

# **Universidad Nacional de Ingeniería**

## **Facultad de Ingeniería Eléctrica y electrónica**



TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

### **Dimensionamiento e implementación de sistema automático para el secado de papel mediante vapor saturado**

Para obtener el Título Profesional de Ingeniero Electrónico

Elaborado por

Pedro Lenin Castellano Michue

 [0009-0002-3654-9188](#)

Asesor

Mg. Ing. Mauricio Pedro Galvez Legua

 [0000-0002-4845-4218](#)

LIMA – PERÚ

2025

---

Citar/How to cite	Castellano Michue [1]
Referencia/Reference	[1] P. Castellano Michue, “ <i>Dimensionamiento e implementación de un sistema automático para el secado de papel mediante vapor saturado</i> ” [Trabajo de suficiencia profesional]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2025.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

---

---

Citar/How to cite	(Castellano, 2025)
Referencia/Reference	Castellano, P. (2025). <i>Dimensionamiento e implementación de un sistema automático para el secado de papel mediante vapor saturado</i> . [Trabajo de suficiencia profesional, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

---

***Dedicatoria***

*A Atenea, mis padres, mis hermanas, y Jesse que brilla desde el cielo.*

## **Agradecimientos**

Al Ingeniero Mauricio Galvez, por no ser solo un asesor, sino un guía para poder culminar este trabajo.

## Resumen

El área de fabricación de una máquina papelera, alineada con las nuevas condiciones de operación, requiere mejorar el proceso de secado con vapor saturado en máquina papelera principal, ubicada en Lima - Perú. Por ello se propone el dimensionamiento e implementación de un nuevo sistema automático para el secado mediante vapor saturado en la máquina papelera, el cual se alimenta mediante un caldero pirotubular. Para incrementar la velocidad máxima de máquina de 1950 m/min a 2100 m/min, el sistema de secado dispone de un nuevo cilindro secador de gran tamaño denominado *yankee*, en el que se almacena el vapor saturado a una presión y temperatura determinadas, su función consiste en la transferencia de calor hacia el papel. Para controlar las variables de presión y temperatura, se instala el sistema de instrumentación, gobernado por el sistema de control DCS (*Distributed Control System*). Concluida la puesta en marcha, se concluye que la nueva máquina papelera puede trabajar a velocidades de hasta 2100 m/min, con valores estables para el secado de papel, y con disminución de las pérdidas asociadas al secado por vapor.

Palabras clave — Sistema automatizado, DCS, PLC, SCADA, estación de operación, estación de ingeniería, caldero pirotubular, máquina papelera, *yankee*, secado a vapor, vapor saturado, vapor *flash*, instrumentación de campo.

## **Abstract**

The manufacturing area of the paper machine, aligned with the new operating conditions, requires improving the drying process with saturated steam in his new paper machine, located in Lima - Perú. For this purpose, the sizing and implementation of a new automatic system for drying using saturated steam in the paper machine is proposed, which is fed by a fire-tube boiler. To increase the maximum machine speed from 1950 m/min to 2100 m/min, the drying system has a new large-sized drying cylinder called Yankee, in which the saturated steam is stored at a certain pressure and temperature, its function consists of the transfer of heat to the paper. To control the pressure and temperature variables, the instrumentation system is installed, governed by the DCS (Distributed Control System) control system. Once start-up is complete, they work at speeds of up to 2100 m/min, with stable values for paper drying, and with a reduction in losses associated with steam drying.

**Keywords** — Automated system, DCS, PLC, SCADA, operation station, engineering station, fire tube boiler, paper machine, yankee, steam drying, saturated steam, flash steam, field instrumentation.

## Tabla de Contenido

	Pág.
<i>Resumen</i> .....	v
<i>Abstract</i> .....	vi
<i>Introducción</i> .....	xx
<i>Capítulo I. Parte introductoria del trabajo</i> .....	1
1.1 Generalidades.....	1
1.2 Descripción del problema .....	2
1.2.1 Situación problemática .....	2
1.2.2 Problema a resolver .....	3
1.3 Objetivos del trabajo.....	3
1.3.1 Objetivo global .....	3
1.3.2 Objetivos específicos .....	3
1.3.3 Indicadores de cumplimiento de objetivos .....	4
1.4 Antecedentes investigativos .....	4
<i>Capítulo II. Marco teórico y conceptual</i> .....	8
2.1 Marco teórico .....	8
2.1.1 Automatización en la industria.....	8
2.1.2 Control industrial .....	10
2.1.3 Comparación entre control y automatización industrial.....	12
2.1.4 Automatización y control industrial por computadora.....	14
2.1.5 Controlador lógico programable PLC.....	18
2.1.6 Sistema de control distribuido DCS .....	21
2.1.7 Supervisión, control y adquisición de datos SCADA.....	24
2.1.8 Redes industriales.....	26
2.1.9 Instrumentación industrial.....	30
2.1.10 Control proporcional integral y derivativo PID .....	39
2.2 Marco conceptual .....	45

2.2.1 Máquina papelera.....	45
2.2.2 Caldero pirotubular.....	49
2.2.3 Tanque desaireador .....	53
2.2.4 Cilindro secador o yankee .....	56
2.2.5 Sistema de secado por vapor en máquina papelera.....	58
2.2.6 Instrumentación en sistema de secado por vapor.....	63
<i>Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación .....</i>	75
3.1 Análisis del problema y toma de datos .....	75
3.2 Dimensionamiento de la solución propuesta .....	75
3.2.1 Especificaciones técnicas de equipos actuales .....	76
3.2.2 Cálculos para la simulación propuesta .....	81
3.2.3 Especificaciones técnicas del fabricante .....	88
3.3 Elaboración de especificaciones técnicas y selección de equipos.....	91
3.3.1 Elaboración de especificaciones y selección del sistema de instrumentación .....	91
3.3.2 Elaboración de especificaciones y selección del sistema de control.....	102
3.4 Instalación, precomisionamiento, comisionamiento y puesta en marcha ...	108
3.4.1 Instalación y montaje de equipos .....	108
3.4.2 Precomisionamiento de equipos.....	119
3.4.3 Comisionamiento de equipos y puesta en marcha .....	135
3.5 Validación de la solución propuesta y toma de datos .....	143
<i>Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados .....</i>	149
4.1 Cumplimiento del primer objetivo específico.....	149
4.2 Cumplimiento del segundo objetivo específico .....	149
4.3 Cumplimiento del tercer objetivo específico.....	150
<i>Conclusiones .....</i>	151
<i>Recomendaciones .....</i>	152
<i>Referencias bibliográficas .....</i>	153

## **Lista de Tablas**

Pág.

<b>Tabla 1</b> <i>Indicadores de cumplimiento de objetivos.....</i>	4
---------------------------------------------------------------------	---

## Lista de Figuras

<b>Figura 1</b>	<i>Imagen arból de pérdidas de la máquina papelera.</i> .....	2
<b>Figura 2</b>	<i>Costos en el proceso de producción de papel, antes y luego de la implementación de mejora.</i> .....	5
<b>Figura 3</b>	<i>Costos en el proceso de producción de papel, antes y luego de la implementación de mejora.</i> .....	6
<b>Figura 4</b>	<i>Gráfica de perfil de humedad en el papel para diferentes condiciones de operación.</i> .....	7
<b>Figura 5</b>	<i>Fotografía de máquinas utilizadas en la automatización industrial.</i> .....	9
<b>Figura 6</b>	<i>Imagen elementos básicos de un sistema automatizado.</i> .....	9
<b>Figura 7</b>	<i>Imagen lazo de sistema de control.</i> .....	10
<b>Figura 8</b>	<i>Imagen elementos de sistema de control con lazo abierto.</i> .....	11
<b>Figura 9</b>	<i>Imagen elementos de sistema de control con lazo cerrado.</i> .....	12
<b>Figura 10</b>	<i>Imagen de dispositivos que componen un sistema industrial.</i> .....	13
<b>Figura 11</b>	<i>Imagen de sistema de control automático de nivel en un tanque.</i> .....	14
<b>Figura 12</b>	<i>Imagen de sistemas utilizados en la automatización y control industrial.</i> ...	16
<b>Figura 13</b>	<i>Imagen del CIM integrando todos los niveles de producción industrial.</i> ....	18
<b>Figura 14</b>	<i>Imagen de PLC modular basado en rack.</i> .....	19
<b>Figura 15</b>	<i>Representación esquemática del PLC.</i> .....	21
<b>Figura 16</b>	<i>Arquitectura de sistema de control distribuido.</i> .....	22
<b>Figura 17</b>	<i>Imagen de pantalla operativa de sistema de control distribuido.</i> .....	23
<b>Figura 18</b>	<i>Diagrama de bloques del control supervisor.</i> .....	24
<b>Figura 19</b>	<i>Arquitectura de un sistema de control SCADA.</i> .....	25
<b>Figura 20</b>	<i>Imagen de comunicación punto a punto en una red industrial.</i> .....	27

<b>Figura 21</b>	<i>Imagen de comunicación multipunto del tipo online.....</i>	28
<b>Figura 22</b>	<i>Imagen de niveles de arquitectura en redes industriales. ....</i>	30
<b>Figura 23</b>	<i>Imagen de la clasificación de la instrumentación industrial.....</i>	33
<b>Figura 24</b>	<i>Imagen instrumentos ciegos.....</i>	33
<b>Figura 25</b>	<i>Imagen instrumentos indicadores.....</i>	34
<b>Figura 26</b>	<i>Imagen instrumentos registradores. ....</i>	34
<b>Figura 27</b>	<i>Imagen sensores o elementos primarios. ....</i>	35
<b>Figura 28</b>	<i>Imagen transmisores. ....</i>	35
<b>Figura 29</b>	<i>Imagen transductor de potencia eléctrica. ....</i>	36
<b>Figura 30</b>	<i>Imagen convertidor de corriente a presión.....</i>	36
<b>Figura 31</b>	<i>Imagen controladores.....</i>	37
<b>Figura 32</b>	<i>Imagen actuadores o elementos finales de control. ....</i>	38
<b>Figura 33</b>	<i>PI&amp;D Instrumentación de campo y de panel. ....</i>	39
<b>Figura 34</b>	<i>Diagrama de la acción del controlador proporcional (ganancia = 1). ....</i>	40
<b>Figura 35</b>	<i>Diagrama del efecto del offset en el control proporcional. ....</i>	41
<b>Figura 36</b>	<i>Diagrama de la respuesta del controlador PI a un cambio de consigna.....</i>	41
<b>Figura 37</b>	<i>Diagrama del efecto de saturación en un controlador integral. ....</i>	42
<b>Figura 38</b>	<i>Diagrama del efecto del control proporcional y derivativo. ....</i>	43
<b>Figura 39</b>	<i>Imagen de la acción derivativa excesiva con oscilaciones en la salida del controlador. ....</i>	44
<b>Figura 40</b>	<i>Diagrama de la acción proporcional, integral y derivativa en un controlador. ....</i>	45
<b>Figura 41</b>	<i>Flujo de los procesos productivos en máquina papelera. ....</i>	46
<b>Figura 42</b>	<i>Fotografia del cilindro secador Yankee de la empresa Toscotec. ....</i>	48

<b>Figura 43</b>	<i>Fotografía de la capota o “Yankee Hood” de la empresa Fomat.....</i>	48
<b>Figura 44</b>	<i>Imagen de máquina papelera fabricada por la empresa Recard.....</i>	49
<b>Figura 45</b>	<i>Imagen de caldero pirotubular de la marca Johnson Controls. ....</i>	50
<b>Figura 46</b>	<i>Fotografía del flue de una caldera pirotubular de la marca Energypack. ....</i>	51
<b>Figura 47</b>	<i>Imagen de partes de una caldera pirotubular de la marca Johnson Controls.....</i>	53
<b>Figura 48</b>	<i>Imagen de estructura de tanque desaireador tipo bandeja. ....</i>	54
<b>Figura 49</b>	<i>Imagen de estructura de tanque desaireador tipo rociador. ....</i>	55
<b>Figura 50</b>	<i>Fotografía de tanque desaireador de la marca Hurst.....</i>	55
<b>Figura 51</b>	<i>Imagen de la ubicación de las cuchillas en el yankee para el proceso de crepeado. ....</i>	56
<b>Figura 52</b>	<i>Imagen de partes del cilindro secador yankee.....</i>	57
<b>Figura 53</b>	<i>Fotografía de cilindro secador de la marca Andritz.....</i>	58
<b>Figura 54</b>	<i>Diagrama PI&amp;D del sistema de secador por vapor en máquina papelera. ...</i>	58
<b>Figura 55</b>	<i>Imagen de partes y componentes del termocompresor. ....</i>	59
<b>Figura 56</b>	<i>Diagrama del efecto del incremento de velocidad de extracción del condensado.....</i>	60
<b>Figura 57</b>	<i>Diagrama control de nivel en tanque flash.....</i>	61
<b>Figura 58</b>	<i>Diagrama control de presión, nivel y de velocidad en sistema de secado por vapor.....</i>	62
<b>Figura 59</b>	<i>Imagen del principio de medición de presión en un transmisor del tipo diafragma. ....</i>	64
<b>Figura 60</b>	<i>Imagen del principio de medición de nivel en un transmisor de presión hidrostática.....</i>	65

<b>Figura 61</b>	<i>Imagen principio de medición nivel en un transmisor de presión diferencial.</i>	65
<b>Figura 62</b>	<i>Imagen de tipos de cableado en los sensores de temperatura del tipo RTD.</i>	67
<b>Figura 63</b>	<i>Imagen de tipos de termopares o termocuplas según rango de medición.</i>	67
<b>Figura 64</b>	<i>Imagen de componentes de un transmisor de temperatura.</i>	68
<b>Figura 65</b>	<i>Imagen del principio de medición del caudalímetro del tipo vórtex.</i>	69
<b>Figura 66</b>	<i>Diagrama del principio de funcionamiento del termocompresor.</i>	69
<b>Figura 67</b>	<i>Diagrama del actuador del tipo diafragma de acción directa y acción inversa.</i>	70
<b>Figura 68</b>	<i>Imagen de actuador neumático del tipo cilindro para válvulas de control.</i>	71
<b>Figura 69</b>	<i>Imagen de componentes internos para un posicionador de válvula de control.</i>	73
<b>Figura 70</b>	<i>Algoritmo de control de un posicionador electrónico.</i>	74
<b>Figura 71</b>	<i>Fotografía de caldera pirotubular de la marca Cleaver Brooks.</i>	76
<b>Figura 72</b>	<i>Especificaciones técnicas de caldera.</i>	77
<b>Figura 73</b>	<i>Fotografía del tanque desaireador de la marca Hurst.</i>	78
<b>Figura 74</b>	<i>Especificaciones técnicas del tanque desaireador.</i>	78
<b>Figura 75</b>	<i>Fotografía del yankee actual de la máquina papelera.</i>	79
<b>Figura 76</b>	<i>Especificaciones técnicas del yankee actual de la máquina papelera.</i>	79
<b>Figura 77</b>	<i>Fotografía del tanque separador de condensado.</i>	80
<b>Figura 78</b>	<i>Especificaciones técnicas del tanque separador de condensado.</i>	80
<b>Figura 79</b>	<i>Especificaciones técnicas de la tubería, presiones y flujo del condensado.</i>	81
<b>Figura 80</b>	<i>Parámetros para el cálculo de velocidad de condensado.</i>	82

<b>Figura 81</b>	<i>Propiedades termodinámicas de agua a una presión de 6.7 bar.</i>	82
<b>Figura 82</b>	<i>Propiedades termodinámicas de agua a una presión de 0.35 bar.</i>	82
<b>Figura 83</b>	<i>Entalpía agua saturada y el vapor saturado a diferentes presiones.</i>	83
<b>Figura 84</b>	<i>Diagrama de curvas características de vapor flash y descarga de condensado.</i>	84
<b>Figura 85</b>	<i>Diagrama de curvas características para el dimensionamiento de tuberías para flujos de descarga.</i>	85
<b>Figura 86</b>	<i>Diagrama isométrico utilizando el software Pipe Flow.</i>	86
<b>Figura 87</b>	<i>Imagen del resultado del software Pipe Flow para carga de condensado</i>	87
<b>Figura 88</b>	<i>Resultados del Software Pipe Flow para las caídas de presión.</i>	87
<b>Figura 89</b>	<i>Especificaciones técnicas del nuevo yankee.</i>	88
<b>Figura 90</b>	<i>Especificaciones técnicas del nuevo tanque separador de condensado.</i>	89
<b>Figura 91</b>	<i>Diagrama PI&amp;D del nuevo yankee y tanque separador de condensado.</i>	90
<b>Figura 92</b>	<i>Resultados del Software Pipe Flow para los nuevos flujos de trabajo.</i>	90
<b>Figura 93</b>	<i>Imagen de transmisor de presión Marca ABB Modelo 266HSH.</i>	92
<b>Figura 94</b>	<i>Cuadro comparativo para los transmisores de presión tipo diafragma.</i>	93
<b>Figura 95</b>	<i>Imagen de transmisor de temperatura Marca Endress &amp; Hauser Modelo TR10.</i>	94
<b>Figura 96</b>	<i>Cuadro comparativo para los transmisores de temperatura tipo RTD.</i>	94
<b>Figura 97</b>	<i>Imagen de transmisor de flujo Marca Yokogawa Modelo VY DN100.</i>	96
<b>Figura 98</b>	<i>Cuadro comparativo para los transmisores de flujo del tipo vórtex.</i>	96
<b>Figura 99</b>	<i>Imagen de transmisor de presión diferencial Marca ABB Modelo 265DS.</i>	98
<b>Figura 100</b>	<i>Cuadro comparativo para los transmisores de presión diferencial del tipo diafragma.</i>	98

<b>Figura 101</b> Cuadro comparativo para las válvulas de bola segmentada y actuadores neumáticos.....	100
<b>Figura 102</b> Cuadro comparativo para los posicionadores de las válvulas de control. ..	100
<b>Figura 103</b> Imagen de válvula Modelo V- port, Actuador Serie RA, Posicionador ND9000 de la marca Neles. ....	100
<b>Figura 104</b> Imagen del termocompresor de la Marca Korting Modelo 22-0150-114-R1, con actuador Marca Samson Modelo 3277, y posicionador Marca Samson Modelo 3730-1. ....	102
<b>Figura 105</b> Cuadro comparativo de los controladores de los sistemas DCS.....	103
<b>Figura 106</b> Cuadro comparativo del sistema de adquisición de datos de los sistemas DCS. ....	103
<b>Figura 107</b> Cuadro comparativo de los CPUs de los controladores S7-400. ....	104
<b>Figura 108</b> Imagen de controlador S7-400 con CPU-314 para el DCS Siemens PCS7. ....	104
<b>Figura 109</b> Imagen de lenguaje de programación interconexión de bloques CFC del PCS7.....	105
<b>Figura 110</b> Imagen de lenguaje de programación secuencial SFC del PCS7.....	105
<b>Figura 111</b> Imagen de software WINCC como interfaz de operación del sistema PCS7.....	106
<b>Figura 112</b> Imagen de función de tendencia en variables de procesos Software WINCC – PCS7.....	107
<b>Figura 113</b> Imagen de función de lista de alarmas Software WINCC – PCS7 .....	107
<b>Figura 114</b> Fotografía de la desconexión de la parte delantera, sistema de bobinado.	109
<b>Figura 115</b> Fotografía del izaje y desconexión de la capota. ....	109
<b>Figura 116</b> Fotografía del retiro del yankee actual por la parte delantera. ....	110

<b>Figura 117</b> Fotografía del retiro de la instrumentación actual del sistema de vapor.....	111
<b>Figura 118</b> Fotografía de la llegada del yankee desde Europa al puerto de Pisco.....	112
<b>Figura 119</b> Fotografía del izaje y montaje del nuevo yankee en la máquina.....	113
<b>Figura 120</b> Fotografía del izaje y montaje de la capota con el nuevo yankee en la máquina.....	113
<b>Figura 121</b> Fotografía del montaje de tanque separador de condensado.....	114
<b>Figura 122</b> Especificaciones técnicas de la actualización de los instrumentos del sistema de vapor.....	115
<b>Figura 123</b> Fotografía de la validación de los instrumentos llegados según especificaciones técnicas.....	116
<b>Figura 124</b> Fotografía del montaje e instalación de nuevos instrumentos del sistema de vapor.....	116
<b>Figura 125</b> Arquitectura de comunicación ES y OS del sistema PCS7.....	118
<b>Figura 126</b> .....Fotografía del proceso de respaldo a workstation y software PCS7 V7.1.....	118
<b>Figura 127</b> Fotografía de la actualización de workstation y software PCS7 a sala de control.....	119
<b>Figura 128</b> Fotografía de la validación del respaldo de hardware en software PCS7 V9.0.....	120
<b>Figura 129</b> Fotografía de la validación del respaldo de bloques lógicos en software PCS7 V9.0.....	120
<b>Figura 130</b> Diagrama de secuencia de bloque lógico para la secuencia de aproximación.....	121
<b>Figura 131</b> Fotografía de la validación en el software PCS7 de la secuencia de aproximación.....	122

<b>Figura 132</b> Plano de la red Profibus DP de los DCS en la máquina.	122
<b>Figura 133</b> Fotografía de la validación de las conexiones entre los controladores y los dispositivos de campo.	123
<b>Figura 134</b> Protocolo de precomisionamiento sistema DCS Siemens PCS7.	123
<b>Figura 135</b> Fotografía del precomisionamiento de los controladores del sistema DCS Siemens PCS7.	124
<b>Figura 136</b> Fotografía de la configuración con handheld del instrumento de presión PT01.	125
<b>Figura 137</b> Protocolo de precomisionamiento del lazo de instrumentación de presión PT01.	126
<b>Figura 138</b> Diagrama de la lógica del sistema de control lazo PIC04 en la máquina.	127
<b>Figura 139</b> Fotografía de la configuración con handheld del instrumento de presión PIC04.	128
<b>Figura 140</b> Protocolo de precomisionamiento del lazo de instrumentación de presión PIC04.	128
<b>Figura 141</b> Fotografía de la configuración con handheld del instrumento de flujo VIC05.	130
<b>Figura 142</b> Protocolo de precomisionamiento del lazo de instrumentación de flujo VIC05.	130
<b>Figura 143</b> Fotografía de la configuración con handheld del instrumento de nivel LIC06.	132
<b>Figura 144</b> Protocolo de precomisionamiento del lazo de instrumentación de nivel LIC06.	133
<b>Figura 145</b> Protocolo de precomisionamiento del lazo de instrumentación de presión DPT007.	134

