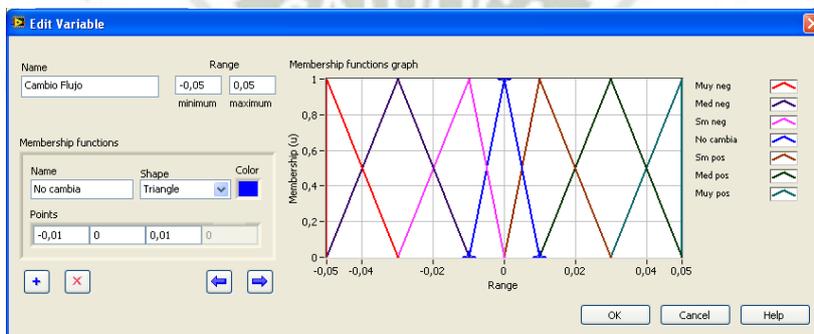


Figura 149 : Función de pertenencia: Cambio Flujo, No Cambia

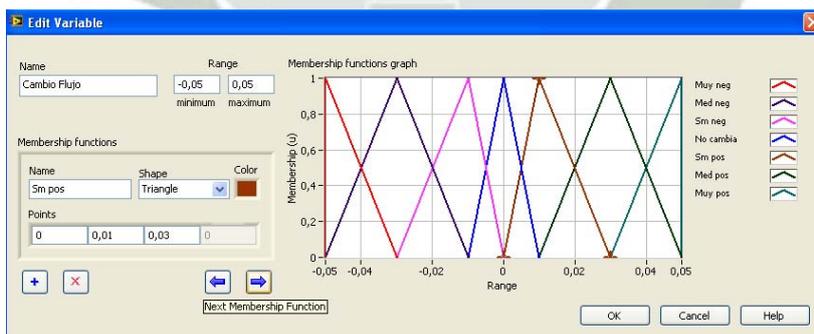


Figura 150 : Función de pertenencia: Cambio Flujo, Semi Pos

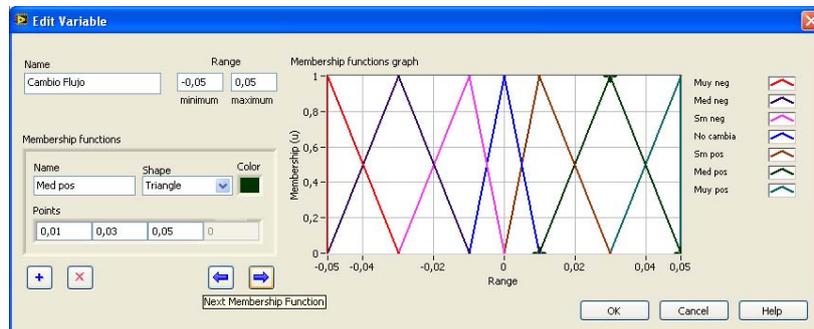


Figura 151 : Función de pertenencia: Cambio Flujo, Med Pos

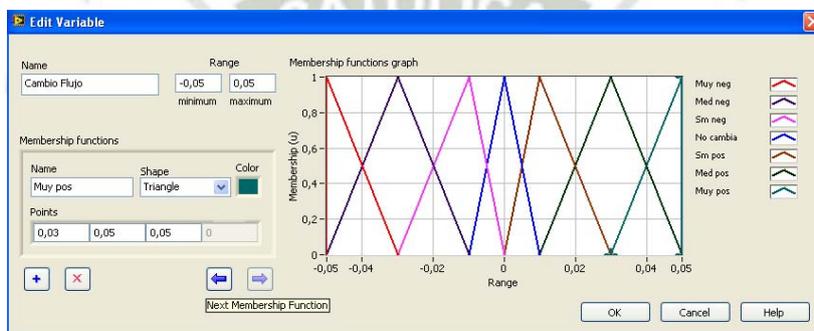


Figura 152 : Función de pertenencia: Cambio Flujo, Muy Pos

- *Una vez finalizado con la declaración de entradas y salidas, aceptamos dando clic en el botón OK y nos muestra las dos variables de entrada y la variable de salida, procedemos a guardar los datos, escogemos la opción guardar en la pestaña Archivo, para nuestro proyecto le damos el nombre de Proyecto como en la Figura 153.*