<b>Figura 146</b> Fotografía de la configuración con handheld del instrumento de presión DPT007.....	134
<b>Figura 147</b> Protocolo de puesta en marcha: Modo Seguro.....	136
<b>Figura 148</b> Protocolo de puesta en marcha: Modo Calentamiento. ....	137
<b>Figura 149</b> Protocolo de puesta en marcha: Modo Cortadura. ....	138
<b>Figura 150</b> Protocolo de puesta en marcha: Modo Operación a 1300 m/min. ....	139
<b>Figura 151</b> Protocolo de puesta en marcha: Modo Operación a 1400 m/min. ....	139
<b>Figura 152</b> Protocolo de puesta en marcha: Modo Operación a 1500 m/min. ....	140
<b>Figura 153</b> Protocolo de puesta en marcha: Modo Operación a 1600 m/min. ....	140
<b>Figura 154</b> Protocolo de puesta en marcha: Modo Operación a 1700 m/min. ....	140
<b>Figura 155</b> Protocolo de puesta en marcha: Modo Operación a 1800 m/min. ....	141
<b>Figura 156</b> Protocolo de puesta en marcha: Modo Operación a 1900 m/min. ....	141
<b>Figura 157</b> Protocolo de puesta en marcha: Modo Operación a 1950 m/min. ....	141
<b>Figura 158</b> Protocolo de puesta en marcha: Modo Operación a 2000 m/min. ....	142
<b>Figura 159</b> Protocolo de puesta en marcha: Modo Operación a 2050 m/min. ....	142
<b>Figura 160</b> Protocolo de puesta en marcha: Modo Operación a 2100 m/min. ....	142
<b>Figura 161</b> Pérdidas de eficiencia después del proyecto, a velocidad de 1300 m/min.	143
<b>Figura 162</b> Pérdidas de eficiencia después del proyecto, a velocidad de 1500 m/min.	144
<b>Figura 163</b> Pérdidas de eficiencia después del proyecto, a velocidad de 1700 m/min.	144
<b>Figura 164</b> Pérdidas de eficiencia después del proyecto, a velocidad de 1800 m/min.	145
<b>Figura 165</b> Pérdidas de eficiencia después del proyecto, a velocidad de 1900 m/min.	145
<b>Figura 166</b> Pérdidas de eficiencia después del proyecto, a velocidad de 1950 m/min.	146
<b>Figura 167</b> Pérdidas de eficiencia después del proyecto, a velocidad de 2000 m/min.	146

**Figura 168** Pérdidas de eficiencia después del proyecto, a velocidad de 2050 m/min. 147

**Figura 169** Pérdidas de eficiencia después del proyecto, a velocidad de 2100m/min..147

## Introducción

En el presente trabajo, se mejora el proceso de secado con vapor saturado en la nueva Máquina Papelera, ubicada en Lima - Perú, mediante el dimensionamiento e implementación de un nuevo sistema de control automático para el secado mediante vapor saturado, alimentado desde un caldero pirotubular de 600 BHP, para incrementar la velocidad de máquina desde 1950 m/min hasta 2100 m/min. Para controlar las variables de presión y temperatura, se dispone del sistema de instrumentación, gobernado por un sistema de control DCS, en el que se instala una estación de ingeniería y dos estaciones de operación. Terminado el proceso de secado, el vapor empleado retorna a la caldera, iniciando nuevamente el ciclo de secado.

En el capítulo 1, Parte introductoria del trabajo, se describen las generalidades del trabajo propuesto, la situación problemática, el problema a resolver, el objetivo general, los objetivos específicos, indicadores de logro de los objetivos y los antecedentes investigativos.

El capítulo 2, Marcos teórico y conceptual, explica el marco teórico describe la base teórica de la automatización industrial, el control industrial, comparación entre control y automatización industrial, automatización y control industrial por computadora, controlador lógico programable PLC, sistema de control distribuido DCS, sistema de supervisión – control y adquisición de datos SCADA, redes industriales, instrumentación industrial y el control proporcional integral derivativo PID. El marco conceptual describe el concepto de máquina papelera, caldero pirotubular, tanque desaireador, cilindro secador o *yankee*, sistema de secado por vapor en una máquina papelera y el sistema de instrumentación.

El capítulo 3, Desarrollo del trabajo, explica el análisis del problema y la toma de datos de las pérdidas relacionadas al secado por vapor en la máquina papelera antes del proyecto, el dimensionamiento de la solución propuesta, iniciando con las especificaciones técnicas de los equipos actuales, los cálculos para realizar la simulación de la solución propuesta, y las especificaciones técnicas dadas por el fabricante de la máquina.

Posteriormente, se describen las especificaciones y la selección de los equipos de instrumentación y control, la instalación y el montaje de equipos, las pruebas de precomisionamiento, comisionamiento y puesta en marcha. Por último, la validación de la solución propuesta, determinando las perdidas asociadas al secado con vapor en la máquina papelera luego del proyecto.

El capítulo 4, Análisis y discusión de los resultados, detalla el análisis cuantitativo de la información obtenida del dimensionamiento e implementación del sistema de control automático para el secado de papel mediante vapor saturado, y se verifica el cumplimiento de los objetivos específicos definidos en el presente proyecto.

En conclusiones y recomendaciones, se redactan las conclusiones del trabajo en base a los resultados obtenidos en la máquina papelera y el nivel de cumplimiento del objetivo general y los objetivos específicos definidos en el presente proyecto. Adicionalmente, se proponen sugerencias para la mejora del presente proyecto y su posible adaptación a otras máquinas papeleras de similar capacidad en base a las conclusiones del presente proyecto, así como la experiencia adquirida en su implementación.

## **Capítulo I. Parte introductoria del trabajo**

En este apartado se explican las generalidades del trabajo propuesto, la situación problemática, el problema a resolver, el objetivo general, los objetivos específicos, indicadores de logro de los objetivos y los antecedentes investigativos.

### **1.1 Generalidades**

El proceso de secado, mediante vapor saturado en la máquina papelera, presenta una serie de deficiencias a velocidades mayores a los 1950 m/min (metros por minuto). Presenta variaciones de humedad en el papel expresadas en porcentaje en el perfil del papel. Esto genera un papel de baja calidad, el cual es rechazado por no cumplir los estándares de calidad definidos por la compañía para la operación, afectando la productividad y sus costos.

Para incrementar la capacidad del proceso de secado mediante vapor, se implementa un nuevo cilindro de mayor capacidad que el actual, con el fin de mejorar los parámetros de presión y temperatura del vapor, que originen una mejor transferencia del calor al papel. Se asigna un caldero pirotubular, dedicado exclusivamente para la máquina papelera, que permita al sistema de control responder de mejor manera a las necesidades de la máquina. Con las propuestas de mejora en el *yankee* y en la caldera, se propone incrementar el flujo de vapor para superar los 1950 m/min de velocidad de máquina. Esto origina que el tanque de recuperación de vapor *flash* a la salida del *yankee*, así como el tanque desaireador, sean modificados por otros de mayor capacidad. Así como la ampliación a los diámetros de las tuberías de vapor, que origina la modificación del sistema de instrumentación para el control del proceso de secado.

Por ello, se presenta el dimensionamiento e instauración de un nuevo sistema de control automático para el secado de papel con vapor saturado, que consta de un nuevo cilindro secador *yankee* de mayor capacidad, con nuevos instrumentos, y control basado en la arquitectura DCS.

## 1.2 Descripción del problema

En este apartado se detalla el problema que da origen al proyecto en mención y al problema a resolver, acompañada de la solución propuesta para alcanzar los objetivos propuestos.

### 1.2.1 Situación problemática

Actualmente se presentan variaciones en el proceso de secado mediante vapor saturado en la máquina papelera, a velocidades mayores a los 1950 m/min, expresados en variación de la humedad en el perfil del papel, lo que origina rechazo del jumbo de papel, por no cumplir los estándares de calidad definidos por la empresa, afectando la productividad y sus costos.

**Figura 1**

*Imagen arból de pérdidas de la máquina papelera.*



La máquina papelera opera de forma estable hasta valores de 1950 m/min, que representa un 90% de la velocidad nominal de la máquina; sin embargo, por la alta

demandas de producción y ventas en el mercado nacional e internacional, es necesario incrementar la velocidad nominal de la máquina papelera a 2100 m/min.

### **1.2.2 *Problema a resolver***

La variación del secado por vapor, expresado en porcentaje de humedad en el perfil del papel, a velocidades mayores a 1950 m/min, origina un papel de baja calidad, el cual es rechazado por no cumplir los estándares de calidad definidos por la compañía para la operación, que afecta la productividad y sus costos.

## **1.3 *Objetivos del trabajo***

En este apartado, se plantean el objetivo global, los objetivos individuales y los indicadores de cumplimiento por cada uno de los objetivos individuales.

### **1.3.1 *Objetivo global***

Dimensionar e instaurar un sistema para el secado de papel mediante vapor saturado en la máquina papelera de forma automática.

### **1.3.2 *Objetivos específicos***

Los objetivos específicos definidos para cumplir con el objetivo general son los siguientes:

1. Dimensionar el sistema de control automático para el secado de papel mediante vapor saturado con velocidades según el programa establecido en la máquina papelera.
2. Implementar el sistema automático basado en DCS, para el secado de papel mediante vapor saturado con velocidades según el programa establecido en la máquina papelera.
3. Evaluar el funcionamiento del secado de papel, después de su implementación a velocidades según el programa establecido en la máquina papelera.

### **1.3.3 Indicadores de cumplimiento de objetivos**

**Tabla 1**

*Indicadores de cumplimiento de objetivos.*

Nº	Objetivo individual	Indicador de cumplimiento	Parámetro
	Dimensionar el control automático para el secado de papel con vapor saturado con velocidades según el programa establecido en la máquina papelera.	Diseño de la arquitectura del sistema de control automático para la máquina papelera.	Norma Técnica
2	Implementar el sistema automático basado en DCS, para el secado de papel con vapor saturado con velocidades según el programa establecido en la máquina papelera.	Implementación del 100% del sistema de control automático para la máquina papelera.	Porcentaje
3	Evaluar el funcionamiento del secado de papel, después de su implementación a velocidades según el programa establecido en la máquina papelera.	Reducir a menos de 1% las pérdidas de eficiencia por secado con vapor en la máquina papelera	Porcentaje

### **1.4 Antecedentes investigativos**

En el Perú y el mundo entero, se han desarrollado varios trabajos de investigación relacionados al secado mediante vapor saturado en máquinas papeleras y al sistema de control que lo gobierna. A continuación, se describen los siguientes trabajos relacionados al tema propuesto.

Un primer trabajo, denominado “Reducción del consumo de vapor en una máquina papelera utilizando el control por presión diferencial a través de un control remoto” (Rodríguez, 2014), trata del consumo de un menor flujo másico de vapor, realiza un análisis matemático donde emplea datos históricos para mejorar la eficiencia del sistema de vapor y el condensado, como se muestra en la figura 2. El autor implementa un control de presión diferencial aplicado a un sistema cascada, dimensionando las tuberías de vapor, las trampas del circuito, y la capacidad del tanque de vapor *flash*. El control del sistema está gobernado por PLCs y HMIs (*Human Machine Interface*). El autor expone los resultados obtenidos en la implementación de su solución, especificando la relación de otros parámetros que de forma indirecta intervienen en el secado de papel tales como: la relación de chorro/tela, el separador de vacío y la prensa de succión.

**Figura 2**

*Costos en el proceso de producción de papel, antes y luego de la implementación de mejora.*

		COSTO CONSUMO DE VAPOR MAQUINA PPX-1												
Costo energía (MBTU / TON)		Consumo de Energía (MBTU)												
Costo energía (MBTU / TON)	\$15,28	Consumo de Energía (MBTU)												
Entalpia hG (Btu/Lbm)	1178,13	Entalpia de Vapor saturado - Presión 45 PSI - Temp.292°F												
Entalpia hF (Btu/Lbm)	162,11	Entalpia de Líquido saturado - Presión 45 PSI - Temp.292°F												
PPX-1		FEBRERO												
Totalizador de vapor (Lbm)	548380,00	512000,00	520000,00	523780,00	509315,61	543250,74	564113,86	580000,00	137830,00	28070,00	520000,00	509450,00	533080,00	
Entrada Energía por Vapor MBTU	646,06	603,20	812,63	617,08	600,04	640,02	684,80	647,97	182,38	30,71	612,63	600,20	628,04	
Totalizador de condensado (Lbm)	551300,00	426800,00	474700,00	504500,00	555240,27	526802,78	515365,00	505355,00	146600,00	11100,00	477100,00	457300,00	488000,00	
Salida Energía por Condensado MBTU	89,37	89,19	76,95	81,78	90,01	85,40	83,54	81,92	23,77	1,80	77,34	74,13	79,11	
Energía Consumida (MBTU)	566,60	534,01	536,87	535,30	510,03	584,82	581,08	588,05	138,62	28,91	535,28	526,07	548,93	
Costo de Energía Consumida (MBTU)	\$8,506,25	\$8,189,73	\$8,185,10	\$8,179,33	\$7,793,26	\$8,474,49	\$8,878,52	\$8,649,22	\$2,118,06	\$441,81	\$8,179,15	\$8,038,28	\$8,387,62	
Tonelada de papel (TON)	82,172	80,000	80,000	69,123	70,806	78,929	80,340	81,000	9,830	0,000	85,000	79,207	\$2,756	
TRIM EN BOBINADORA (MTS)	2,20	2,58	2,60	2,20	2,00	2,56	2,17	2,16	2,66	2,66	2,09	2,15	2,26	
TRIM EN REBOBINADORA (MTS)	2,07	2,20	2,10	2,07	2,00	2,54	2,13	2,06	2,52	2,07	2,13	2,20		
Consumo energía por tonelada papel en Robobinadora (MBTU/TON)	6,77	6,68	6,63	7,74	7,20	7,03	7,23	6,99	14,10		6,30	6,64	6,63	
Consumo energía por tonelada papel en Bobinadoras (MBTU/TON)	6,37	9,13	9,29	7,29	7,20	6,87	7,10	6,66	13,88		6,24	6,58	6,46	

Nota: fuente Rodríguez (2014).

El presente proyecto aporta una mejora con respecto a este trabajo en el nivel de arquitectura de control, ya que propone un sistema de control basado en arquitectura DCS en comparación al control basado en PLC y HMI. Asimismo, el trabajo de Rodríguez (2014) no se enfoca en el caldero, tanque desaireador y sus sistemas de control, mientras que el presente proyecto si lo hace. Por último, el trabajo indicado está basado en un control de tipo cascada, mientras que el presente proyecto emplea control con rango partido.

En un segundo trabajo, denominado “Determinación del ahorro energético a partir de la recuperación del vapor condensado en una fábrica de papel tissue” (Suarez, 2015), propone el estudio del desempeño energético de una máquina papelera, el caldero y el sistema de vapor propiamente dicho, tiene como objetivo el ahorro energético con base del vapor recuperado. El autor expone la diferencia entre los dos escenarios. El primer escenario en donde el vapor *flash* retorna de forma directa a la caldera, el segundo escenario en donde el vapor *flash* sirve para calentar el agua del tanque desaireador y luego alimentar a la caldera.

### Figura 3

*Costos en el proceso de producción de papel, antes y luego de la implementación de mejora.*

	Sistema inicial de vapor				Sistema final de vapor		
	%	%	\$/t		\$/t	%	%
Material fibroso	58,9		554,69		554,69		59,7
Mano de obra	9,6		90,41		90,41		9,74
Suministro de energía	12,2		114,89		114,89		12,4
Suministro de vapor	7,2	97,5	66,11 (a)	Gas natural	53 (b)	96,9	5,89
		2,5	1,70	Químicos	1,7	3,1	
Gastos de mantenimiento	4,8		45,20		45,20		4,87
Químicos de procesos	2,8		26,37		26,37		2,84
Químicos de máquina	1,9		17,89		17,89		1,93
Suministro de agua	1,5		14,13		14,13		1,52
Material indirecto	0,7		6,59		6,59		0,71
Químicos para limpieza de máquina	0,4		3,77		3,77		0,41
Total	100%		941,75 (c)		928,62		100%
Ahorro absoluto (a-b)			13,11 (d)				
Ahorro relativo de gas (d/a)*100	19,87						
Ahorro relativo de costo total (d/c)*100	1,39						

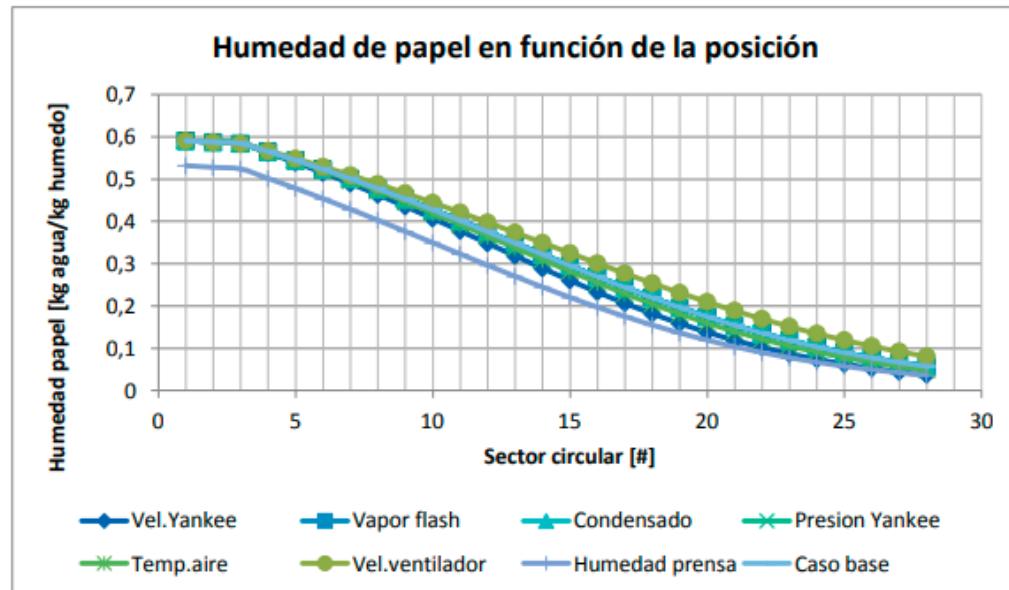
Nota: fuente Suarez (2015).

El presente proyecto aporta una mejora en la automatización del sistema de control, ya que, en este segundo antecedente, las variables son controladas en su mayoría de forma manual a diferencia del proyecto propuesto, que está basado en la arquitectura DCS con instrumentación de campo con protocolo *Hart*, protocolo *Profibus PA*, *Profibus DP* y *Ethernet Industrial*.

Un tercer trabajo, denominado “Modelamiento del proceso de secado de papel tissue caso real planta Talagante” (Valiente, 2013), propone la identificación de los fenómenos involucrados en la etapa de secado del papel, desarrolla un modelo matemático, que calcula que el secado por vapor aporta el 35% al total de secado, mientras que el secado por aire caliente aporta el 65% al total del secado, como se muestra en la figura 4. El secado por aire caliente es generado por la combustión de dos quemadores y el calor es transmitido al papel por dos ventiladores de recirculación.

**Figura 4**

Gráfica de perfil de humedad en el papel para diferentes condiciones de operación.



Nota: fuente Valiente (2013).

El presente proyecto aporta una mejora en la automatización del sistema de control en el secado de vapor, ya que este tercer antecedente usa la arquitectura PLC – SCADA, mientras que el proyecto usa la arquitectura DCS. Asimismo, el antecedente está más enfocado en el secado por aire caliente, calcula los parámetros de regulación como las velocidades de los ventiladores, así como la curva de combustión de los quemadores. El proyecto actual se enfoca en el secado por vapor y sus parámetros de regulación asociados, tales como presión, temperatura y flujo de vapor.

## **Capítulo II. Marco teórico y conceptual**

En este apartado se exponen los marcos teóricos y conceptuales.

### **2.1 Marco teórico**

Se desarrollarán los conceptos de automatización y control industrial, PLC, DCS, SCADA, redes de control industrial, instrumentación industrial, clasificación de la instrumentación industrial y algoritmo de control PID. Todos estos conceptos son utilizados en el desarrollo del trabajo, los cuales provienen de fuentes académicas.

#### **2.1.1 Automatización en la industria**

Brunete, San Segundo y Herrero (2020) definen a la automática como la ciencia que estudia a la automatización industrial con el fin de reducir y eliminar del hombre en la producción de bienes y servicios. La ingeniería automática es definida como una ciencia de múltiples disciplinas responsables de la creación de autómatas, de los procesos automáticos y de la automatización de los procesos industriales (aeronáutica, automovilismo, robótica, medicina, construcción de edificios, minería, petróleo, siderúrgica, alimentos, bebidas, electricidad, obras civiles, tecnología, industria química, entre otros).

A todo aquello que se busca automatizar se le conoce como planta. Se aplica a las industrias de proceso continuo tales como la ingeniería química, industria cementera e industria pesquera, así como a los procesos de fabricación discreto o comúnmente llamado procesos de manufactura tales como la industria de automóviles, la robótica y la industria de electrodomésticos. Cabe mencionar que, en muchas ocasiones, ambos tipos de procesos de fabricación continua y la manufactura se dan de forma simultánea. La automatización se propone incrementar la productividad en la industria, producir con buena calidad y que el ser humano se dedique más a acciones creativas y no repetitivas. En la figura 5, se muestran las máquinas utilizadas en la automatización industrial.