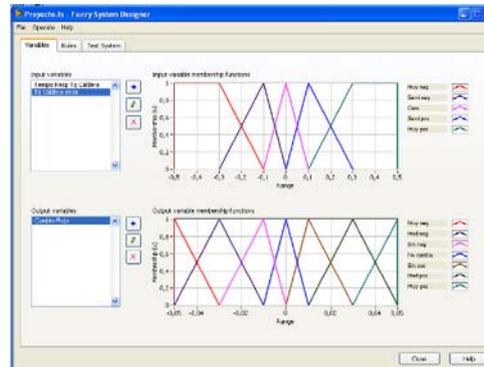
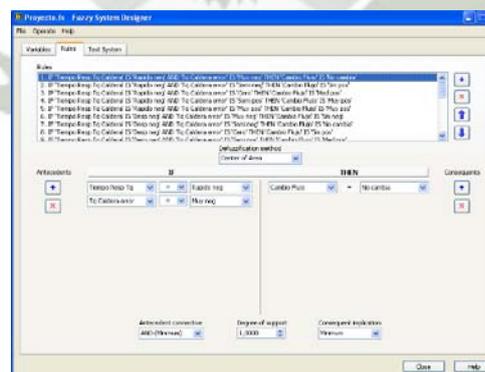


Figura 153 : Función de Pertinencia Proyecto

- *Una vez guardado nuestro proyecto vamos a la pestaña de Rules, para poder definir las reglas que se van aplicar a nuestro control Fuzzy. Definida las variables de entrada y salida se crean reglas automáticamente, pero no de acuerdo a lo establecido, tenemos que seleccionar cada una de las reglas y escoger la opción correcta de las salidas para cada opción. En la tabla 14 definimos las reglas que vamos a utilizar para nuestro control Fuzzy, en las Figura 154, mostraremos las reglas definidas en LabView.*



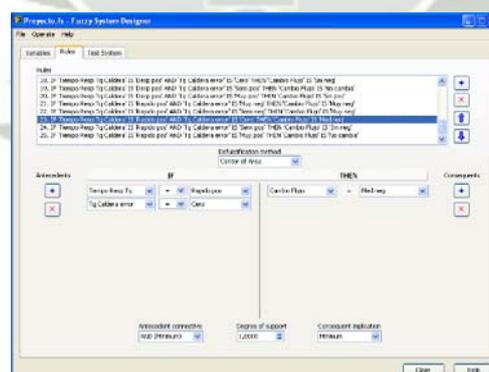
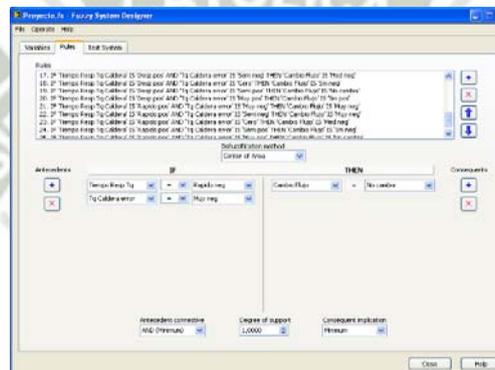
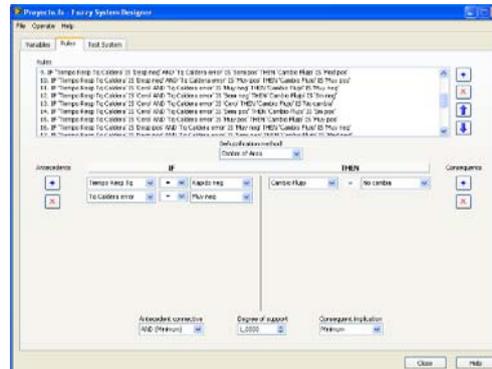