## **Figura 5**

## *Fotografía de máquinas utilizadas en la automatización industrial.*



*Nota:* fuente Brunete (2020)

## Robots

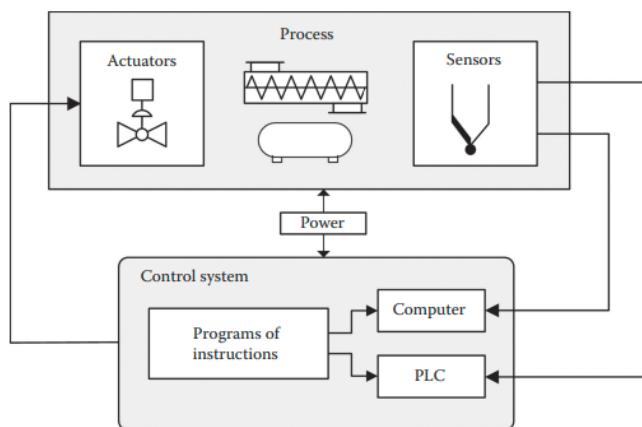
## Máquinas transfer

*Nota:* fuente Brunete (2020)

Manesis y Nikolakopoulos (2018) refieren que el ciclo industrial se inició con la automatización en aras de aumentar los volúmenes producidos y la calidad en su elaboración. Los procesos productivos industriales en sus inicios se dan en base a los sentidos de los operadores, los cuales han evolucionado a sensores, actuadores unidades computacionales, con el desarrollo de la automatización industrial. A través de los sensores, se vienen recopilando las señales, que serán procesadas y analizadas por la lógica de las unidades computacionales y estas ejecutadas por los actuadores.

**Figura 6**

*Imagen elementos básicos de un sistema automatizado.*



*Nota:* fuente Manesis y Nikolakopoulos (2018)

Asimismo, nos indican que la finalidad de automatizar un proceso industrial debe ir alineado al crecimiento de la empresa y a su rentabilidad como tal, a través de los siguientes fines:

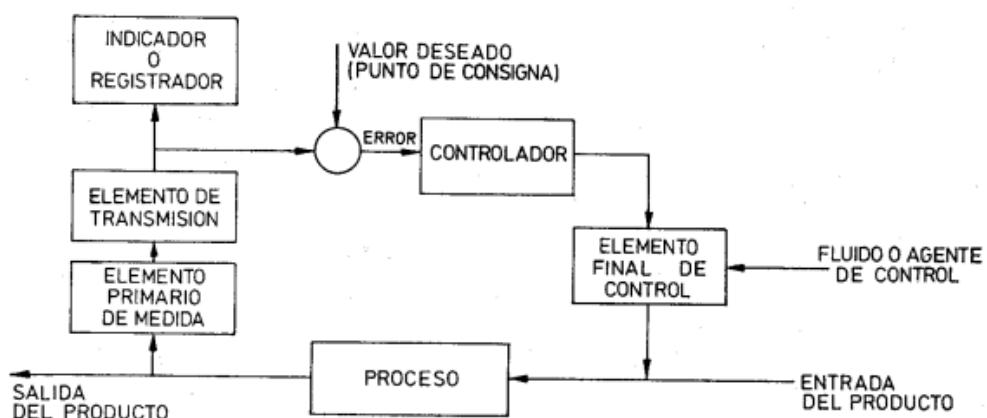
- Incrementar la efectividad de producción.
- Rebaja de costos, enfocados a costos humanos.
- Mejorar la utilización de materias primas para la producción.
- Mejorar en la calidad del bien o servicio.
- Reducción del consumo energético.

### **2.1.2 Control industrial**

Creus (2010) define que los procesos industriales se dividen 2 clases: procesos constantes y no constantes. Para ambos se debe sostener las variantes del proceso como presión, temperatura, flujo. La técnica definida relaciona a la variable, con una valoración deseado y en base a su autómata genera una acción de corrección según la desviación existente en la variable, esto sin la intervención del hombre. El sistema para hacer la relación y la rectificación asociada, incluye al elemento de medición, el elemento de control, y al componente final de mando.

**Figura 7**

*Imagen lazo de sistema de control.*



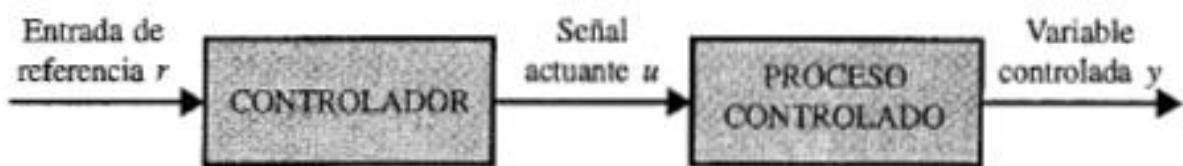
Nota: fuente Creus (2010).

Manesis y Nikolakopoulos (2018) indican que, para definir qué es un sistema de control, se debe definir previamente que los procesos de manufactura llevan consigo un sinfín de objetivos. Los elementos principales de un sistema de control son: la finalidad de control, elementos como tal y las salidas. La conexión entre estos componentes se describe como las metas como alimentaciones o señales ejecutantes, los efectos visibles en las salidas o variantes gobernadas.

Los autores, también, especifican las 2 clases de lazos: a lazo abierto y a lazo cerrado. El lazo abierto dispone como elementos al gobernador y al sistema gobernado. La señal de alimentación se aplica al gobernador, cuya salida se conoce como señal ejecutante, la señal ejecutante gobierna al proceso.

**Figura 8**

*Imagen elementos de sistema de control con lazo abierto.*

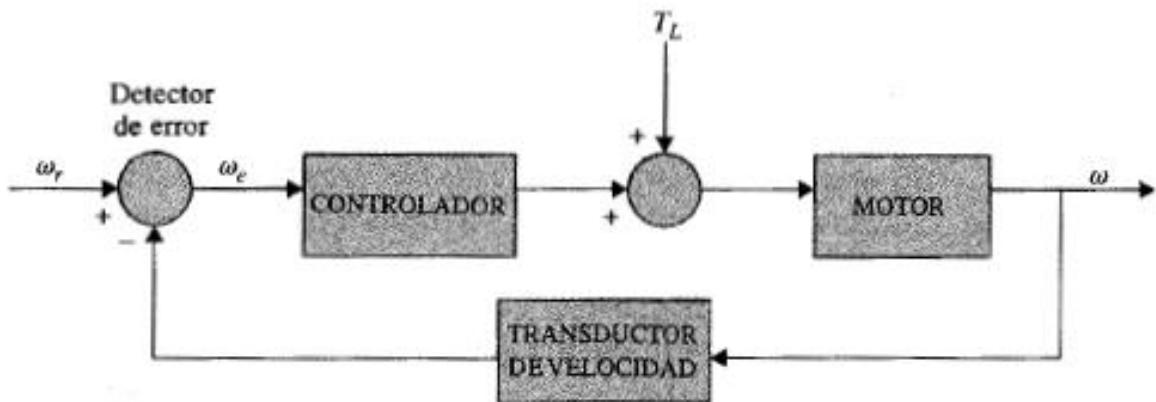


Nota: fuente Manesis y Nikolakopoulos (2018)

En el lazo cerrado, surge ante la necesidad de que el sistema sea más exacto, porque al sistema de lazo abierto se le adapta una retroalimentación desde la salida hacia la alimentación del proceso. La señal gobernada debe ser retroalimentada y relacionada con la señal referenciada, con la señal ejecutante en razón de la resta del ingreso y la salida para corregir el error del sistema.

**Figura 9**

*Imagen elementos de sistema de control con lazo cerrado.*



Nota: fuente Manesis y Nikolakopoulos (2018)

### 2.1.3 Comparación entre control y automatización industrial

Manesis y Nikolakopoulos (2018) indican que debemos diferenciar los conceptos principales y los significados entre el control automático y la automatización industrial.

Los autores indican que el control con automatismo puede determinarse como el control constante de una variante analógica física, a través del uso de algún actuador; ergo automatismo industrial se vincula al control por sucesión o prendido - apagado para dispositivos de dos fases. Sin embargo, ambos sistemas pueden integrarse y actuar de forma cooperativa, por ejemplo, en la siguiente figura se muestra que, entre los dispositivos discretos, se pueden incluir dispositivos de control de tiempo continuo en el sistema de control industrial.

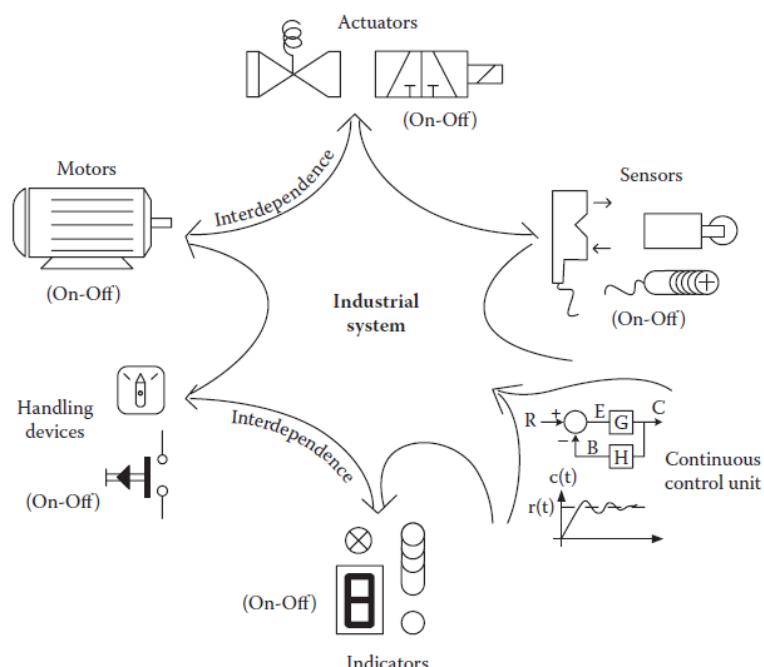
Para el suceso de las fases de control en la industria, se encuentran variantes de proceso, idealmente estén fijados en valores constantes, presentando variaciones de forma aleatoria debido a perturbaciones externas en la fase productiva. La disminución o erradicación de estas variantes se logran mediante el uso de los fundamentos y métodos de control con automatismo; por nombrar, tiempo de cambio rápido a lento, desarrollo de mínimo esfuerzo en el control, el impulso en el transcurso del cambio del ajuste, la concurrencia rápida, entre otros. Estos problemas se abordan mediante la teoría de control

automático, aplica los planteamientos teóricos y las utilizaciones, como la definición del control proporcional, integral y derivativo.

El teorema del automatismo en la industria se centra en las variantes físicas y maquinarias se hallan en dos fases: hay o no el flujo del líquido, la presión de aire ha llegado al valor esperado. El automatismo en la industria incluye a los componentes, maquinarias y tarjetas electrónicas, electromecánicas, y electroneumáticas, donde su principio de funcionamiento está basado en la lógica booleana y la correspondiente interconexión secuencial a través de las fases productivas. En el mundo del automatismo, la ejecución del gobernador están limitados a los valores específicos de encendido y apagado (*on* y *off*). En la figura 10, se muestran las clases de dispositivos que componen un sistema industrial.

**Figura 10**

*Imagen de dispositivos que componen un sistema industrial.*



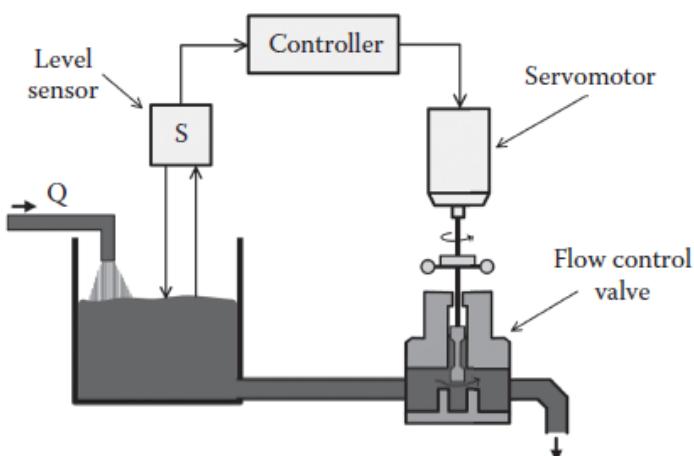
Nota: fuente Manesis y Nikolakopoulos (2018)

Los autores presentan un proceso para el control de nivel en un líquido en un tanque. El suministro del líquido en el tanque es proporcionado por una variable no controlada, mientras que una válvula controla el flujo de salida del líquido del tanque. En

en este proceso se desea que el nivel del tanque se mantenga a una altura determinada, independientemente del líquido que se va a suministrar. Para la solución a este problema, después de llegar a la altura deseada, el caudal saliente debe ser similar al caudal entrante. Para implementar esta ley de control, ya que no se mide el flujo de entrada, el sistema de control debe medir la altura del líquido en el tanque, mediante el medidor de nivel, y, posteriormente, ajustar el flujo de salida, mediante la válvula de control. Para que el control sea óptimo, la válvula no estará en solo 2 estados como totalmente abierta y totalmente cerrada, desplazándose en cualquier valor deseado en todo su rango. En la era industrial clásica, este control habría sido implementado por circuitos analógicos, mientras que ahora es común el uso de control por computadora y controladores lógicos programables.

**Figura 11**

*Imagen de sistema de control automático de nivel en un tanque.*



Nota: fuente Manesis y Nikolakopoulos (2018)

#### 2.1.4 Automatización y control industrial por computadora

Manesis y Nikolakopoulos (2018) detallan como, la función de gobernar el proceso en la industria, ha desarrollado mucho en esta era. Pasó de una acción plenamente manual, luego al control con ondas análogas y del automatismo básico hasta alcanzar un enfoque de automatización y control basado totalmente en computadora. Para posibilitar la opción de la automatización total, trajo consigo la aparición de varios procesadores

digitales, luego de ello un rápido aumento de las computadoras y las minicomputadoras de control de procesos, aplicándose, inicialmente, en plantas pequeñas, trayendo consigo el cambio radical en el campo de control y de la automatización de los procesos industriales.

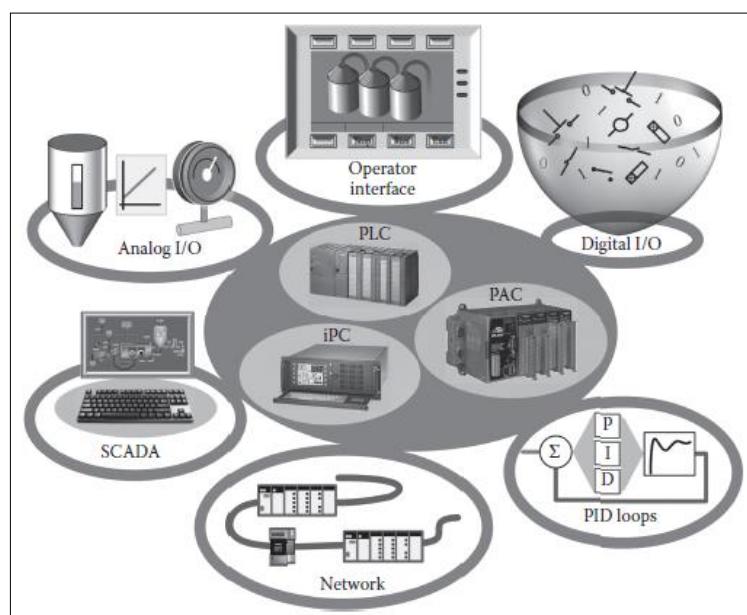
En la actualidad, el automatismo y control en la industria, basado en *hardware*, abarca varias clases de elementos digitales como I- PC (computadoras), PLC (controladores lógicos programables), PAC (controladores de automatización programables), entre otros. La utilización de todas estas tecnologías antes mencionadas usadas en el sector industrial, considerando la combinación adecuada, da lugar a los logros en el rendimiento y la calidad deseada en la industria de hoy en día.

Luego de la introducción de las primeras PC y PLC potentes, los ingenieros de la automatización se dividieron en 2 grupos: el primer grupo partidario del uso de las PC equipadas con *hardware* de entrada y salida (E/S) para lograr la funcionalidad requerida en el campo de la automatización; y el segundo grupo rechazó a las PC como dispositivos computacionales en el sector industrial, ya que no son apropiados para el entorno industrial y en su lugar proponen el uso de los PLC. Ambas categorías con características con ciertas ventajas y desventajas. Las PC brindan la posibilidad de usar varios softwares, desde aplicaciones simples hasta aplicaciones complejas, capaces de implementar leyes de control avanzado y algoritmos en la automatización industrial, proporcionando interfaces gráficas al usuario, capacidades de interacción avanzadas, mayor poder de procesamiento, y un entorno de programación más sencillo y más flexible al usuario. Por otro lado, las PC no son adecuadas para un entorno industrial puro, así puedan equiparse con el *hardware* de E/S adecuado, con la desventaja que no fueron diseñadas para los entornos industriales, por lo que obtiene una estabilidad operativa y una durabilidad reducida. Por otro lado, los PLC se han fabricado para utilizaciones en automatismo y control en la industria, caracterizados por la duración operativa y equipada con *hardware* digital y analógico ajustables a las necesidades de la aplicación específica. Los PLC proporcionan un *software* optimizado para las necesidades exactas de la automatización y control de procesos, hoy se consideran una solución estándar en la industria, pueden dejarse sin

atención y en funcionamiento continuo durante varios años, sin errores o fallas operativas. Sin embargo, los PLC no pueden admitir algoritmos de control avanzados, ya que disponen con plataformas dedicadas para desarrollar algoritmos de automatización, sin soporte a otro tipo de *software*. Asimismo, los PLC con desventaja que no disponen con una forma de comunicación universal ni estandarizada, lo que origina la restricción a la integración de otros dispositivos específicos. Una vez finalizada la etapa de programación del PLC, este funciona como caja negra, sin capacidad de proporcionar al usuario algún tipo de información en línea, a excepción de los diodos emisores de luz óptica que indican el estado de la E/S digitales.

**Figura 12**

*Imagen de sistemas utilizados en la automatización y control industrial.*



Nota: fuente Manesis y Nikolakopoulos (2018)

Para soportar las crecientes demandas de las aplicaciones industriales, se desarrollaron dispositivos de automatización industrial que pueden combinar las ventajas de los PLC para el control y automatización, con las ventajas de los sistemas basados en PC, que brindan al usuario una flexibilidad significativa para la configuración e integración en la industria. Dicho dispositivo se ha establecido como controlador de automatización programable PAC. Un PAC es generalmente un controlador industrial multifuncional, que puede monitorear y controlar simultáneamente señales de E/S digitales y analógicas,

mientras admite múltiples protocolos de comunicación integrados con capacidades para la adquisición de datos.

Los desarrollos en las capacidades de cómputo, los dispositivos de control y automatización, y su capacidad para comunicarse e intercambiar información, han originado la introducción de las redes industriales. Estas redes industriales difieren bastante de las redes tradicionales, debido a sus requisitos operativos específicos. Las redes industriales hacen referencia a la implementación de protocolos de comunicación entre dispositivos de campo, controladores y todo lo relacionado al software involucrado.

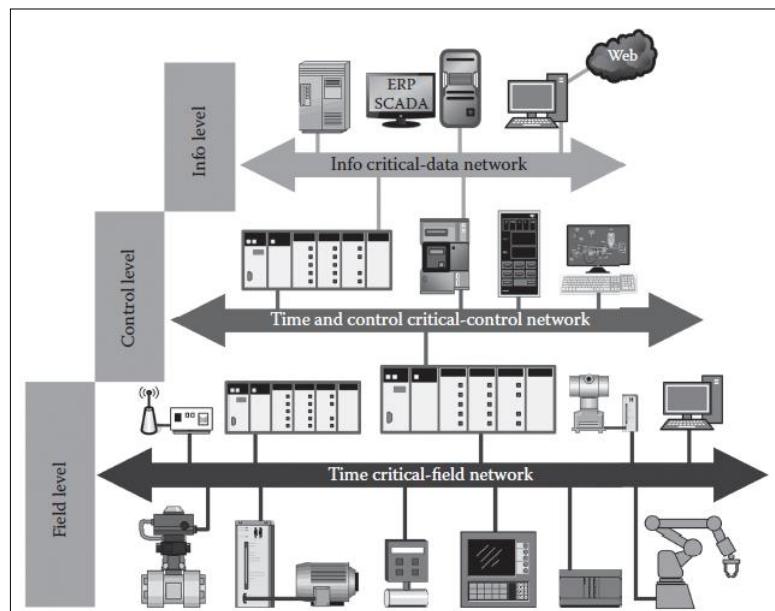
Al establecer la conexión entre los controladores industriales, la red industrial ofrece la posibilidad de detectar mensajes y generar comandos de control a través de un enfoque descentralizado. Dado este concepto, con una visión general completa de los subprocesos, lo que origina la etapa de supervisión y obtención de datos conocido como SCADA. Este concepto ingresó por la necesidad de recopilar datos y supervisar sistemas de control en una gran planta de proceso en tiempo real.

De forma similar aparecen los sistemas de control distribuido. Cronológicamente, estos sistemas DCS han existido antes de los sistemas SCADA. Existe cierta confusión entre estos dos sistemas, debido a las características comunes que poseen. La mayor diferencia radica en el que el DCS está orientado a procesos, mientras que los sistemas SCADA no disponen al control de procesos como una función principal.

En base a la tecnología de redes industriales y las unidades computacionales de automatización, se ha implementado el concepto de manufactura integrada por computadora CIM. Los procesos industriales se organizan en una estructura jerárquica de tres capas: la más baja se compone de sensores, actuadores, y microcontroladores integrados, la segunda, conocida como la de control, en donde se ubican los controladores industriales, las PC y los PAC industriales, y la capa más alta, conocida como el nivel de gestión, donde se encuentran las computadoras centrales para el SCADA y las funciones de planificación. En la figura 13, se muestran estos tres niveles.

**Figura 13**

*Imagen del CIM integrando todos los niveles de producción industrial.*



Nota: fuente Manesis y Nikolakopoulos (2018)

#### **2.1.5 Controlador lógico programable PLC**

Según Lamb (2013), los PLC son esencialmente computadoras digitales utilizadas para controlar procesos electromecánicos, extienden su aplicación, hoy en día, en muchas industrias para controlar sus sistemas de automatización. A diferencia de las computadoras convencionales, los PLC están diseñados para arreglos entrantes y salientes, niveles de temperaturas superiores a lo normal, inmunidad al ruido y oposición al movimiento. Los planteamientos contra el control de marcha de la planta se guardan en una memoria respaldada por una pila.