Figura 154: Regla control Fuzzy

- *Definidas las reglas, en el punto anterior nuestro control Fuzzy está ya por finalizar, para culminar y poder verificar el correcto funcionamiento de las variables declaradas, en la pestaña Test System, Verificamos las entradas y salidas adicionalmente nos muestra una gráfica, si vamos variando las entradas nos va mostrando el valor de salida y este valor se verá también en la gráfica.*

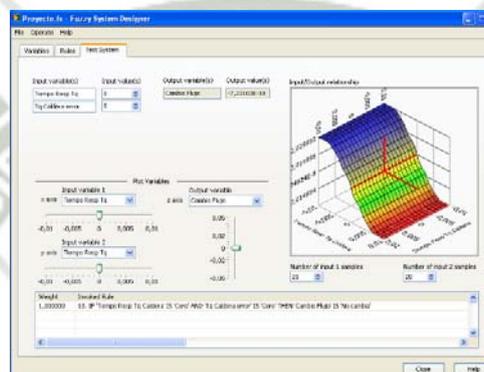


Figura 155 : Pestaña test System Control Fuzzy LabView

- *Una vez definido todas las reglas y culminado nuestro control Fuzzy, procedemos simular el proceso, en nuestro proyecto tenemos la opción de Manual para poder controlar los valores de forma manual y de forma automática, en las siguientes figuras, mostraremos la simulación de nuestro control Fuzzy para el sistema de Alimentación de Agua hacia Calderas de Agroindustrial del Perú. En cada una de la simulación podemos apreciar en la ventana de osciloscopio los valores como se van comportando durante todo nuestro proceso y también la simulación de los tanques que de acuerdo a lo consumido va variando sus niveles.*

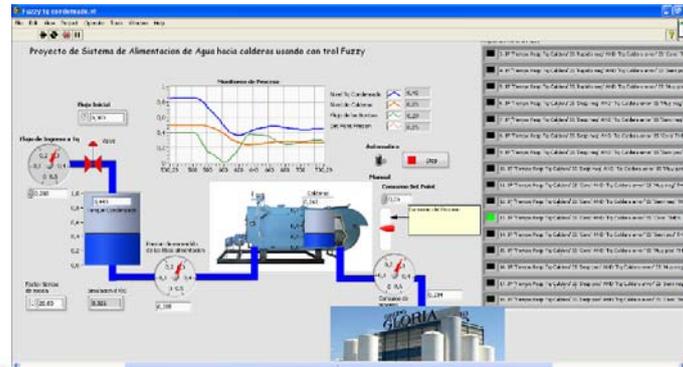


Figura 156 : Simulación 1 de Control Fuzzy LabView

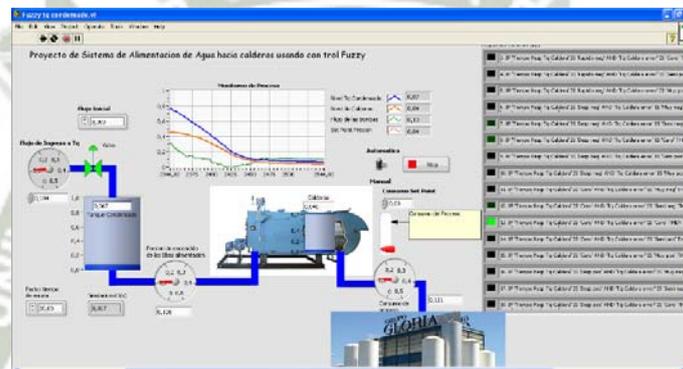


Figura 157 : Simulación 1 de Control Fuzzy LabView

Como mostramos en la simulación, el control Fuzzy en el entorno LabView, es una alternativa que tiene resultados eficientes, para poder controlar el proceso de Alimentación de Agua hacia Calderas de Agroindustrial del Perú, siempre cumpliendo las necesidades de consumo de nuestro proceso.