Un PLC es un componente en tiempo instantáneo; porque los efectos salientes, se generan en solución a las condiciones en las entradas, esto en un tiempo determinado. De extenderse más del tiempo deseado, se producirán errores en el funcionamiento del sistema. La principal ventaja, con respecto a otras computadoras, es que el PLC está equipado para operar en condiciones extremas tales como el polvo, temperatura, humedad, frío, entre otros. Otra ventaja es que los PLC disponen de la capacidad para ampliar sus entradas y salidas. En las entradas, los PLC leen sensores, switch de límites, variables de

procesos analógicos como temperatura o presión, la realimentación de apertura de un sistema de posicionamiento, entre otros. En las salidas, operan motores eléctricos, cilindros neumáticos o hidráulicos, relés magnéticos o solenoides, variables de procesos analógicos para controlar el caudal de la una válvula de control, el grado de apertura de un sistema de posicionamiento, entre otros.

Los PLC pueden ser compactos, disponen módulos de E/S digitales o analógicos, conectados a un bastidor de PLC, los módulos de comunicación también pueden conectarse a este bastidor. Una de las desventajas es que los fabricantes venden el *software* para programar en sus plataformas. Estas plataformas son exclusivas para determinado *hardware*, no pudiendo programar el *hardware* de otro fabricante. En la figura 14, se muestra un PLC basado en *rack*.

**Figura 14**

*Imagen de PLC modular basado en rack.*



Nota: fuente Lamb (2013).

De Silva (2016) indica que el controlador lógico programable PLC es en esencia un sistema similar a una computadora digital, que puede secuenciar adecuadamente una tarea compleja, que involucra a muchos dispositivos en muchas operaciones discretas que deben llevarse a cabo en un orden en particular. La operación por controlar consiste en un conjunto de acciones de dos estados (encendido y apagado), que el PLC puede secuenciar en el orden adecuado y en los momentos correctos. Los PLC se usan en plantas de

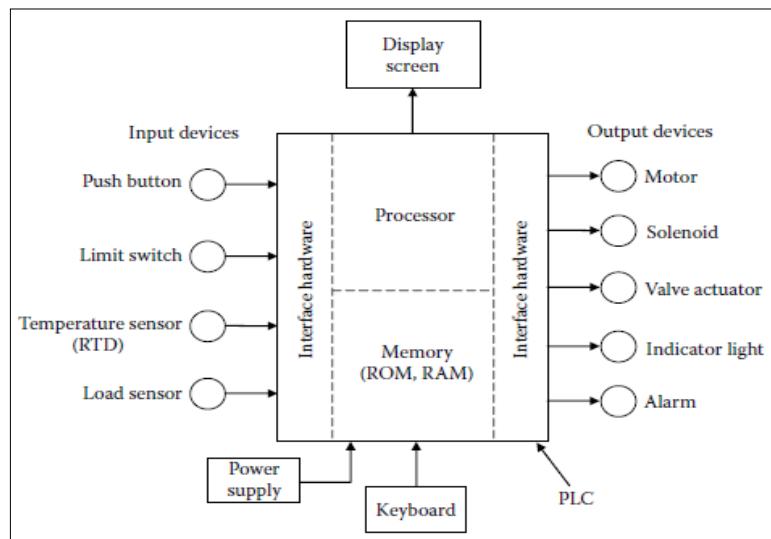
proceso, para conectar dispositivos de entrada a los dispositivos de salida, a alta velocidad en los momentos apropiados, según la lógica del programa configurado en el PLC.

Los PLC de hoy son computadoras robustas, tienen como ventaja que los dispositivos de planta se pueden cablear permanentemente y la operación de la planta se puede modificar o reestructurar a través de *software*, mediante la programación adecuada del PLC sin necesidad de hacer una modificación al *hardware* o una reconexión en el cableado. Internamente, el PLC realiza funciones informáticas básicas como lógica, secuenciación, temporización y conteo. Asimismo, puede realizar cálculos simples y algoritmos de control como el PID para operaciones de control que se denominan control de estado continuo, donde las variables de proceso se monitorean continuamente y se mantienen en valores cercanos a los valores deseados. También hay otra clase de controles, conocida como control de estado discreto, donde el objetivo de control es que el proceso siga una secuencia requerida de pasos o estados. Los PLC están especialmente diseñados para realizar tareas de control de estado discreto; sin embargo, es común que una tarea de control continuo se opere en una tarea de control discreto.

Un PLC opera según la secuencia lógica programada en él. Con un conjunto de dispositivos de entrada conectados en el PLC, que pueden ser digitales como pulsadores, selectores, *switch* de posición, o ya sean analógicos como sensores de temperatura RTD, sensores de presión del tipo diafragma, sensores de carga; y con un conjunto de dispositivos de salida, sean digitales como luces, motores eléctricos, pistones neumáticos e hidráulicos o sean analógicos como válvulas de control de flujo o de posicionamiento. Las entradas pueden adoptar dos estados (ya sea cero o uno). Según esta condición en la entrada y de acuerdo con la lógica programada, el PLC activará la salida correspondiente. La lógica que procesa el PLC es mediante *software* y no mediante *hardware*, solo la conmutación en los puertos de salida para encender o apagar los dispositivos se da mediante *hardware*.

**Figura 15**

*Representación esquemática del PLC.*



Nota: fuente De Silva (2016)

### 2.1.6 Sistema de control distribuido DCS

Lamb (2013) indica que los Sistemas de Control Distribuido DCS se encuentran por lo general en plantas de procesos continuos como refinerías de petróleo, plantas químicas, máquinas papeleras, gran minería, plantas cementeras, plantas siderúrgicas, entre otros. Los DCS se conectan a dispositivos de entrada y salida, utilizando el control de variante por operación del ajuste. Un clásico ejemplo es el control por presión, que usa un medidor de presión, el gobernador y la válvula gobernadora. En este caso, las mediciones de presión del sensor se transmiten al controlador a través de un acondicionador de señales de E/S, una vez que la variante en medición llega al objetivo, el gobernador manda a abrirse o cerrarse a la válvula, hasta que la presión alcance el punto deseado.

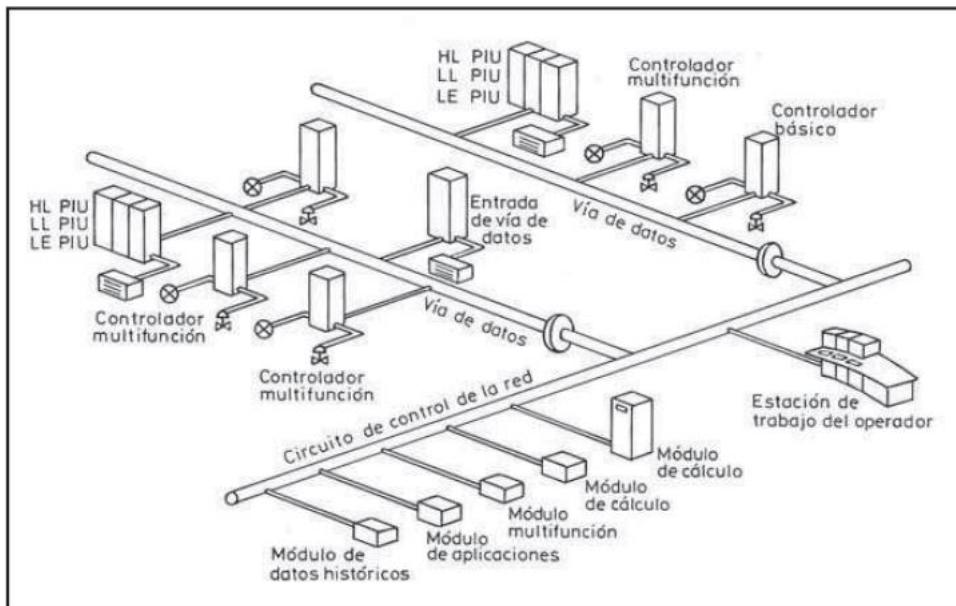
Los DCS tienen integrado dispositivos de E/S, los cuales pueden estar en la misma ubicación física que el controlador o estar de forma remota y enlazada con el gobernador por una red de comunicación, conocida como E/S distribuida. Los controladores de hoy tienen amplias capacidades computacionales, que además del control de PID pueden realizar un control lógico secuencial. Un DCS puede emplear una o varias estaciones de trabajo, pueden configurarse en la estación de trabajo o mediante una computadora portátil

externa. La comunicación local en el DCS es manejada por una red industrial, ya sea por cable trenzado, cable coaxial o fibra óptica. Es posible incluir un servidor y un procesador de aplicaciones para adicionar capacidad adicional para la recopilación y adquisición de datos.

Creus (2010) indica que el sistema de control distribuido DCS es un sistema jerarquizado en varios niveles, con uno o más microprocesadores que realizan el control de las variables de la planta, teniendo por un lado las entradas, en las cuales están conectadas las señales de los transmisores de las variables, y por el otro lado las salidas, en las cuales están conectados las válvulas de control. Asimismo, el DCS está basado en la filosofía de distribución del riesgo de fallo, que agrupa a los dispositivos en etapas operativas, de espera que adoptan los gobernadores disminuyendo la probabilidad de ocurrencia de fallos en paralelo.

**Figura 16**

*Arquitectura de sistema de control distribuido.*



Nota: fuente Creus (2010)

Creus (2010) indica que el control distribuido dispone como gobernador fundamental al microprocesador, que entregan los algoritmos de control: total o cero,

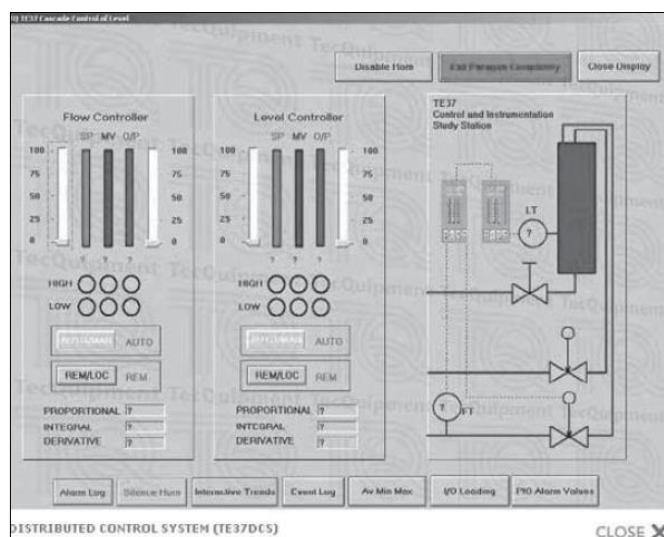
proporcional con tiempo cambiante, PID común, PID autoregulable, PID regulado externamente, PID con control adelantado, cambios planeados, bloques de recetas.

La base de operación da el enlace de planta para el operario, el técnico mantenedor y el ingeniero de proceso. El interfaz es mediante el programa de operación. En esta estación de operación, se disponen de pantallas en formatos gráficos, para que el operador manipule y haga los ajustes de las variables de proceso deseadas, las alarmas configuradas para detección de fallos, las tendencias de las variables en el tiempo. La estación puede comunicarse con otros ordenadores en una red industrial diferente, donde se obtenga información externa y complementaria al proceso en sí. Para la configuración de alarmas, evitar un número excesivo, ya que el operador las obviará; siendo el foco de una alarma alertar al operador ante una desviación.

El sistema de control distribuido dispone una mejora con respecto a la seguridad, respecto a los sistemas convencionales de control; ya que los dispositivos *smart* cuentan con autoregulación, que da al mantenedor identificar y resolver de forma rápida a estas averías. El DCS incluye una inteligencia distribuida, permitiendo la redundancia, limitando las consecuencias ante un fallo de un dispositivo, manteniendo el control del sistema.

**Figura 17**

*Imagen de pantalla operativa de sistema de control distribuido.*



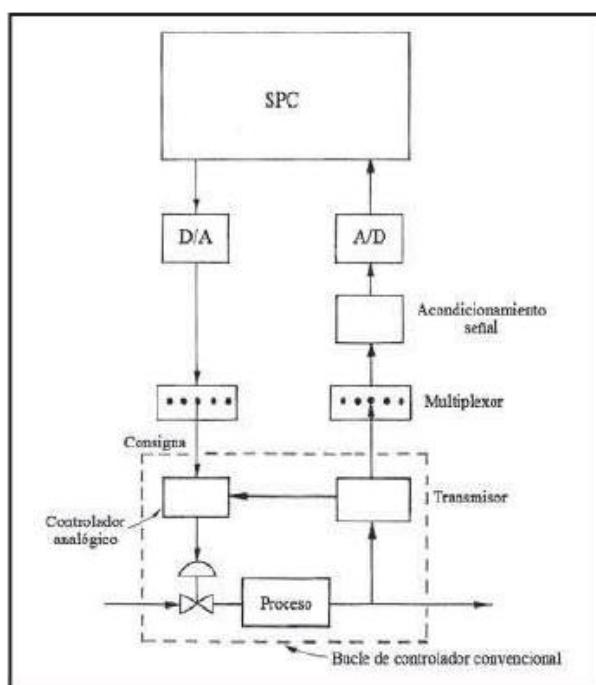
Nota: fuente Creus (2010)

### 2.1.7 Supervisión, control y adquisición de datos SCADA

Creus (2010) explica que los sistemas electrónicos presentan el gran problema de los errores de sus elementos a pesar de la nueva tecnología y el diseño de los computadores. Una forma de contrarrestar este problema es alcanzando la mayor protección en la marcha y lograr la efectividad del proceso. Esta clase se denomina control por el punto de ajuste (SPC) o control con supervisión. En simultaneo el computador deduce la consigna y los dirige a cada elemento, y, de presentarse errores, el gobernador adecua la variante del proceso en la última consigna que recibió de parte del computador.

**Figura 18**

*Diagrama de bloques del control supervisor*



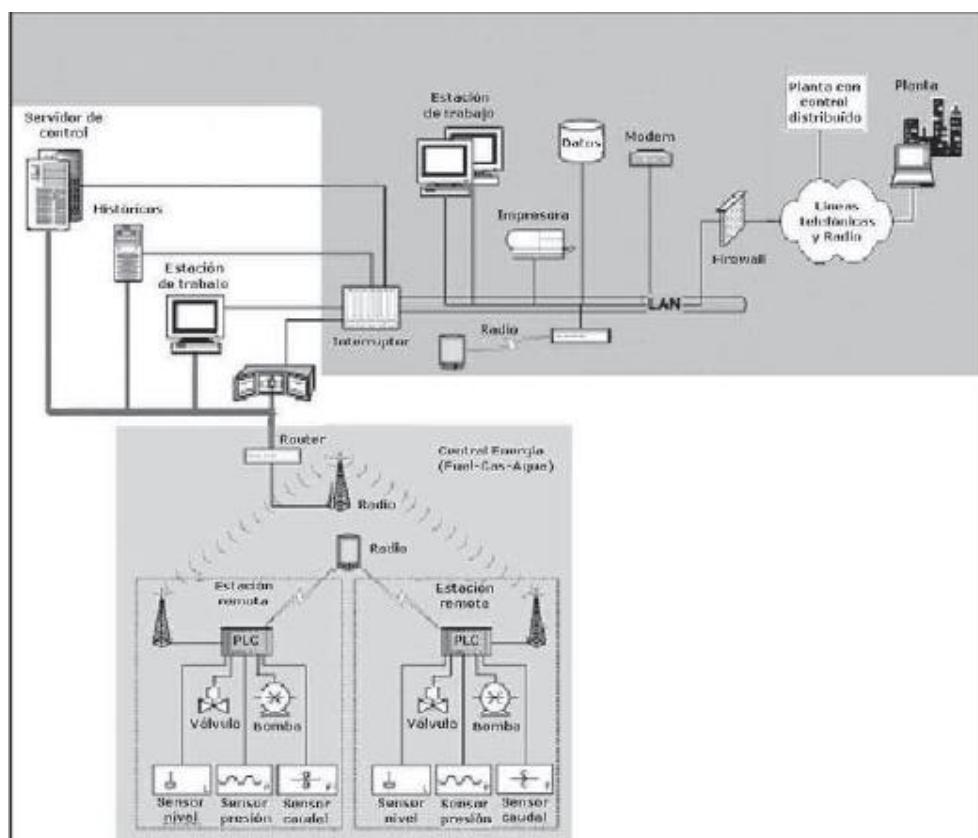
Nota: fuente Creus (2010)

En el control supervisor, nace el término “Control supervisor y adquisición de datos”, conocido comúnmente como SCADA, nombre dado al *software* que efectúa las tareas de enlace con el operario, la estación de operación y la toma de valores históricos, tendencias y expedientes. El SCADA emplea los valores provenientes de planta y muestra los efectos al operario para que se comporte como revisor que empiece acciones ejecutantes. Hoy, las funciones de los sistemas SCADA son muy similares a las que brindan los sistemas

DCS; mientras que el SCADA transfiere a diferentes velocidades estas señales y con baja seguridad para la protección de los valores, el DCS realiza la transmisión mediante circuitos locales de alta velocidad y con seguridad en la transmisión.

**Figura 19**

*Arquitectura de un sistema de control SCADA.*



Nota: fuente Creus (2010)

Lamb (2013), indica que el sistema SCADA utiliza sus paquetes de datos, tanto para controlar los sistemas automatizados como recopilar información de los procesos de planta. Por lo general, este sistema se utiliza en una o varias computadoras y se encuentran en red con los controladores de planta. Los controladores son puntos de recopilación de datos y sirven como una copia de seguridad de la información recopilada. Uno de los principales objetivos del sistema SCADA es archivar y compartir datos, los cuales se recopilan de forma periódica o en base a eventos previamente configurados, ya sea cuando la variable de proceso supera el umbral de alarma. Dichos datos se registran en

plataformas o en base de datos (tales como la base de datos SQL), lo cual permite manipular los datos con fines de análisis estadístico.

Las computadoras, que ejecutan los paquetes de *software* SCADA, están conectadas a los sensores a través de los puertos de comunicaciones del controlador o mediante tarjetas montadas en la misma computadora. Algunos fabricantes han desarrollado sistemas de comunicación híbridos, que colocan una tarjeta informática en un chasis que contiene tarjetas de E/S, esto en lugar de los sistemas estándares. Los sistemas híbridos hacen que el sistema sea más robusto; sin embargo, aumenta el costo del sistema y la dificultad para encontrar las piezas de reemplazo.

#### **2.1.8 Redes industriales**

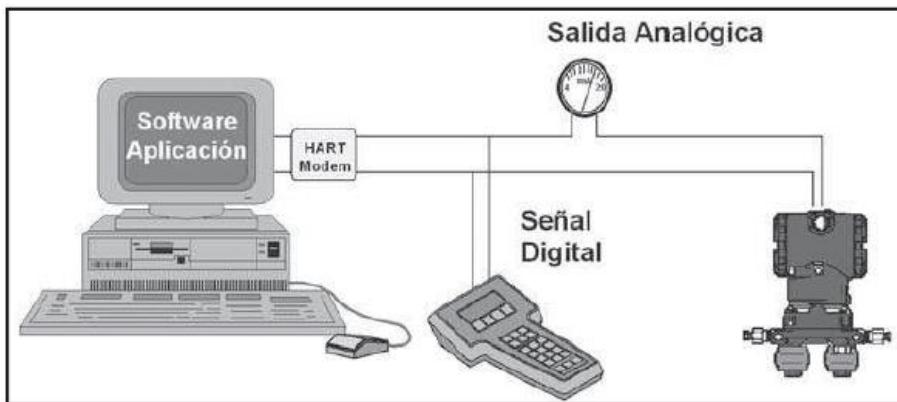
Creus (2010), hace mención que el objetivo de las redes industriales es permitir la conmutación de datos entre los miembros de la planta (ya sean PC, servidores, controladores, entre otros) denominados nodos. Estos nodos se juntan mediante el adecuado cableado eléctrico, uniones, dispositivos electrónicos, y usar los principios fundamentales para la comunicación y protocolos, los transductores necesarios para la conversión entre diferentes protocolos. Inicialmente, los productores de comunicaciones iniciaron con sus sistemas particulares con sus protocolos, en donde no era lograble el intercambio de comunicación con otros dispositivos de otros fabricantes; sin embargo, esto ha ido cambiando por la globalización y la demanda en el mercado, donde los fabricantes empezaron a desarrollar protocolos estándar denominados abiertos, utilizados ampliamente por diferentes empresas hoy en día, de modo que exista compatibilidad entre dispositivos de diferentes fabricantes.

En las redes industriales existen la conexión punto a punto y multipunto. La primera conexión es la que se realiza con el instrumento de forma individual, mediante un convertidor o transductor portátil, que permita la configuración y la lectura del diagnóstico del instrumento. Para ello hay que desplazarse hasta la ubicación física del instrumento y conectarse, esto se realiza cuando el instrumento no funciona bien y hay que validar lo que

está ocurriendo para el mantenimiento correctivo respectivo. En la figura 20, se muestra la comunicación punto a punto en una red industrial.

**Figura 20**

*Imagen de comunicación punto a punto en una red industrial.*



Nota: fuente Creus (2010)

Para la comunicación multipunto se puede acceder a más de un instrumento a la vez. Se dispone de los siguientes tipos: topología de bus, comunicación online, comunicación mediante instrumento inteligente.

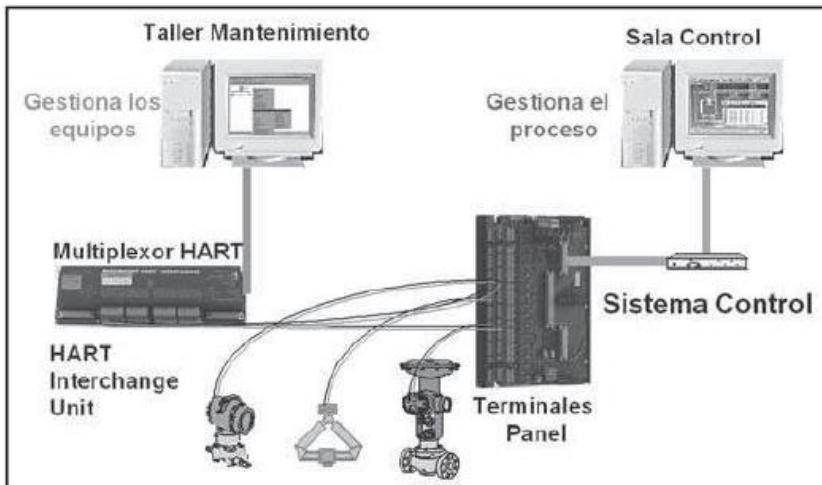
Para la topología del tipo bus se pueden enlazar varios dispositivos por conectores alineados en forma tipo bus, limitado a aplicaciones con baja velocidad de transmisión. Un ejemplo es el protocolo híbrido HART de forma digital y alimentación constante de 4ma.

Para la comunicación *online*, se distribuyen equipos con protocolos diversos que utilizan la onda de 4-20 ma, dividiéndola en dos tipos de salidas: la señal analógica de 4 a 20 ma, utilizada en los sistemas de control, y la señal digital, para el sistema de gestión de los instrumentos, que generan calibraciones, alarmas, diagnóstico de fallas, históricos en los instrumentos.

Para la comunicación mediante instrumentación inteligente, se recibe información de parte del microprocesador del instrumento y pueden realizar diversos tipos de funciones, como configuraciones de equipos, auto test, calibraciones, pruebas de lazo, diagnósticos, estado del instrumento, acciones reparadoras, acciones preventivas, revisión de alarmas.

**Figura 21**

*Imagen de comunicación multipunto del tipo online.*



Nota: fuente Creus (2010)

Dong-Seong y Tran-Dang (2019), afirman que, hoy en día, las industrias buscan lograr el máximo rendimiento de los bienes producidos y, para tal fin, los sistemas industriales se han innovando para mejorar el monitoreo de la productividad, la medición de la calidad y los costos de operación sea lo mínimo posible. Esta innovación ha ocurrido gracias al avance de la información y las comunicaciones, así como la inmersión de unidades automatizadas en las fábricas.

Toda esta automatización requiere un método eficiente para conectarlas y comunicarlas entre sí, transfiere los datos de supervisión a los de monitoreo, lo cual originó al nacimiento de las redes de comunicación en los sectores industriales. Según las funciones especializadas, las redes se componen de tres tipos de componentes para el control: PLC, SCADA y el DCS. En las redes industriales, los datos o las señales de control se transmiten por medios alámbricos o inalámbricos. Para los medios alámbricos, se utilizan cables para la transmisión de datos, ya sean cable con par enlazado, del tipo coaxial, o fibra. Para los medios inalámbricos se usan las señales de radio para la transmisión de datos.

En general, las redes industriales se forman a través de una topología jerárquica que incluye tres niveles básicos: informativo, de control y de dispositivos.

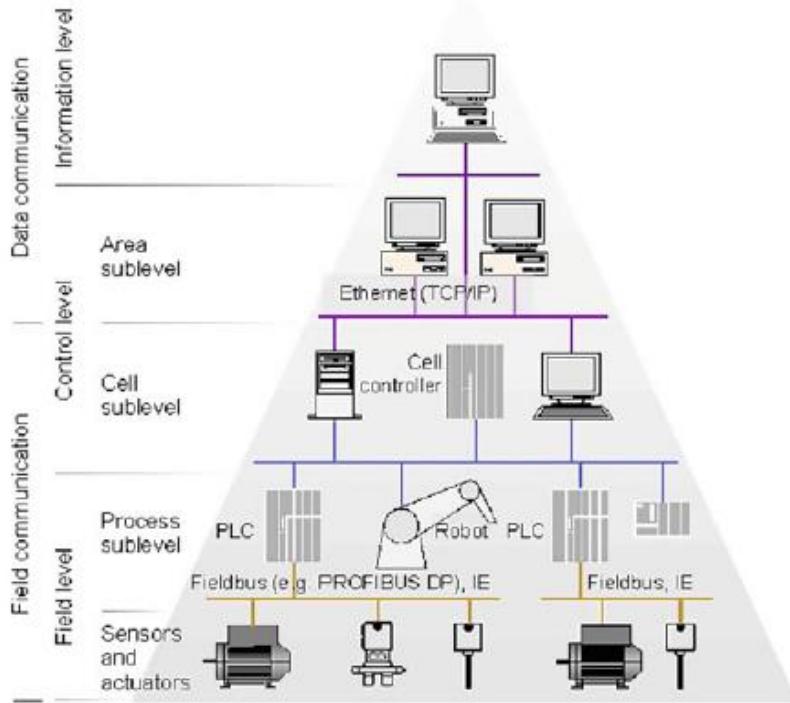
El nivel de dispositivo consta de dispositivos de campo como sensores y actuadores. La misión en esta categoría es trasladar los datos entre estos elementos de campo y los dispositivos de control. El traslado de datos puede ser analógica, digital o análogo-digital. El cable de comunicación dispone de conductores para la alimentación de la señal y para la señal propiamente dicha. Los mensajes suelen ser más pequeños, en comparación con otras redes de comunicación; asimismo, los mensajes se pueden priorizar para que la información más crítica o relevante se transmita primero. Hoy, la tecnología más usada para este nivel es el bus de campo, ya que hace sencillo el control distribuido de varios elementos de planta y sus gobernadores.

El nivel de control involucra redes en las máquinas, donde se implementa la supervisión y toma de datos SCADA. La tarea de esta categoría incluye la programación de los elementos del automatismo, la subida de valores al proyecto y variables de planta, ajustes y *set points* establecidos, la visualización de datos, el archivo histórico, entre otros. Este nivel de red debe cumplir con los requisitos como ser determinista (capacidad de predecir con precisión cuando se entregarán los datos), ser repetible (capacidad de garantizar que los tiempos de transmisión sean consistentes y no se altere por la cantidad de dispositivos conectados a la red), tiempos de acción rápida, transmisiones rápidas, longitudes de valores cortos, simultaneidad de equipos y los valores datos constantemente. La red *Ethernet* con protocolo TCP/IP es la red más utilizada en este nivel.

El nivel informativo es el nivel superior en la arquitectura de redes industriales. Es el encargado de recopilar información en la jerarquía de control. Ocupando muchas magnitudes de valores que no son de uso constante y no son críticos en el tiempo. Las WAN *Ethernet* son las redes que se utilizan más frecuentemente a este nivel. Estas redes se enlazan a otras redes mediante puertas de enlace.

**Figura 22**

*Imagen de niveles de arquitectura en redes industriales.*



Nota: fuente Dong-Seong (2019),

### 2.1.9 Instrumentación industrial

Creus (2010), hace referencia que los procesos industriales de hoy exigen un buen control en la producción de bienes. Como la industria es muy cambiante, es necesario controlar y mantener, en un determinado rango de trabajo, las siguientes magnitudes físicas y químicas, por nombrar a la presión, la temperatura, el nivel, el caudal, la consistencia, entre otros. Los aparatos de medición posibilitan el ajuste de las variantes en mejor estado, las que el operario pueda ejecutar. Al inicio, la producción se realizaba de forma manual de estas variables, utilizan elementos básicos como manómetros, válvulas manuales y termómetros. Esto era idóneo por su facilidad; ergo, la creciente dificultad de la industrial actual ha desarrollado la automatización de la producción a través de los elementos de medición y de control. Estos elementos liberaron a personal operativo que actuaban físicamente en el control de proceso, para formar parte de la supervisión y vigilancia del proceso como tal, y los instrumentos han hecho posible la fabricación de

productos complejos en condiciones estables. Para tal fin, las variables físicas y químicas del proceso deben permanecer estable, en valores variables respecto al tiempo en base a una preestablecida función o respetando la correlación con respecto a otra variante. El control relaciona a la variante, con una meta o con la condición a controlar, y con la rectificación según el error, sin participación del operario. Para llevar a cabo esta corrección por parte del gobernador, es necesario que se incluya el elemento de medición, el gobernador, el dispositivo de control y el proceso en sí. Esta agrupación forma un bucle llamado lazo controlador.

En la instrumentación se han unificado las siguientes definiciones en las terminologías empleadas en este campo. A continuación, se detallan cada una de ellas:

**Rango:** es la agrupación de datos de las variantes en medición, incluidas dentro de los márgenes mayor y menor de las características del instrumento, como por ejemplo un transmisor de presión de 0 a 25 bar. Un término derivado de este concepto es la rangeabilidad, que es el cociente del mayor y menor de la variante del elemento medidor, como una válvula controladora que trabaja de 2% a 100%, tendrá una rangeabilidad 100/2.

**Alcance:** el alcance o el *span* es la desigualdad del valor mayor y menor del rango del elemento de medición, como por ejemplo el transmisor de presión de 0 a 25 bar al hacer la diferencia se calcula que el span es de 25 bar.

**Error:** desviación que se presentan entre las mediciones del instrumento con correspondencia a las medidas fijadas. Se representa como lo visualizado en el elemento de medición menos el valor fijado de la variante en medición.

Error absoluto = Diferencia entre el Valor medido y Valor real

Error relativo = Cociente entre el Error absoluto y Valor real

Si se está en régimen estable, el error se conoce como error estático. Si se está en régimen dinámicas, en donde el error varía notablemente, la instrumentación se alimenta con la energía de la variante medida y este cambio necesita tiempo para ser transmitida, produciendo retrasos en las lecturas de los instrumentos, a este error se le conoce como dinámico.

**Incertidumbre en la medida:** cuando se lleva a cabo el ajuste del elemento de medición con el equipo normado para comprobar que el error calculado por el instrumento corresponde a lo indicado por el fabricante. El equipo normado no calcula el valor real, ya que dispone de un error y, adicional que este proceso interviene múltiples generadores de error, no se puede expresar un único valor, naciendo la incertidumbre. Los generadores de incertidumbre son: condiciones ambientales, lecturas de instrumentos análogos, variaciones en las observaciones repetidas en las mismas condiciones, valores inexactos de los equipos patrones, muestras no representativas.

**Exactitud:** característica del elemento de medición en la que encamina a dar lecturas cercanas al número verdadero de lo medido. También se define como el nivel de consenso de lo medido al valor ideal.

**Precisión:** característica de un instrumento con lecturas muy similares entre ellas, es el nivel de propagación de las mediciones. Los equipos están fabricados para ser precisos, y con cada cierta frecuencia estos terminan por descalibrarse, se deben hacer reajustes. Nombrado también como repetibilidad.

**Zona muerta:** zona donde la variante mantiene la indicación o la señal saliente del elemento, la zona en la cual no hay cambios por parte del elemento.

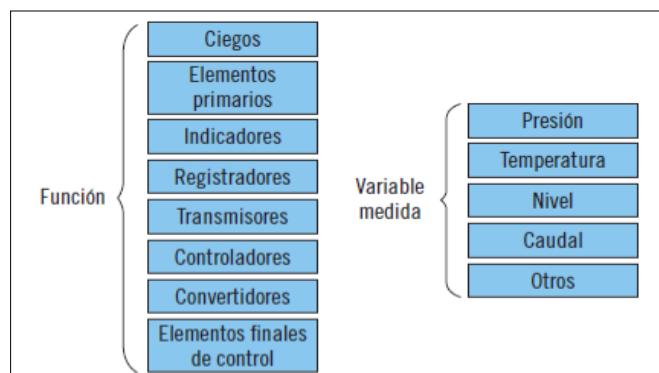
**Sensibilidad:** cociente entre la creciente de la señal saliente, y el creciente de la variante que provoca este incremento en la salida luego del estado de reposo. La definición de sensibilidad es que es el número menor al que llega la variante para una modificación que se mida en el instrumento.

**Histéresis:** desigualdad mayor donde se ve lo medido por el instrumento o la señal de salida para el mismo dato, cuando la variante va en todo el rango en ambas direcciones: ascendente y descendente. El término de zona muerta está incluido en la histéresis.

**Resolución:** menor desigualdad del dato que el medidor puede identificar. En los elementos análogos donde se distinga la posición del registrador. En los elementos digitales es el variación de la variante en el dígito del visor del elemento. En la figura 23, se muestra la clasificación relacionada a la instrumentación industrial.

**Figura 23**

*Imagen de la clasificación de la instrumentación industrial.*



Nota: fuente Rojano (2014)

Creus (2010), indica que los elementos de medida son relativamente engorrosos, su definición se comprende si están incluidos dentro de una ordenación correcta. Considerados distribuciones básicas: la primera asociada con la finalidad del elemento y la segunda asociada a la variante de la planta. En base al funcionamiento del medidor, se clasifican en los siguientes:

**A. Medidores ciegos:** instrumentos sin valor visible de la variante medida. Son considerados elementos de alarma, en mención: termostatos y presostatos, que gozan de una escala externa con elección de la variante. No tienen visor, los elementos de temperatura, nivel, presión y caudal que no presentan indicación alguna, en la figura 24 se muestran ejemplos de ellos.

**Figura 24**

*Imagen instrumentos ciegos.*



Nota: fuente Creus (2010)

**B. Elementos indicadores:** gozan de un indicador, rango ajustado o indicador digital que dan lo medido en dígitos, en el que se lee el valor de la variante.

**Figura 25**

*Imagen instrumentos indicadores.*

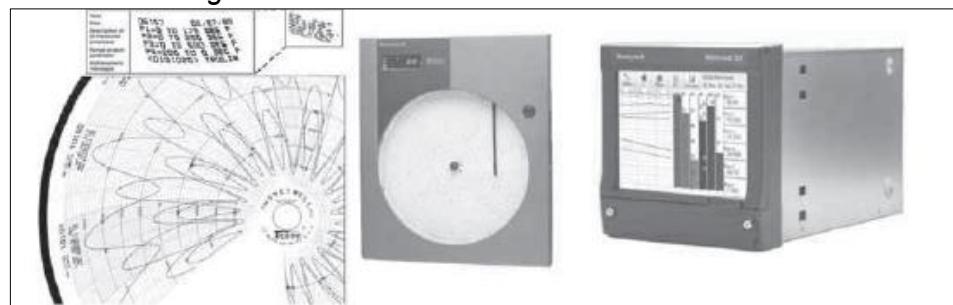


Nota: fuente Creus (2010)

**C. Elementos registradores:** registran de forma continua a la variante, su visor es alargado, circular, rectangular. Los registradores gráficos circulares con 1 revolución en 1 día, en contraste de los registradores de forma rectangular, que obtienen una rapidez de 20 mm/hora. Los registradores digitales con un costo de operación reducido son más exactos incorporando funciones de captura de datos, por los que son los más usados hoy en día. En la figura 26, se muestran ejemplos de ellos.

**Figura 26**

*Imagen instrumentos registradores.*



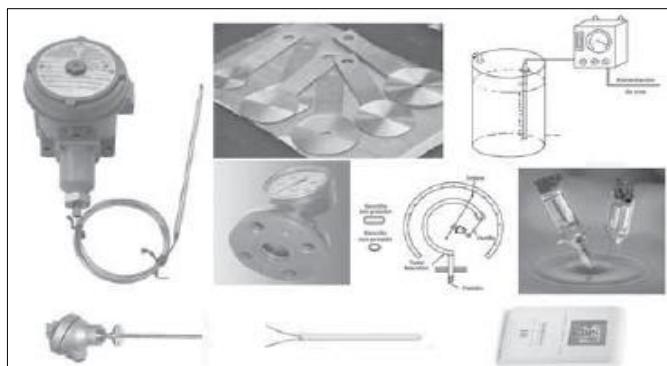
Nota: fuente Creus (2010)

**D. Sensores o elementos primarios:** Perciben el dato de la variante de la planta y remiten ondas salientes. El elemento sensorial puede ser pieza de otro elemento como, un equipo transmisor, o disgregado en partes. Denominado elemento primario o detector,

ya que está enlazado de forma directa con la variante, absorbiendo potencia de la planta proporcionando a la planta una recomendación en solución al cambio en la variante evaluada. Dicha consecuencia generada por el componente son por la variación de medida eléctrica, fuerza, posición. En la figura 27, se muestran ejemplos de elementos primarios.

**Figura 27**

*Imagen sensores o elementos primarios.*



Nota: fuente Creus (2010)

**E. Transmisores:** recolectan la variante de la planta medida por el componente sensor y la difunden como ondas neumáticas de 3 a 15 psi u ondas eléctricas de 4 a 20 mA de intensidad. La onda digital es la más empleada y capaz para las conexiones, empleando protocolos normados. El sensor puede formar parte integral, o no, del transmisor. En la figura 28, se muestran ejemplos de transmisores.

**Figura 28**

*Imagen transmisores.*



Nota: fuente Creus (2010)

**F. Transductores:** obtienen una onda entrante, transformándolas a una onda saliente; en otras palabras, transforman la energía entrante a otra clase de energía saliente. Por mencionar: un componente primario, un transmisor, un conversor de planta a intensidad, un conversor de planta a señal neumática, entre otros.

**Figura 29**

*Imagen transductor de potencia eléctrica.*



**G. Convertidores:** dispositivos que toman la onda entrante de origen neumático (3-15 psi) o de origen eléctrico (4-20 mA c.c.) originado por un medidor y posterior a tratarla remiten la onda de forma normada. Por nombrar: un conversor de onda neumática a onda eléctrica, un conversor de onda eléctrica a onda neumática. En la figura 30, se muestra un ejemplo.

**Figura 30**

*Imagen convertidor de corriente a presión.*



**H. Controladores:** relacionan la variante gobernada (caudal, velocidad, nivel) con una variante meta y producen un acto corrector en concordancia con el error. La variante gobernada puede ser recibida de forma directa por controladores locales o de forma indirecta en apariencia de onda neumática, eléctrica o digital generada por un transmisor. En la figura 31, se muestra ejemplos de controladores.

**Figura 31**

*Imagen controladores.*

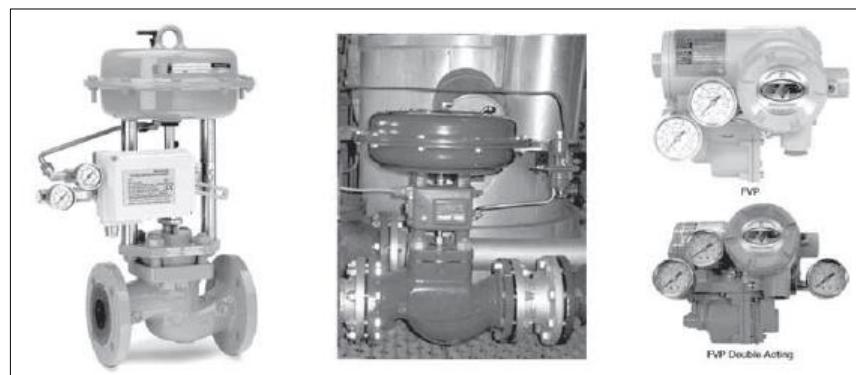


*Nota:* fuente Creus (2010)

**I. Actuadores o elementos finales de control:** reciben la onda del gobernador y modifican su colocación, variando a la variante gobernada. En la acción neumática, el actuador es una válvula neumática, que efectúa su corrección de 3 a 15 psi. En la regulación, las válvulas son accionados a través de un conversor de onda eléctrica a onda neumática o con onda digital que transforma la onda eléctrica de 4 a 20 ma c.c. a neumática de 3 a 15 psi. En la regulación eléctrica, el actuador es una válvula con motor que ejecuta su movimiento activada por un servomotor eléctrico. Para regulación de temperatura en hornos eléctricos se utilizan rectificadores de silicio, conocido como tiristores. En la figura 32, se muestran ejemplos de actuadores.

**Figura 32**

*Imagen actuadores o elementos finales de control.*



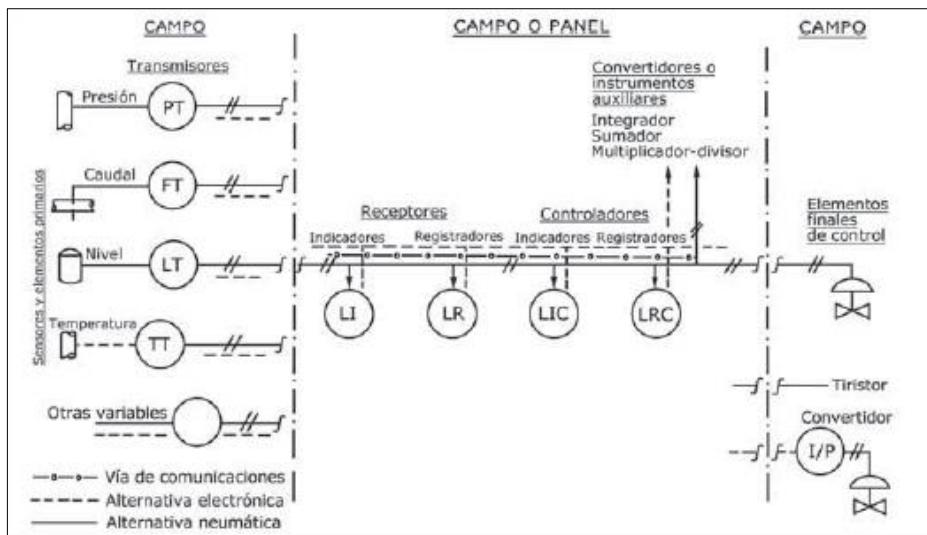
Nota: fuente Creus (2010)

En base al funcionamiento del instrumento, se agrupan en medidores de temperatura, presión, caudal, velocidad, consistencia, nivel. Esta clasificación corresponde específicamente al tipo de la señal medida, siendo autónoma en la transformación de la onda de la planta. Ergo, un transmisor eléctrico de presión del tipo diafragma es un medidor de presión pese a que las variaciones de presión modifican la fuerza en el diafragma y no en el trasmisor. Se puede considerar como un instrumento de medición de presión o de flujo, un instrumento de medición de temperatura.

Se clasifica a los instrumentos según su ubicación en la planta como instrumentos de campo y de panel. Los medidores de planta incluyen a los elementos locales situados en la misma producción o su contorno., en contraste con los elementos de panel montadas en zonas alejadas o a una distancia de la producción.

**Figura 33**

*PI&D Instrumentación de campo y de panel.*



Nota: fuente Creus (2010)

### 2.1.10 Control proporcional integral y derivativo PID

Creus (2010), indica que, en el origen de la etapa industrial, las plantas eran gobernadas a través de tanteos, intuiciones y la pericia del operador. Años después, los mercados exigieron mayor precisión en el control de estas variables, que originó el desarrollo de teorías y estudios analíticos para el control de las variables de procesos.