4.5.13 Comparación del Control PID implementado en un PLC S7-300 y Control Fuzzy implementado en el entorno LabView

EL sistema de alimentación de Agua hacia Calderas de Agroindustrial del Perú del Grupo Gloria, en este proyecto de tesis fue implementado con dos sistemas de control automático. El primero se implementó de forma física siendo un control PID, utilizando un PLC y el segundo control fue un control Fuzzy, que se implementó en el entorno LabView y se simuló en el mismo entorno, dando como resultados los siguientes.

- Para el control PID se pudo obtener de forma satisfactoria su modelo matemático, lo cual ayudó a poder implementarlo de forma exitosa.*
- La respuesta del control PID desarrollado en el sistema de alimentación de agua hacia calderas tuvo un resultado óptimo, cumpliendo así el objetivo de esta tesis.*
- Los resultados y pruebas realizadas en el PLC, con el control implementado se encuentra actualmente trabajando de forma normal y cumpliendo las necesidades de la producción de Agroindustrial del Perú.*
- Para el control Fuzzy se desarrolló en el entorno LabView, para este tipo de control se tuvo que plasmar las reglas para poder realizar el control, logrando una respuesta más rápida del sistema considerándose a este control como una alternativa más avanzada.*
- La simulación del control Fuzzy en el entorno LabView fueron exitosas, también cumpliendo lo que requerido en esta tesis.*
- El control Fuzzy y control PID cumplieron satisfactoriamente el objetivo de esta tesis.*

CONCLUSIONES

1. *Se fundamentó la elevada prioridad que presenta el uso eficiente, racional e inteligente del agua en el sector industrial, ya que cada día es un evidente el agotamiento y problemas ambientales que su utilización conlleva.*
2. *Se señaló que las calderas se encuentran entre los equipos industriales que consumen una elevada cantidad de agua, y que la misma puede incrementar notablemente su eficiencia y por ende reducir su actual consumo de agua, mediante la implementación de sistemas de control automático.*
3. *Se analizó el estado del arte de la automatización del sistema de alimentación de agua hacia calderas, concluyendo que la mayor parte de las investigaciones en este campo, así como de la implementación práctica de los resultados de dicha investigación se realiza sobre el sistema de alimentación de agua hacia calderas de Agroindustrial del Perú – Grupo Gloria. Se concluye que el desarrollo de sistemas de control automático de alimentación de agua hacia calderas constituye un tema poco abarcado y que presenta una alta importancia debido a la gran cantidad de sistemas de alimentación de agua hacia calderas que se encuentran funcionando en el sector industrial.*
4. *Mediante el uso de las técnicas de identificación de sistemas se obtuvo un modelo matemático que describe el comportamiento dinámico de la presión del sistema de alimentación de agua hacia calderas de Agroindustrial del Perú. El modelo obtenido del proceso bajo estudio presenta estructura ARMAX, de segundo orden y un retardo de tiempo de 35s. Los resultados de la validación muestran que el modelo obtenido describe con una elevada exactitud del proceso real bajo estudio, presentado un índice*