Un lazo tradicional está constituido por un transmisor, un gobernador y un elemento controlador. El transmisor es un receptor de la señal de planta y la reconfigura en una onda neumática o eléctrica para destinarla al gobernador, relacionando la variante en medición con el valor meta deduciendo así el error. Para reducir o eliminar este error, el gobernador normaliza el desarrollo dinámico del lazo con actos ejecutantes, métodos y técnicas de control. El elemento final de control recibe una señal de salida de parte del controlador para modificar la variable medida al valor deseado. Como se menciona, hay muchos tipos de algoritmos de control, siendo uno de ellos el control PID (Proporcional integral y derivativo), que hasta el día de hoy es uno de los controles más usados por su simplicidad y por su eficacia para el control de variables.

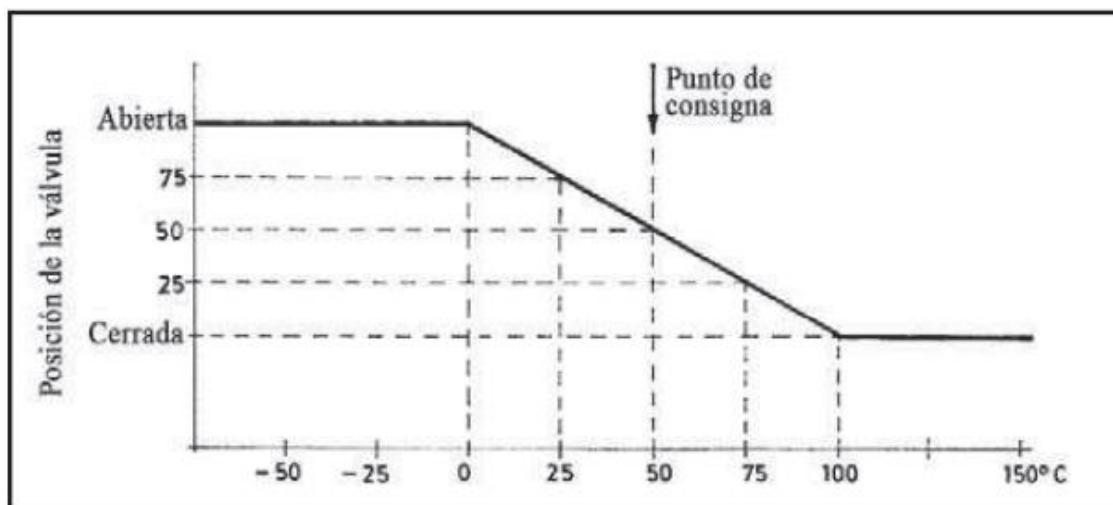
**Actividad proporcional (P):** en este algoritmo, se halla una correspondencia lineal entre la variante gobernada y el elemento de control; por nombrar, la válvula varía por cada unidad de desvío, o el movimiento de la válvula es contrario a la variante gobernada.

La ganancia es la correspondencia entre el cambio de la onda saliente al elemento de control y el cambio de la onda entrante proveniente del sensor o transmisor.

El ancho proporcional es la inversa de la ganancia, en su momento fue muy común en los gobernadores neumáticos y eléctricos, a la fecha están fuera de circulación. En la figura 34, se muestra la acción del control proporcional.

**Figura 34**

*Diagrama de la acción del controlador proporcional (ganancia = 1).*



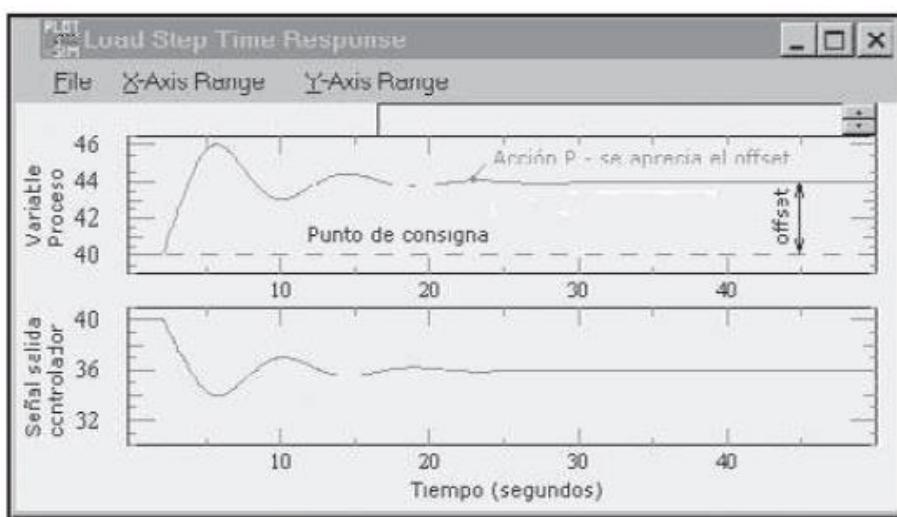
Nota: fuente Creus (2010)

La actividad proporcional presenta un gran problema, que es el alejamiento seguido de la variante una vez normada correspondiente al valor meta, denominado *offset*.

El *offset* puede mermarse acortando el ancho proporcional o acrecentando la ganancia, con excepción de que este acto no genere inconsistencia a la planta. El alejamiento se aminora rectificando de forma manual el dato meta; ergo, una desconocida alteración que se produzca desencadenara un nuevo *offset*. En la figura 35, se muestra el efecto del *offset* en el control proporcional.

**Figura 35**

*Diagrama del efecto del offset en el control proporcional.*

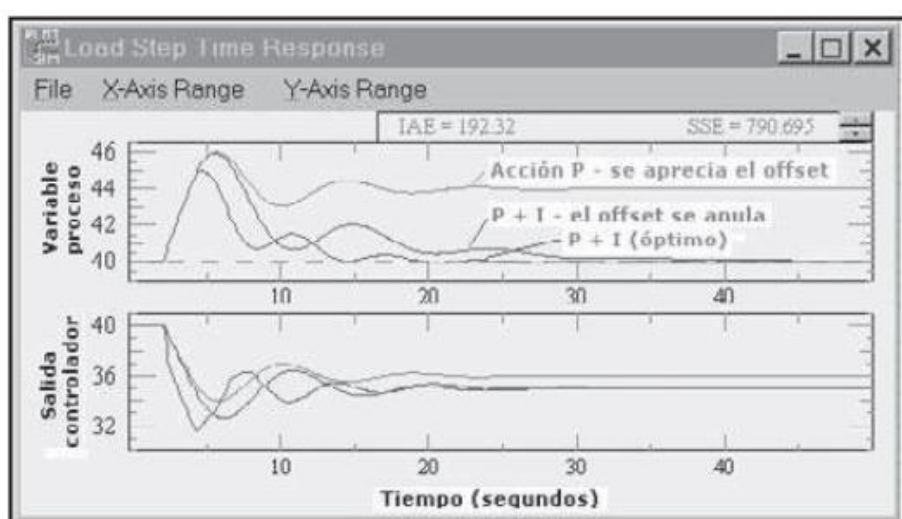


Nota: fuente Creus (2010)

**Actividad proporcional integral (PI):** el algoritmo integral ingresa cuando hay una diferencia entre la variante de la planta y el dato meta, incluyendo la diferencia en el tiempo y añadiendo a la actividad proporcional. Se identifica por el tiempo del acto expresados en minutos por reproducción. La finalidad de este acto es mermar el *offset* de la actividad proporcional, solo debe utilizarse cuando la variante sea equivalente al dato meta.

**Figura 36**

*Diagrama de la respuesta del controlador PI a un cambio de consigna.*



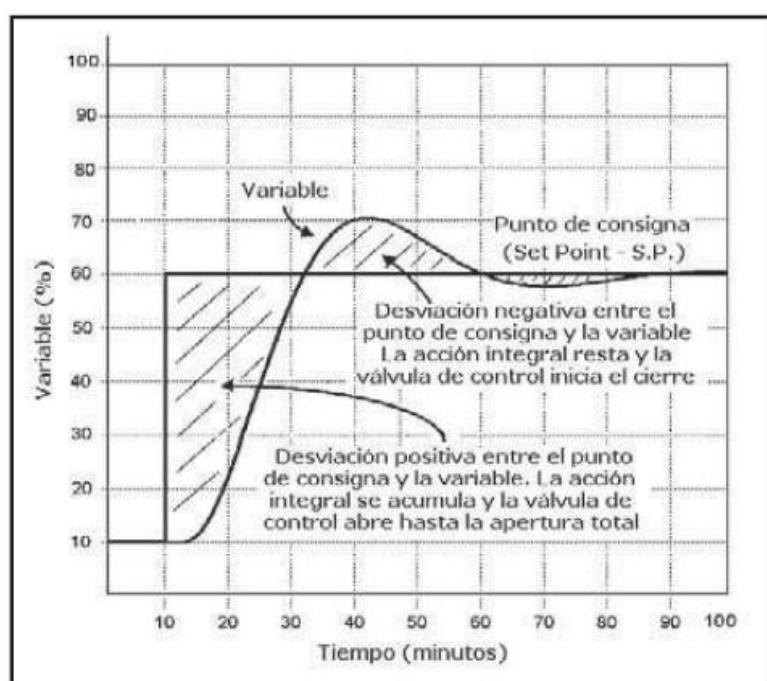
Nota: fuente Creus (2010)

En este tipo de control, existe el fenómeno de congestión integral establecida cuando la variante queda excluida de las fronteras del ancho proporcional. La actividad integradora da ingreso a que la onda saliente se congestione, con dato mayor y menor, por ello la variante medida debe superar el dato meta para que la modificación de signo, el alejamiento, modifique la onda saliente del gobernador. El producto es un gran cambio de la variante medida, que se reduciría mermando la actividad integral del gobernador.

Una característica de los controladores proporcionales e integrales es que, al arranque de planta, se dé un desbordamiento del dato meta. Cuando la variante medida supera al dato meta, se cambie el signo del desvío, y el gobernador integrador decrece la onda al actuador, en un número adecuado para mermar el offset.

**Figura 37**

*Diagrama del efecto de saturación en un controlador integral.*



Nota: fuente Creus (2010)

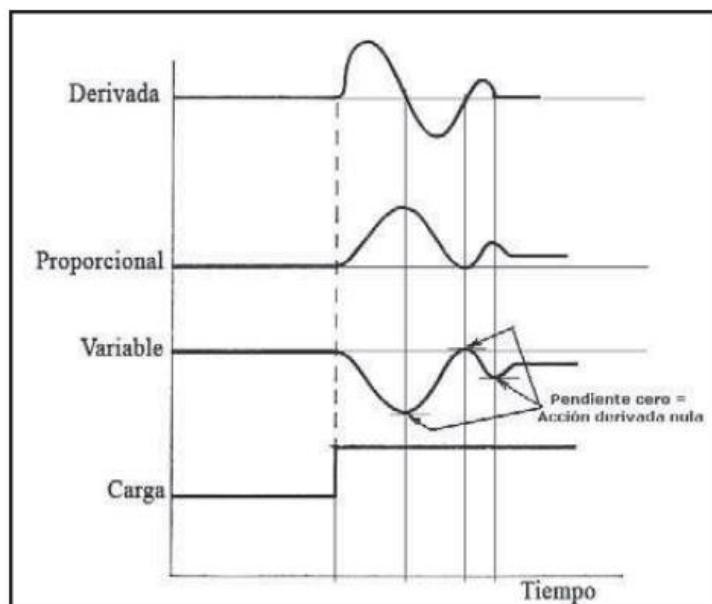
**Actividad proporcional derivativo (PD):** el control derivativo existe en una conexión lineal prolongada entre la rapidez de alteración de la variante gobernada y la ubicación del actuador. La actividad derivativa ingresa cuando existen alteraciones en la variante gobernada. La actividad derivativa se representa por el tiempo de la actividad

derivativa, el cual es el intervalo de tiempo en minutos mientras, la alteración de la onda de saliente del gobernador, por la actividad proporcional, nivela al desvío de la onda a causa de la actividad derivativa en el momento se emplea una onda tipo rampa.

Si la variante se reforma en tipo rampa, la función derivada es un número, adicionada a la actividad proporcional, gesta una recta con pendiente proporcional más la derivativa.

**Figura 38**

*Diagrama del efecto del control proporcional y derivativo.*



Nota: fuente Creus (2010)

La actividad derivativa es conveniente cuando hay demoras en el flujo del elemento final de control y la trascendencia en la variante gobernada. Un tiempo de actividad derivativa amplio, trae como consecuencia que la variante gobernada se altere rápidamente y supere al dato meta con una fluctuación que no siempre podrá ser atenuada. Una actividad derivativa muy amplia origina oscilaciones. Un tiempo derivativo muy reducido genera que la variante oscile excesivamente con correspondencia al valor meta. El tiempo inmejorable a la actividad derivativa es el que devuelve la variante gobernada al valor meta con las menores fluctuaciones.

La funcionalidad de la actividad derivativa acrecienta la ganancia del gobernador durante las variaciones de la variante, contrapesando el retardo inherente del proceso y posibilita una ganancia mayor y por consiguiente un offset inferior. La actividad derivativa ayuda al rebasamiento de la variable controlada en el arranque del proceso. Así mismo permite un ágil restablecimiento de la variante en respuesta a una alteración en el proceso.

En la figura 39, se muestra la oscilación en la acción derivativa.

**Figura 39**

*Imagen de la acción derivativa excesiva con oscilaciones en la salida del controlador.*



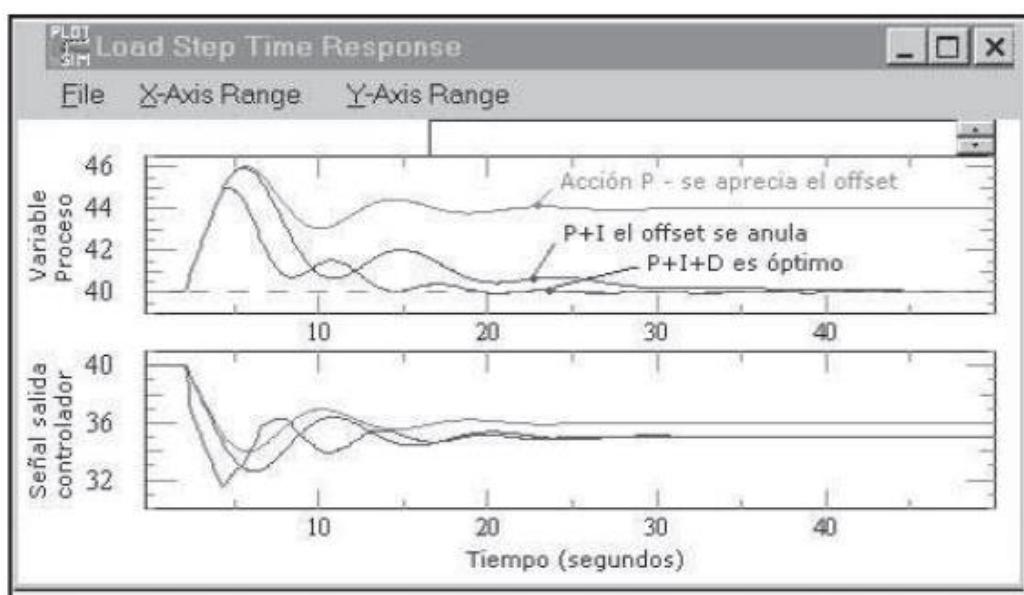
Nota: fuente Creus (2010)

**Actividad proporcional integral derivativo (PID):** al cohesionarse las tres actividades proporcional, integral y derivativa se da lugar a este control. La actividad proporcional cambia la ubicación del actuador, proporcionalmente a la diferencia de la variante medida con respecto al valor meta. La onda proporcional traslada al actuador, acompañando a las oscilaciones en la variante medida multiplicando a la ganancia. Un aumento de la ganancia encamina a una creciente actividad proporcional y una respuesta más veloz. La actividad integral desplaza al actuador a una rapidez en proporción a la diferencia con relación a valor meta, la onda integral es la que repite la onda proporcional conforme el tiempo integrativo. Un decremento del tiempo integral brinda una acción

integral superior y mayor velocidad en el control. La actividad derivativa rectifica la ubicación del actuador en correlación a la velocidad de cambio de la variable, la actividad derivativa prevé la ubicación del actuador a consecuencia de la actividad proporcional en función al tiempo derivativo. Un aumento del tiempo derivativo eleva la actividad derivativa y brinda más rapidez en la respuesta. La onda que arriba al actuador es la adición de las señales de las actividades proporcionales, integrales y derivativas.

**Figura 40**

*Diagrama de la acción proporcional, integral y derivativa en un controlador.*



Nota: fuente Creus (2010)

## 2.2 Marco conceptual

Desarrolla los conceptos de máquina papelera, caldero pirotubular, tanque desaireador para calderas, cilindro secador o yankee para máquinas papeleras, sistema de secado por vapor en máquina papelera y la instrumentación que la gobiernan.

### 2.2.1 Máquina papelera

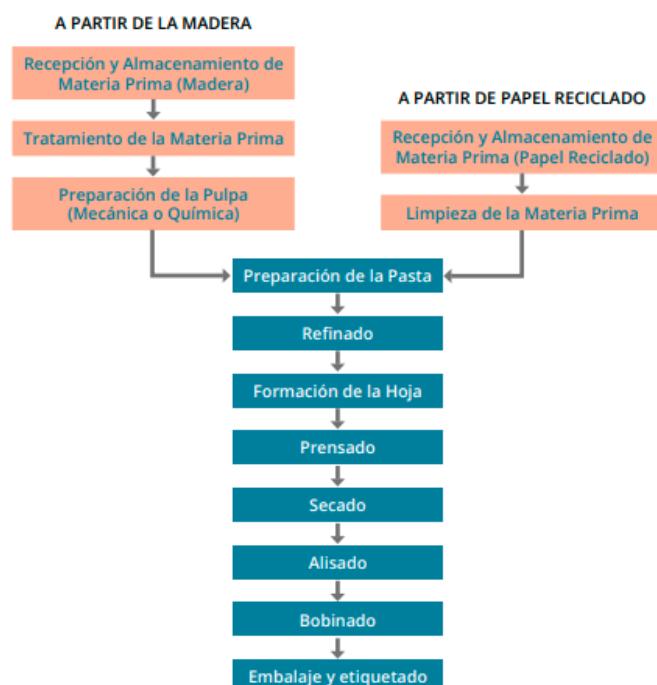
El Ministerio de Energía y Minas del Perú define a una máquina papelera como la industria que procesa materia prima como fibras vegetales de celulosa y papel reutilizado, que se mezclan para formar una hoja de papel resistente y flexible. Conforme a la

preparación de celulosa, cada uno de los tipos da paso a diversas clases de papel conforme a sus particularidades. Conforme a la aplicación final del papel, en su preparación se emplean mezclas de fibras diversas, contribuyendo a las peculiaridades del papel final. En la figura 41, se muestra el flujo del proceso productivo en una máquina papelera.

**Figura 41**

*Flujo de los procesos productivos en máquina papelera.*

#### Proceso Productivo de una Industria Papelera



*Nota:* fuente [https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/1214202/rd\\_283-2020-produce-dgaami.pdf](https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/1214202/rd_283-2020-produce-dgaami.pdf)  
(Fondo Nacional del Ambiente Perú)

**Entrada y acopio de madera:** la corteza arriba a la planta en aspectos de troncos, para extraer la corteza.

**Empleo de la madera:** la madera se convierte en troncos, para convertirse en pasta de papel a través de varios subprocessos. Los troncos pasan por el descortezado, debido a que las cortezas con baja fibra presentan un elevado grado de impurezas.

**Preparativos de la pulpa:** la madera procesada, continua varios caminos para elaborar pulpa, dividiendo en dos categorías de pulpa: la pulpa química y la mecánica. Otra

distribución se consigue según su tratamiento: de fibra larga y de fibra corta, con diferencia en el de fibra larga es más elástico, con aplicación en el papel periódico.

**Elaboración de la pasta:** se lleva a cabo en el *pulper*, que es una licuadora de considerable magnitud, al mezclarse con agua forma la pulpa. Al incorporarse la pulpa celulósica y el papel reciclado, da inicio a la disgregación por impacto entre la hélice y la fricción de la fibra. Al salir del *pulper*, pasa por una rendija que filtra las secciones considerables.

**Refinado:** la pulpa llega a la refinación originando la fibrilación y por la combinación con químicos las fibras se juntan. Seguidamente se mezclan con blanqueadores, encolantes, que contribuyen superiores atributos en el papel.

**Constitución del papel:** debido a los adelantos tecnológicos en máquinas papeleras de alta velocidad, se incluyen los sistemas *Brechas en la Formación*, basado en la separar la pasta de la caja de entrada, introduciéndolas mediante boquillas lo largo de las telas, concediendo el desagüe en paralelo, posibilitando mayor homogeneidad en el papel.

**Secado por prensado:** formado el papel, prosigue la eliminación del agua. Esto se da en la etapa de prensado en una máquina papelera. La hoja continúa con elevado contenido de agua, por ello cruza rodillos, que reducen el volumen para la expulsión de agua. La hoja se adhiere a los recubrimientos del fieltro succionando agua en la prensa. Al término, el nivel de agua está entre un 40 a 50 %.

**Secado por vapor:** se constituyen de una cadena de cilindros o solo un cilindro conocido como *Yankee*. El cual es calentado con ayuda de vapor, sobre el yankee atraviesa la hoja para ser secada. Los cilindros se agrupan contactando primero con una banda del papel y posterior con la otra, logrando un secado homogéneo. En la figura 42, se muestra un cilindro secador *Yankee*.

**Figura 42**

*Fotografía del cilindro secador Yankee de la empresa Toscotec.*

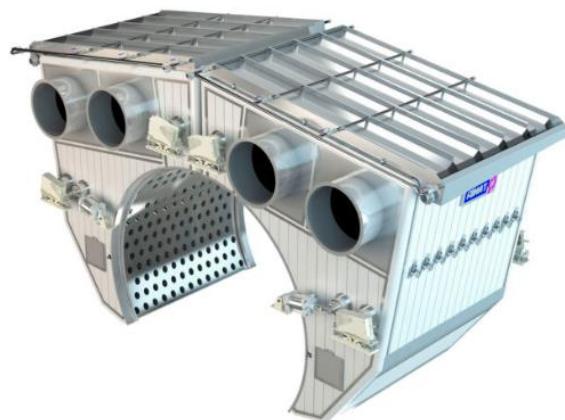


Nota: fuente <https://www.toscotec.com/en/news-article/toscotec-fires-up-its-200th-ty-syd/>

**Secado por aire caliente:** al mismo tiempo que la hoja de papel atraviesa por el secado de vapor en una estructura que envuelve al cilindro principal denominada Capota, la cual sopla aire caliente accionada por dos grandes ventiladores, el aire caliente se forma en la combustión de dos quemadores de combustión. El flujo de aire caliente entra en contacto con la hoja de papel para aportar al secado de la hoja, el aire húmedo retorna al sistema para nuevamente calentarse e iniciar nuevamente el ciclo. En la figura 43, se muestra la capota o *Yankee Hood*.

**Figura 43**

*Fotografía de la capota o “Yankee Hood” de la empresa Fomat.*

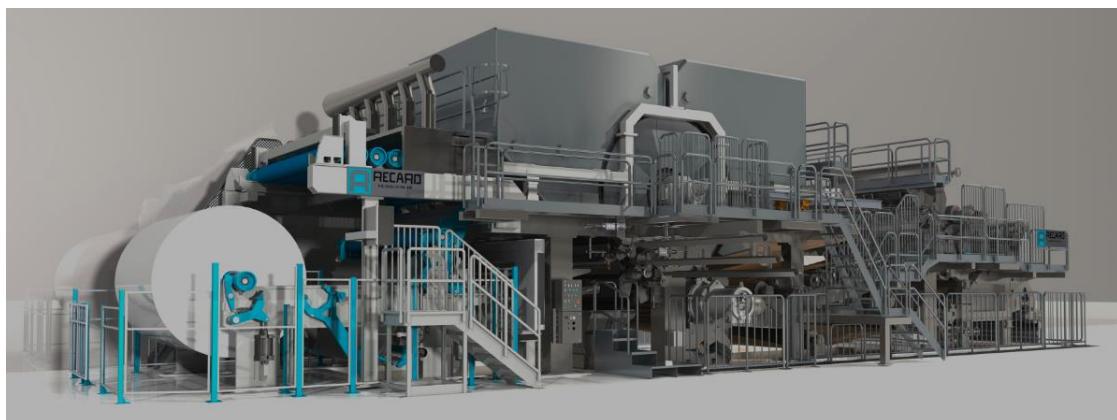


*Nota:* fuente <https://www.papnews.com/insight/fomat-systems-and-technology-for-paper-mills/>

**Bobinado:** el papel concluye en el pope o la bobinadora, en manera de una bobina tipo jumbo. En esta etapa, la hoja se corta y se enrolla según la producción.

#### **Figura 44**

*Imagen de máquina papelera fabricada por la empresa Recard.*



*Nota:* fuente <https://www.recard.it/es/productos/maquinas-para-tisu/>

#### **2.2.2 Caldero pirotubular**

Según el Ministerio de Salud del Perú, define una caldera o generador de vapor como un recipiente metálico cerrado, abastecido de energía calorífica, ideado para originar vapor a distintas presiones. En la caldera se forma el calor gestado con el combustible y los vapores ardientes se desplazan interiormente en los conductos y externamente circundado por agua. Se dividen en calderas horizontales y verticales, calderas con cámara exterior e interior.

Por su diseño se organizan en calderas de espalda mojada y seca. Las de espalda seca son de dos o cuatro etapas, fabricadas con ladrillos cerámicos y refractarios preservando la puerta posterior de la llama. Las de espalda mojada circundada por una cámara de agua en la parte trasera. Conforme a la ubicación de los ductos, las calderas son horizontales y verticales, y fabricadas de uno a tres pasos.

El vapor de agua se establece cuando el agua transita de fase líquida a gaseoso. Existen términos para el vapor, nombrados vapor húmedo, saturado y sobre calentado. El vapor húmedo es el vapor generado que contiene moléculas de agua con coexistencia de

líquido y vapor. El saturado cuando está en fase gaseosa al 100%. El vapor sobrecalentado establecido por el sobrecalentamiento del vapor saturado logrando un grado mayor al de congestión.

#### Figura 45

*Imagen de caldero pirotubular de la marca Johnson Controls.*



Nota: fuente <https://www.latam.johnsoncontrols.com/es/hvac-equipment/chillers/yvwa-water-cooled-variable-speed-screw-chiller>

Los componentes de las calderas pirotubulares son cuerpo o envolvente, hogar o flue, placa portatubos, tubos de humo, chimenea.

**Cuerpo o envolvente:** cilindro fabricado en plancha de acero, el tamaño va relacionado acuerdo a la potencia. Consta de una cámara de agua y cámara de vapor.

**Hogar o flue:** se da lugar a la combustión ya sea por petróleo o gas natural, siendo el lugar más caliente de la caldera. La cámara de la caldera es interior o exterior. La cámara se divide según su ubicación, según el tipo de combustible y según su construcción. Según su ubicación se clasifica en hogar interno (cuando el hogar se encuentra en el interior de la envolvente de la caldera) y hogar externo (cuando el hogar se encuentra fuera de la envolvente de la caldera). Según el origen del comburente, hay cámaras para sólidos, líquidos y gaseosos, así como cámaras lisas y corrugadas. En la figura 46, se muestra la imagen del *flue* de una caldera.

**Figura 46**

Fotografía del flue de una caldera pirotubular de la marca Energypack.



Nota: fuente <https://www.calderasformacion.com/el-hogar-de-la-caldera-industrial/>

**Placas:** placas metálicas con orificios para alojar ductos de fuego y la cámara, ubicada en la parte delantera o trasera, arriba o abajo.

**Registros o compuertas:** aberturas que posibilitan el registro y el mantenimiento de la caldera. Conforme a su dimensión se dividen en registro de mano y de hombre. El registro de hombre o *man hole* es una abertura con el ancho para permitir el acceso de un hombre para actividades de mantención. El registro de mano o *hand hole* es una abertura para el ingreso de la mano y que permite la inspección y el lavado interior.

**Tubos de humo:** en las calderas pirotubulares, nombrados también ductos de fuego, por donde transitan los vapores calientes, el agua se encuentra en la parte exterior.

**Chimenea:** ducto por donde salen, a la atmósfera, los gases calientes de la combustión.

**Columna de nivel de agua:** depósito cilíndrico hueco, que constituye un depósito intermedio entre la caldera y el tubo visor de nivel o la columna de nivel del tipo electrodo para el control de nivel. Está instalada de forma vertical y comunicada en la parte superior a la cámara de vapor. La columna de agua cuyo objetivo principal evitar que se registren

en el tubo visor los constantes y excesivos movimientos que dispone el agua al interior de la caldera.

**Control de nivel:** dispositivo complementario al control del nivel de agua. Con función de mantener los niveles de agua dentro de la caldera de vapor, utilizando varillas o electrodos protegiendo de esta forma el funcionamiento de la caldera sin agua.

**Quemador:** componente de mezcla del combustible y el oxígeno. Debe estar a la rapidez, turbulencia y concentración conveniente para la combustión. En el quemador para líquidos con función principal de pulverizar el combustible en finas gotas, se introduce la suficiente cantidad de aire para realizar la combustión. En el quemador a gas, se introduce el gas combinado con el aire y con una centella generar la llama. Existen también del tipo dual o mixto, que utilizan al gas como el petróleo diésel. Los quemadores disponen de los siguientes componentes:

**El ventilador:** provee aire al flujo y presión conveniente para producir la llama.

**Motobomba:** impulsa al petróleo y acrecienta la presión.

**Sistema de ignición:** mediante un transformador de alto voltaje, genera la chispa para iniciar la combustión.

**Fotocélula:** dispositivo electrónico que detecta la presencia de llama y, en caso contrario, corta el ingreso de combustible.

**Boquillas o toberas:** permiten pulverizar el combustible para la combustión.

**Motor o modutrol:** se encarga de la modulación del combustible y aire a mezclarse. Es un instrumento que recibe una onda eléctrica y la transforma en movimiento a 90 grados en el quemador.

**Electrobomba de alimentación de agua:** su función básica consiste en succionar el agua blanda, al bajar el nivel mínimo de operación e ingresarla a la caldera, venciendo la presión y flujo al interior de esta.

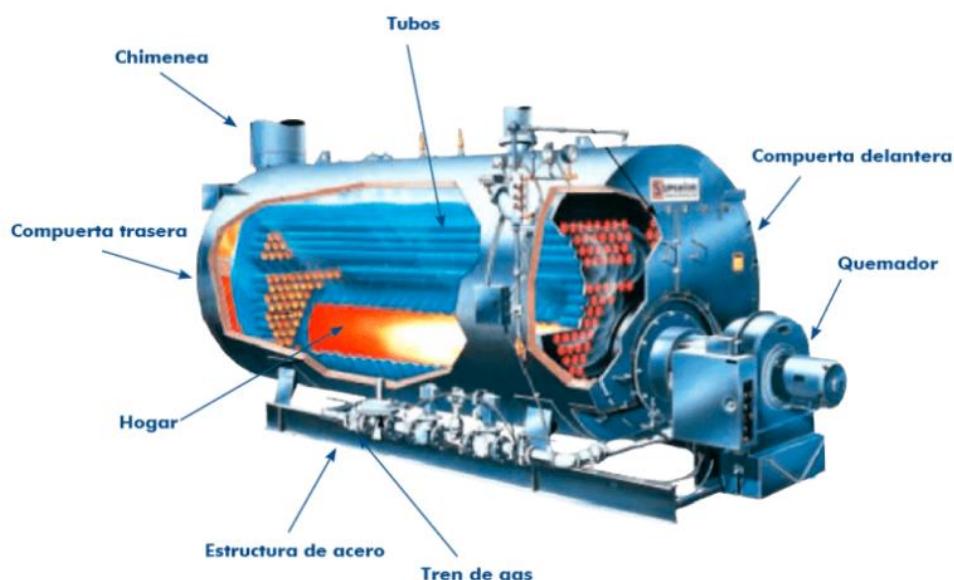
**Programador:** dispositivo electromecánico o electrónico que permite programar, configurar y controlar el funcionamiento de una caldera en sus diversas etapas y en función de la demanda de vapor, como las etapas de pre barrido, encendido, funcionamiento en

llama baja, llama media y en llama alta, parada por demanda de vapor, y reinicio del funcionamiento cuando hay consumo de vapor.

**Tren de gas:** módulo que regula la presión de gas antes de ingresar al quemador. El tren de gas viene equipado con los siguientes componentes: válvulas solenoides, válvula primaria cierre de gas, válvula secundaria cierre de gas, válvula de venteo, interruptor de baja y alta presión de gas. En la figura 47, se muestra las partes de una caldera pirotubular.

**Figura 47**

*Imagen de partes de una caldera pirotubular de la marca Johnson Controls.*



*Nota:* fuente <https://www.latam.johnsoncontrols.com/es/hvac-equipment/chillers/yvwa-water-cooled-variable-speed-screw-chiller>

### 2.2.3 Tanque desaireador

Según el Ministerio de Producción del Perú, los tanques desaireadores se emplean comúnmente en cualquier industria en donde se utilicen calderas, para alimentar de agua al caldero. La finalidad es mermar oxígeno en el agua de alimentación antes de acceder al caldero.

Los tanques desaireadores, se sustentan en La ley de Henry, evidencia que la separación del vapor se modifica directamente a la presión parcial. La ley de separación contraria del agua, demuestra que cuando calienta el agua, decrece la proporción de

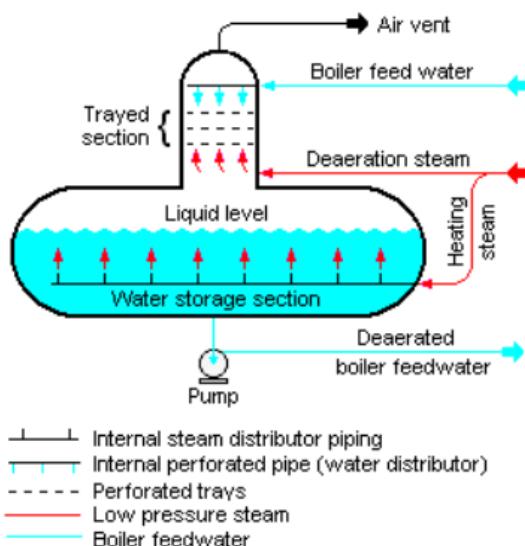
oxígeno en el agua, introduciendo vapor al tanque, decrece el oxígeno y se mermán gases del agua.

Existen dos clases de tanques desaireadores: el modelo bandeja y el modelo rociador.

**Modelo bandeja:** poseen bandejas taladradas dentro de la zona de arriba. El agua del desaireador accede en las bandejas perforadas en contacto con el vapor, posteriormente accede al área de acopio horizontal donde el vapor atraviesa un tubo para extraer gases y sostener la temperatura del agua.

**Figura 48**

*Imagen de estructura de tanque desaireador tipo bandeja.*

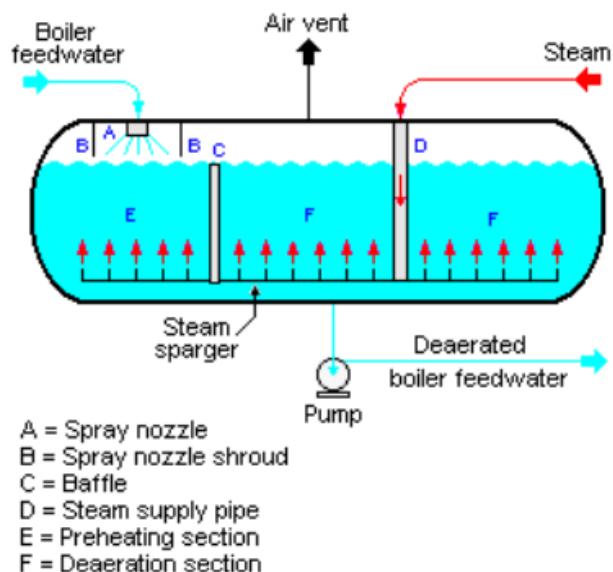


Nota: fuente <https://www.mastersi.com.pe/mastersi/blog/245-principio-de-funcionamiento-del-desaireador-tipos-y-control-de-procesos>

**Modelo rociador:** contiene una boquilla con la función de rociar el vapor en el ingreso del agua, calentando y dirigiéndose al área de acopio, adicionando vapor para sostener la temperatura en el agua. En la figura 49, se detalla tanque tipo rociador.

**Figura 49**

Imagen de estructura de tanque desaireador tipo rociador.



Nota: fuente <https://www.mastersi.com.pe/mastersi/blog/245-principio-de-funcionamiento-del-desaireador-tipos-y-control-de-procesos>

Las principales fuentes del tanque desaireador son: el agua blanda proveniente de los ablandadores, y el vapor proveniente del condensado de las calderas o el vapor recuperado del proceso. En la figura 50, se muestra tanque desaireador.

**Figura 50**

Fotografía de tanque desaireador de la marca Hurst.



Nota: fuente <https://www.mastersi.com.pe/mastersi/blog/245-principio-de-funcionamiento-del-desaireador-tipos-y-control-de-procesos>

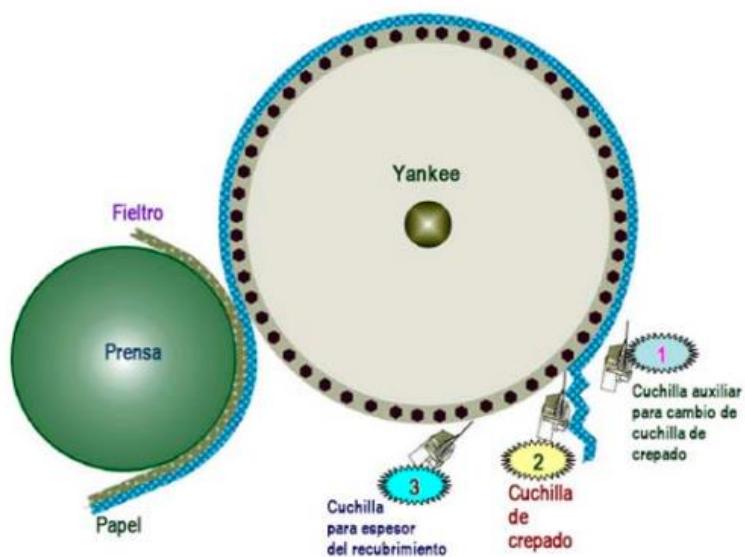
#### 2.2.4 Cilindro secador o yankee

El yankee diseñado para el secado de papel a grandes velocidades en la máquina. El cilindro secador es parte clave para el secado. Trabaja con el vapor caliente proveniente de la caldera de vapor, hace que el cilindro seque el papel húmedo y, una vez secos, puede ser embobinado en formas de jumbos de papel.

El yankee, *componente de gran envergadura*, fabricado con hierro fundido, combinándose con vapor para calentarla. Por ser un recipiente a presión, con dispositivos de seguridad como válvulas de alivio, que están diseñadas para actuar ante una sobrepresión. El yankee trabaja en conjunto con la prensa de succión formando un rodillo para el secado, la hoja de papel pasa a través de estos dos rodillos, en la parte superior al rodillo yankee y por la parte inferior al rodillo de la prensa de succión. El yankee da lugar al proceso conocido en las maquinas papeleras como secado por vapor, el cual se complementa con el proceso secado por aire. En la figura 51, se muestran las cuchillas crepeadoras.

**Figura 51**

*Imagen de la ubicación de las cuchillas en el yankee para el proceso de crepado.*

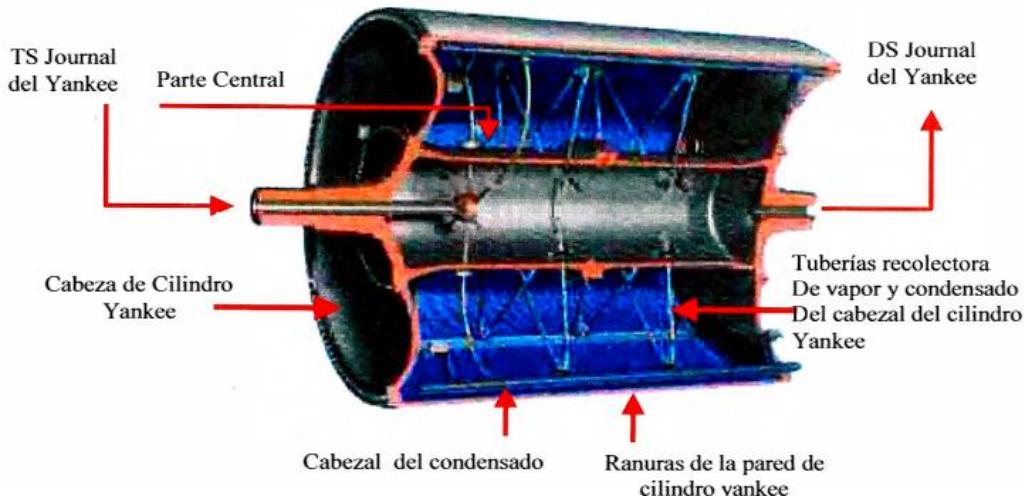


Nota: fuente <https://www.recard.it/es/productos/maquinas-para-tisu/>

El yankee es usado como zona base para las crepeadoras. El yankee incluye tres cuchillas en esta zona: la cuchilla crepeadora, desviadora y la limpiadora. El cilindro requiere recubrimiento encima de su superficie para asegurar que perdure en el tiempo. Es importante mantener la uniformidad en el recubrimiento del yankee para la adhesión adecuada del papel. En la figura 52, se muestra las partes del cilindro secador.

**Figura 52**

*Imagen de partes del cilindro secador yankee.*



Nota: fuente <https://www.recard.it/es/productos/maquinas-para-tisu/>

El yankee proporciona el secado al papel evaporando el exceso de agua. Una vez que el vapor ingresa por la caja de vapor, es racionado de forma homogénea por el aro repartidor. El vapor accede al yankee con una presión que varía entre 6.0 a 9.0 bares, y con una temperatura que va desde los 180 hasta los 220°C. Cuando este vapor caliente entre en contacto con la pared al interior del yankee, este se condensa.

Las causas que alteran la recopilación de agua en el yankee son: la rapidez de la máquina, el tipo de la shell o coraza, el tipo de pared interna ya sea liso o ranurado, la envergadura del yankee y la extracción del agua. Existen diferentes formas de condensado a diferentes velocidades del yankee, que dependen directamente de la velocidad de la máquina como el tipo charco, el tipo cascada y el tipo anillo.

**Figura 53**

Fotografía de cilindro secador de la marca Andritz.



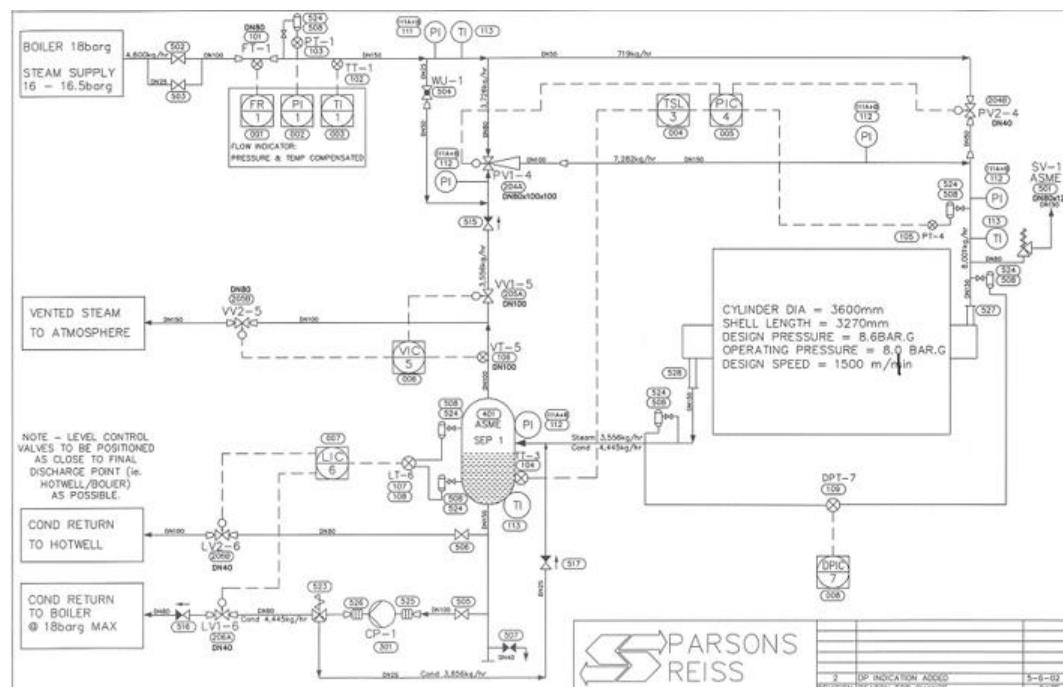
Nota: fuente <https://www.andritz.com/newsroom-en/pulp-paper/2020-11-27-kartogroup-primedry-steel-yankee>

### 2.2.5 Sistema de secado por vapor en máquina papelera

El sistema de secado por vapor, consta de los siguientes componentes: yankee, termocompresor, control de presión de vapor, control de velocidad de vapor, tanque de vapor *flash* y el control de nivel de vapor *flash*.