- de comportamiento de 94.65%, por lo que se considera un buen modelo para su utilización con fines de predicción y control.*
- 5. El Sistema de Alimentación de Agua hacia Calderas de Agroindustrial del Perú, fue rediseñado y se implementaron nuevos equipos, los cuales fueron seleccionados de forma que repotencien todo el sistema de alimentación de agua hacia calderas y se tenga una eficiencia mayor en rendimiento. Se modificó gran parte del sistema poniendo nuevos equipos como válvulas, sensores, tablero eléctrico, etc. Cada uno de estos equipos se seleccionó para el uso exclusivo para sistemas de alimentación de agua hacia calderas no presentando problemas al momento de funcionamiento.*
 - 6. Se desarrolló un sistema de Control PID para el Sistema de Alimentación de Agua hacia Calderas de Agroindustrial del Perú. Se implementó en un PLC S7-300 SIEMENS, programando bloques los cuales se explicaron físicamente mostrando un óptimo desempeño cumpliendo el objetivo de esta tesis, de controlar de forma automática el proceso, actualmente sigue trabajando de forma automática. Esto ayudo a facilitar el control de este proceso, evitando errores humanos que podían existir y manteniendo al sistema siempre trabajando de acuerdo a la necesidad de la planta. Se cuenta con indicadores los cuales muestran al operario de sala calderas, el estado de cada bomba y la presión que se mantiene en la línea, manejando mejor los recursos.*
 - 7. Como alternativa de control del sistema de Alimentación de Agua hacia Calderas, se implementó el control Fuzzy en el entorno LabView, el cual se simulo en el mismo entorno, obteniendo un buen resultado para poder satisfacer las necesidades de este sistema. El control Fuzzy se basó en reglas las cuales se implementaron de acuerdo a la*

- experiencia del personal que viene trabajando con este sistema por más de 10 años, siendo una alternativa perfecta al momento de considerar un control para su funcionamiento.*
- 8. Se realizó una comparación entre el sistema de control PID y control Fuzzy del proceso de alimentación de agua hacia Calderas. Se mostró el buen resultado del sistema de control PID para responder frente a variaciones en la referencia y en los parámetros del proceso. Se demostró el buen resultado del Control Fuzzy en el entorno LabView, mostrando una respuesta mucho más rápida en caso de perturbaciones del sistema, siendo esta una alternativa altamente favorable para poder controlar el Sistema de Alimentación de Agua Hacia calderas de Agroindustrial del Perú.*
 - 9. Los resultados obtenidos durante el desarrollo de las investigaciones realizadas, muestran que el diseño de sistemas de control PID y control Fuzzy para el Sistema de Alimentación de Agua hacia Calderas, constituye una herramienta muy potente dando así un funcionamiento efectivo y fiable de este sistema, así como una disminución del consumo de agua de condensado y hacer uso inteligente de este recurso. Estos resultados presentan una significativa importancia industrial para el uso racional del agua.*
 - 10. La implementación práctica de los resultados obtenidos en este proyecto de tesis implicó un gasto en la mejora de implementación del Sistema de Alimentación de Agua hacia calderas con el control PID pero mejoró en cuanto al ahorro del agua dándose mejor manejo de este recurso. En cuanto el control Fuzzy su implementación se realizó en LabView.*

RECOMENDACIONES

Dentro de un proyecto tan ambicioso como lo fue este, siempre se desea que haya una mejora continua del mismo; por lo tanto se recomienda a futuros estudiantes que tengan interés en el proyecto, uno de los puntos a mejorar son las bombas dosificadoras de químicos para que también puedan estar controladas y funcionar de forma automática de acuerdo a la calidad del agua, esto se puede realizar cambiando la bomba actual por una que se pueda controlar a través de puertos de comunicación y/o entradas analógicas que se envíen del PLC, pero para esto se tendría que tener un sensor de conductividad o Ph según sea la variable a medir y de acuerdo al valor que se necesite se pueda controlar la cantidad de químico que se enviaran a las tuberías, esto mejorar la calidad del agua que se alimenta a calderas.

La bomba de alimentación de condensado al tanque desaereador, actualmente es gobernada por el sistema central de la planta, se recomienda que esta bomba funcione de forma automática, y se priorice el tanque desaereador. Este sistema automático mejorar la disponibilidad de agua hacia calderas, evitando así la apertura de la válvula de agua fría hacia el tanque desaereador.

La tercera recomendación sería poder alegrar pantallas HMI o un Scada a todo este sistema para mejorar su uso y poder almacenar registros de los diferentes parámetros todo este proceso.

La última recomendación sería integrar todo este Automatismo de Alimentación de Agua hacia Calderas con el Scada principal de la planta de Agroindustrial del Perú, para así poder centralizar todos los controles y se gobiernen desde una misma sala de control principal.



BIBLIOGRAFIA

- Aguado A. (2000). *Identificación de Sistemas y Control Adaptable*. Editorial Academia.
- Alonso F. (1996). *La Seguridad en Calderas*, INSHT, Madrid, España.
- Aström, K.J. (1994). *PID controllers. Third Edition*, ISA, Research Triangle Park.
- Aström, K.J. (1995). *Adaptive Control. Second Edition*, Addison-Wesley, USA.
- Colectivo de autores. (1990). *Calderas de Vapor en la Industria Azucarera. Segunda*
- *Control Design*, Wiley-Interscience, USA
- *Control System Toolbox – For use with Matlab. (2002), Version 5*, The Mathworks Inc., Natick, MA.
- Driankov, D., Hellendoorn, H., Reinfrank, M., *An Introduction to Fuzzy Control*, Springer-Verlag, 1993
- Edición, compilación de artículos.
- Hellendoorn, H., Thomas, C., *Defuzzification in fuzzy controllers*, *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, Vol. 1, pp. 109-123
- Krsticacute M., Kanellakopoulos I., Kokotovic P.V. (1995). *Nonlinear and Adaptive*
- Lewis P.H., Yang P. (1999). *Sistemas de Control en Ingeniería*, Prentice-Hall, Madrid
- Ljung L. (1999). *System Identification Toolbox – For Use with Matlab, Version 5*, The Mathworks Inc., Natick, MA
- Ljung, L. (1996). *Estimating the total error from standard model validation test*. IFAC 13th Triennial World Congress, San Francisco, USA

- *Moscinski J. (1996). Advanced Control with MATLAB and SIMULINK. Prentice Hall.*
- *Rivas Pérez R., Herranz J., Llanes O., Cartaya L. (1994). Modelo Matemático Dinámico de Generadores de Vapor, Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones, Vol. XV, N° 3, 45-54.*
- *Rivas Pérez R., Prada Moraga C., Peran González J, R. (2000). Desarrollo de Sistemas de Control Avanzado para la Automatización de Procesos Industriales con Comportamiento Dinámico Difícil*
- *Simulink – Model-Based and System-Based Design. (2002), Version 5, The Mathworks Inc., Natick, MA.*
- *Söderström T., Stoica P. (1988). System Identification, Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.*
- *Sohlberg. B. (1997). Supervision and Control for Industrial Processes, Springer-Verlag Inc., New York.*

Referencias Web

- <http://docs-europe.electrocomponents.com/webdocs/00b5/0900766b800b5c39.pdf>
- http://en.wikipedia.org/wiki/Fuzzy_control_system
- http://guiaragua.com/mcy/product_info.php?products_id=8476&osCsid=6cspd5rqhek6r2j4dafato3dt0
- <http://hidrosalud.com/que-es-la-osmosis-inversa>
- <http://support.automation.siemens.com>
- http://www.aguaazulinternacional.com.mx/filtros_para_eliminar_fierro_y_manganeso_.html
- <http://www.aguas.org.mx/sitio/03b05.html>
- <http://www.ambientum.com/revistanueva/2005-09/aguas.htm>
- http://www.azud.com/tratamiento/Productos/Ficha_Tecnologia2.aspx?FrmIdTrat=3&FrmIdTech=13
- <http://www.bymisa.mx/producto/2020/2/Bombas+centrifugas+verticales+CR+grundfos.html>
- <http://www.culligan.es>
- <http://www.directindustry.es/prod/walchem/bombas-dosificadoras-productos-quimicos-30556-682551.html>
- http://www.edutecne.utn.edu.ar/fuzzy_control
- <http://www.ianas.org/water/book/peru.pdf>
- <http://www.itescam.edu.mx/principal/sylabus/fpdb/recursos/r98967.PDF>

- <http://www.lenntech.com>
- <http://www.nauticexpo.es/prod/lifestrem-watersystems.html>
- http://www.ni.com/gate/gb/GB_EVALLV/ESA
- <http://www.sotermic.cl/valvulas-vapor-trampas/equipamiento-para-vapor/desgasificador-desaireador/>
- <http://www.spiraxsarco.com/mx/applications/examples/boiler-house/feedtanks/boiler-feedtank-and-associated-control-systems.asp>
- <http://www.tecnosan.com.br/esp/prod15.php>
- http://www.wwfca.org/nuestro_trabajo/agua_dulce/uso_del_agua_en_la_industria/



Anexos 1

En el presente anexo se incorpora el programa desarrollado en el programa Step7 de Siemens, para este proyecto de tesis, mostraremos la descripción del programa.

Nombre del Programa	Descripción o Finalidad del Programa
<i>Fernandito</i>	<i>Programa desarrollado para control PID de las bombas de alimentación de Agua hacia Calderas de Agroindustrial del Perú.</i>

El código de este programa se encuentra en formato electrónico, anexo a la presente tesis, para poderlo ejecutar se necesita el software Step 7 de Siemens.

Anexos 2

En el presente anexo se incorpora el programa desarrollado en el programa LabView de National Instrument, para este proyecto de tesis, mostraremos la descripción del programa.

Nombre del Programa	Descripción o Finalidad del Programa
<i>Fuzzy tq Condensado</i>	<i>Programa desarrollado para simular el control Fuzzy de las bombas de alimentación de Agua hacia Calderas de Agroindustrial del Perú.</i>
<i>Proyecto</i>	<i>Es el archivo donde se declaró las reglas y parámetros del control Fuzzy, este archivo debe estar en la misma carpeta del programa principal para que corra correctamente el programa.</i>

El código de este programa se encuentra en formato electrónico, anexado a la presente tesis, para poderlo ejecutar se necesita el LabView 2013.

Anexos 3

En el presente anexo se incorpora los planos eléctricos que se diseñaron para el armado del tablero eléctrico que se implementó en Agroindustrial del Perú, para el proyecto de tesis, mostraremos la descripción del programa.

Nombre del Programa	Descripción o Finalidad del Programa
<i>Input_Digit_PLCS7300-1</i>	<i>Plano de la distribución de las conexiones de las entradas digitales, del PLC S7-300 SIEMENS.</i>
<i>Input_Analog_PLCS7-300</i>	<i>Plano de la distribución de las conexiones de las entradas analógicas, del PLC S7-300 SIEMENS.</i>
<i>Output_Analog_PLCS7300-1</i>	<i>Plano de la distribución de las conexiones del primero bloque de salidas analógicas, del PLC S7-300 SIEMENS.</i>
<i>Output_Analog_PLCS7300-2</i>	<i>Plano de la distribución de las conexiones del segundo bloque de salidas analógicas, del PLC S7-300 SIEMENS.</i>
<i>Señal_Imput_PLCS7-300</i>	<i>El plano eléctrico, muestra las conexiones eléctricas de los componentes que actúan en las entradas digitales</i>
<i>Diagram_Cont_Actuadores-1</i>	<i>El plano eléctrico, muestra las conexiones</i>

	<i>de los diferentes actuadores que actúan en nuestro proceso como son pulsadores, relés auxiliares, etc.</i>
<i>Diagram_Cont_Actuadores-2</i>	<i>El plano eléctrico, muestra las conexiones de los diferentes actuadores que actúan en nuestro proceso como son pulsadores, relés auxiliares,, parada de emergencia, etc.</i>
<i>Diagrama_Control_Motores</i>	<i>Este plano eléctrico, muestra el diagrama de conexión de los contactores y lámparas que actúan cuando funcionan los motores.</i>
<i>Activacion_Reles_Control</i>	<i>Este plano eléctrico, muestra las conexiones de los relés auxiliares utilizados para el control de los contactores, alarmas, etc.</i>
<i>Diagrama_Fuerza_Motores</i>	<i>Este plano muestra la línea de fuerza de conexión de los equipos que actúan para el funcionamiento de los motores.</i>

El código de este programa se encuentra en formato electrónico, anexo a la presente tesis.