**Figura 54**

Diagrama PI&D del sistema de secador por vapor en máquina papelera.

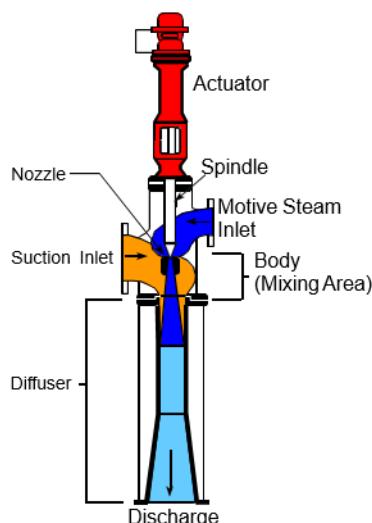


El vapor proveniente de la caldera ingresa al sistema de secado de vapor por el control de presión de vapor, con función de reducir y mantener en un valor fijo la presión de vapor. Parte importante del control de presión de vapor es el termocompresor, que es una válvula de tres vías gobernada por un actuador neumático del tipo diafragma activado por la señal de un posicionador electrónico. El termocompresor, a través de su abertura, es capaz de regular la presión y el flujo de vapor que ingresará al *yankee*, así como cambiar la velocidad de extracción del vapor *flash* y puede ocasionar inestabilidad en la extracción del condensado. Las dos funciones principales del termocompresor son el control de la presión al ingreso del *yankee* y la recuperación del vapor *flash* al *yankee*.

Para el diseño del termocompresor se referencia la máxima tasa de condensado en el *yankee*, el flujo de vapor de alimentación del termocompresor, el flujo en el lado de succión del termocompresor, el flujo y la presión de vapor motriz en la caldera, presión de trabajo del *yankee* y la presión propuesta en la succión del termocompresor. La presión de vapor en las calderas debe ser mayor a 13.5 bares, ya que se han tenido problemas en la fabricación y el rendimiento de los termocompresores a estos valores de presión. En la figura 55, se muestra las partes del termocompresor.

### Figura 55

*Imagen de partes y componentes del termocompresor.*



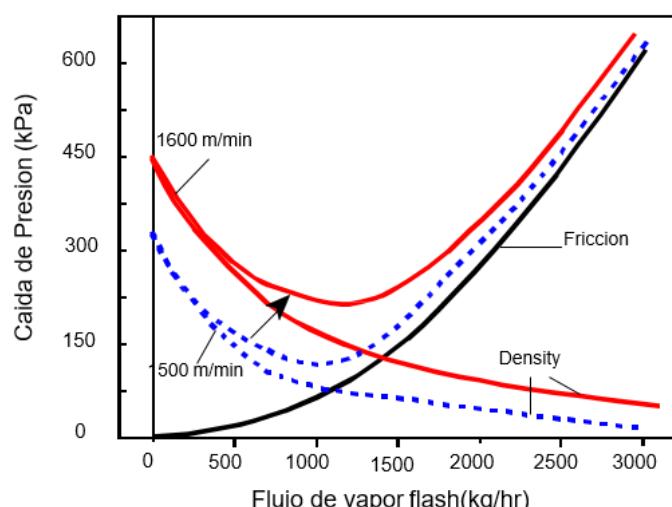
Nota: fuente <https://vaporparalaindustria.com/optimizacion-energetica-con-recuperacion-de-vapor-flash-y-termocompresor/>

El vapor *flash* se obtiene del control de velocidad de vapor para retirar el condensado, que se forma al interior del *yankee*. El condensado es controlado por la velocidad y el flujo del vapor. Para una remoción de condensado estable, la velocidad del vapor *flash* debe ser mayor a los 21 metros/segundo, disminuir la densidad del vapor e incrementar la presión de ingreso. Otra forma del control de la extracción del condensado es a través de la presión diferencial del *yankee*, la cual se obtiene como diferencia entre la presión de vapor al ingreso al *yankee* con respecto a la presión de salida del mismo.

La densidad del condensado del vapor varía inversamente a la presión de vapor. Es decir, a mayores presiones de vapor, se obtienen menores densidades del vapor y mejores resultados en la extracción de condensado. En el caso de presiones menores de vapor, se obtienen mayores densidades del vapor que hacen más difícil el proceso de extracción. Se debe compensar el efecto de la densidad de vapor con el incremento de la velocidad; es decir, que a menores densidades de vapor mayor debe ser la velocidad de extracción. Para obtener una extracción constante, con varios valores en las presiones de vapor, se necesitarán varios valores en las velocidades de extracción.

**Figura 56**

*Diagrama del efecto del incremento de velocidad de extracción del condensado.*

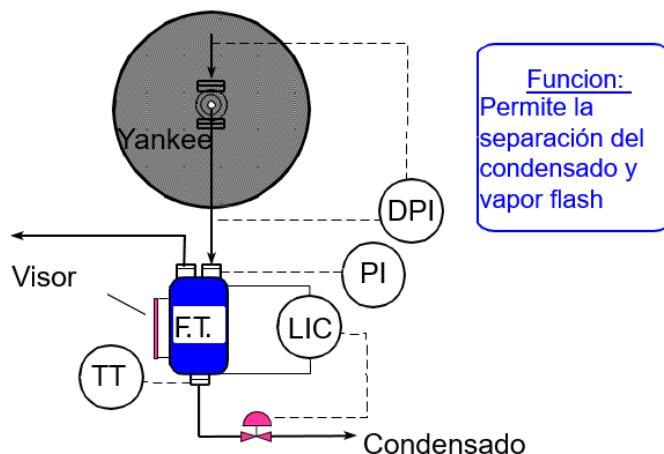


Nota: fuente <https://vaporparalaindustria.com/optimizacion-energetica-con-recuperacion-de-vapor-flash-y-termocompresor/>

Una vez que el vapor condensado se extrae del *yankee*, pasa al tanque de vapor *flash* o tanque de condensado, con función de la separación del vapor *flash* y el condensado de vapor. El vapor *flash* retornará nuevamente al sistema, mientras que el condensado será usado para la alimentación de agua en la caldera. En el tanque de vapor *flash* se da lugar al control de nivel en el tanque, el cual debe mantener en un valor fijo y estable el nivel del condensado en el tanque, para que también el vapor *flash* se aloje en el tanque, logra así que dos de las fases del vapor se formen en el tanque. De no haber un buen control en el nivel, no será la posible el alojamiento del vapor *flash*, que afecta el secado en el papel.

**Figura 57**

*Diagrama control de nivel en tanque flash.*



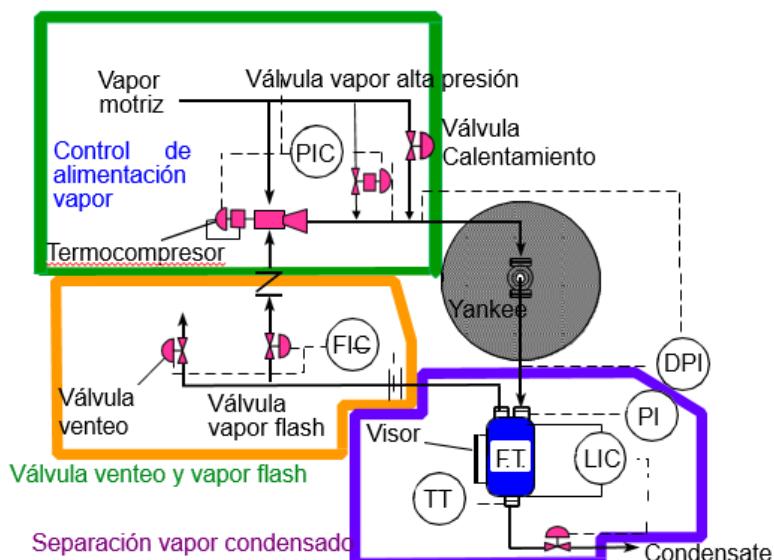
Nota: fuente <https://vaporparalaindustria.com/optimizacion-energetica-con-recuperacion-de-vapor-flash-y-termocompresor/>

El condensado, en el tanque, retorna al caldero a través de dos formas: por la línea principal o por la línea auxiliar. Por la línea principal, el condensado es impulsado a través de una bomba de alta presión para ingresar de forma directa al caldero, a una mayor presión de trabajo del caldero. Por la línea auxiliar, el condensado es impulsando por la propia presión del vapor *flash* al interior del tanque, ingresa al tanque desaireador de la caldera.

El vapor *flash* sale del tanque de condensado e ingresa al sistema de control de velocidad de vapor, el cual a través de las aberturas de dos válvulas de control logra establecerse en un valor y forma la velocidad del vapor *flash*, para así obtener una mejor eficiencia en la extracción del condensado en el yankee; además, que el sistema responda a las variaciones de la presión en el ingreso de vapor. Una parte del vapor *flash* retorna al sistema a través del termocompresor por la tercera vía, la cual se combina con el vapor de la caldera que proviene por la primera vía o ingreso del termocompresor. Otra parte del vapor *flash* va al ambiente, solo cuando se ha originado desperfectos en el control de nivel y no ha sido posible mantener estable el nivel de condensado en el tanque. Es allí donde se opta por purgar este condensado al ambiente para reestablecer las condiciones iniciales del sistema, logra que el vapor *flash* ingrese nuevamente al control de velocidad de vapor, que mejora el proceso de secado en el papel. En la figura 58, se muestra los controles de presión, nivel y flujo en el secado por vapor.

**Figura 58**

*Diagrama control de presión, nivel y de velocidad en sistema de secado por vapor.*



Nota: fuente <https://vaporparalaindustria.com/optimizacion-energetica-con-recuperacion-de-vapor-flash-y-termocompresor/>

## **2.2.6 Instrumentación en sistema de secado por vapor**

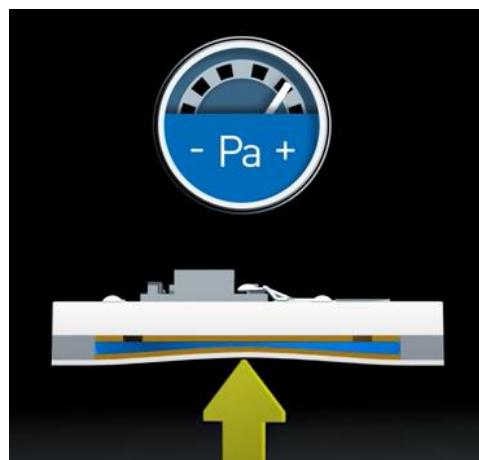
En el secado por vapor, se dispone los instrumentos tales como transmisores de presión del tipo diafragma de la marca ABB, transmisores de temperatura de la marca Endress Hausser, transmisores de flujo del tipo vórtex de la marca Yokogawa, transmisores de presión diferencial de la marca ABB, termocompresor con actuador del tipo diafragma y posicionador de la marca ABB, válvulas de control de bola segmentada con actuador de tipo piñón y cremallera y posicionador electrónico de la marca Neles.

**Transmisor de presión del tipo diafragma:** existen los transmisores de presión con membrana absoluta o relativa, con presión hidrostática o presión diferencial. Galileo Galilei hizo pruebas con bombas para superar las diferencias de altitud para fines de riego. Evangelista Torricelli realizó investigación con las columnas de mercurio y descubrió el estado del vacío. Blas Pascal unificó ambos experimentos, determinó el peso de aire y la denominó presión. Por ello, el sistema internacional, en honor a él, puso estas unidades para la medición de presión.

Los medidores de presión pueden utilizarse para detectar presión absoluta y presión relativa, así como la medición de presiones variables y el nivel de líquidos en depósitos o tanques. La presión se puede medir de forma continua en las tuberías que contienen líquidos. Los transmisores usan una membrana cerámica, que contiene un elemento eléctricamente conductor y se aplica un sustrato de cerámica formando así un condensador, a medida que se aplica presión el diafragma se deforma y provoca un cambio en la capacitancia. En un transmisor de presión absoluta, la célula de presión es un sistema cerrado y asigna como referencia el vacío para realizar la medición; mientras que, en un transmisor de presión relativo, la célula de presión relativa con una apertura en sustrato cerámico permite la compensación de la presión atmosférica. En la figura 59, se muestra este principio de medición.

**Figura 59**

*Imagen del principio de medición de presión en un transmisor del tipo diafragma.*

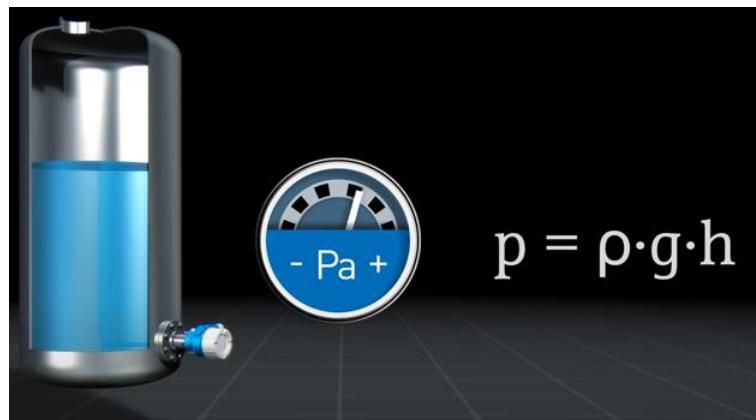


Nota: fuente <https://www.mx.endress.com/es/instrumentacion-campo>

**Transmisores de nivel por presión hidrostática:** en la medición de presión hidrostática, el líquido en el tanque actúa sobre la membrana de proceso del sensor. La gravedad hace que se incremente la presión a medida que se incrementa la columna del líquido, esta presión ejerce la columna del líquido proporcional al nivel del líquido y la densidad del líquido. En un tanque abierto, la presión está referenciada a la presión atmosférica, por lo que el gas en la zona superior del tanque no afecta la medición del nivel; además, la presión atmosférica actúa sobre la columna de nivel, así como el sensor de presión. Cuando se requiera compensar la presión atmosférica, se opera con un sensor de presión relativa. Para este tipo de aplicaciones, el transmisor lleva la célula de medición basada en la tecnología de silicio, desarrollado especialmente para la medición de nivel por presión hidrostática. Las resistencias se aplican a un chip de silicio en forma de Puente de Wheatstone, que, a medida que se aplica presión, el diafragma se deforma y provoca un cambio en las resistencias. En el sensor se dispone con aceite incomprensible, el cual se encarga de transmitir la presión del diafragma hasta el chip de silicio que se analiza. En la figura 60, se describe este principio de medición.

**Figura 60**

*Imagen del principio de medición de nivel en un transmisor de presión hidrostática.*



Nota: fuente <https://www.mx.endress.com/es/instrumentacion-campo>

En el cálculo de presión por diferencia en un tanque cerrado, la presión de la atmósfera no interfiere al cálculo. Además de la medición de la columna del líquido, también se mide la presión por encima del nivel, ambos valores se transfieren al transmisor a través de los capilares con aceite de relleno. El transmisor calcula la diferencia entre las dos presiones y calcula el nivel en el tanque.

**Figura 61**

*Imagen principio de medición nivel en un transmisor de presión diferencial.*



Nota: fuente <https://www.mx.endress.com/es/instrumentacion-campo>

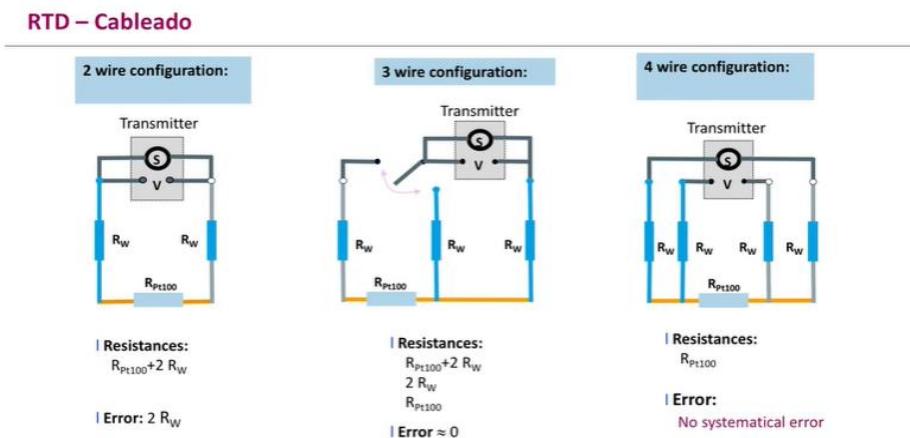
**Transmisor de temperatura con sensor RTD o termopar:** el elemento principal de un medidor de temperatura es el sensor. Este se encuentra en la punta del inserto y puede ser un sensor termopar o RTD.

El RTD es un elemento que varía su resistencia conforme varía la temperatura. Los RTD de coeficiente positivo aumentan su valor de resistencia si aumentan la temperatura, los RTD de coeficiente negativo disponen del efecto inverso. El RTD más usado en la industria es el PT100: el PT por el elemento platino y los 100 equivalen a 100 ohmios a una temperatura de 0°C. Otros RTD usados son el PT1000 y el NI10.

Hay dos tecnologías en los RTD. La tecnología *Wire Round*, donde el platino se encuentra enrollado como si fuera una bobina, genera la resistencia óhmica con un rango de aplicación desde -200°C hasta 600°C. La otra tecnología, conocida como *thin film*, es un sensor mucho más pequeño comparado con la otra tecnología, donde el platino está localizado en finas capas sobrepuertas una con otra, con rango desde -50°C hasta 400°C. Es menor a la tecnología anterior, pero más resistente a las vibraciones. Los RTD pueden ser de dos, de tres o de cuatro hilos: el más usado es el de tres hilos. El termopar es un sensor de contacto, fabricado colocando dos metales diferentes unidos en un extremo que se conoce como junta caliente y el unido en el otro extremo, conocido como junta fría. La punta caliente es donde estará el termopar en contacto con el proceso y, cuando mayor temperatura se obtenga, mayor milivoltaje generará, conocido como el efecto *Seebeck*. Los termopares se encuentran identificados por letras, los más comunes son el tipo K, el tipo J, tipo T. Para aplicaciones por encima de los 1500°C, se usan los tipos R, tipo S y tipo B. Los termopares se conocen por la aleación de los materiales. Cada sensor con campo de aplicación, el RTD dispone de una mejor exactitud que los termopares; sin embargo, en aplicaciones mayores a los 600°C se usarán los termopares. En la figura 62 y 63, se detalla sobre este principio de medición.

**Figura 62**

Imagen de tipos de cableado en los sensores de temperatura del tipo RTD.



Nota: fuente <https://www.mx.endress.com/es/instrumentacion-campo>

**Figura 63**

Imagen de tipos de termopares o termocuplas según rango de medición.



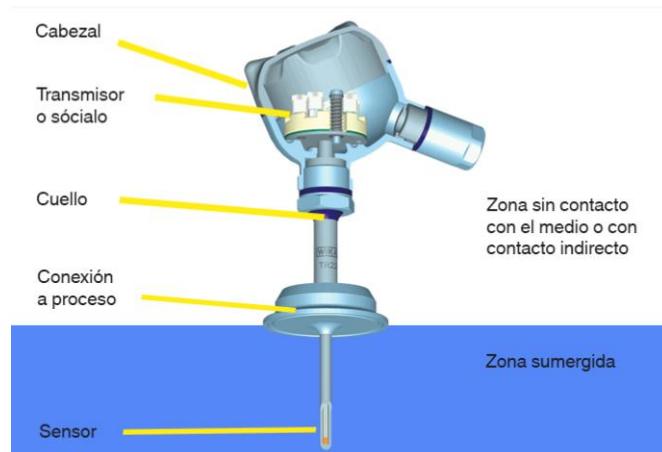
Nota: fuente <https://www.mx.endress.com/es/instrumentacion-campo>

El medidor se encuentra dentro de un tubo que se conoce como vaina o inserto. Dentro de ese inserto y el sensor, hay un material aislante que puede ser óxido de magnesio u óxido de aluminio para mayor flexibilidad y que los cables que estén internamente no sufran corrosión. El sensor está en contacto directo con el proceso, o dentro de un termopozo. Hay dos tipos de termopozo: el termopozo *pipe termo Weld*, que es un termopozo muy delgado, ideal para ambientes medianamente corrosivos y para ambientes con corrosión más agresiva se usa el tipo *barestock*. La conexión al proceso

puede ser roscada, bridada o para conexiones alimenticias. Posteriormente, se dispone del cuello del elemento de temperatura, el cual conecta las partes húmedas y la conexión del proceso con el *housing*. El cuello también ayuda a disipar la temperatura cuando se obtienen temperaturas altas en el proceso, ayuda a aumentar el tiempo de vida en los transmisores. Los transmisores se encuentran dentro del *housing*, con función el de la protección de los transmisores. Para los *housing* se disponen de diferentes tipos de materiales como plástico, aluminio o acero inoxidable. El instrumento transforma la onda del RTD o termopar a onda digital con un bus de campo con diferentes protocolos.

**Figura 64**

*Imagen de componentes de un transmisor de temperatura.*



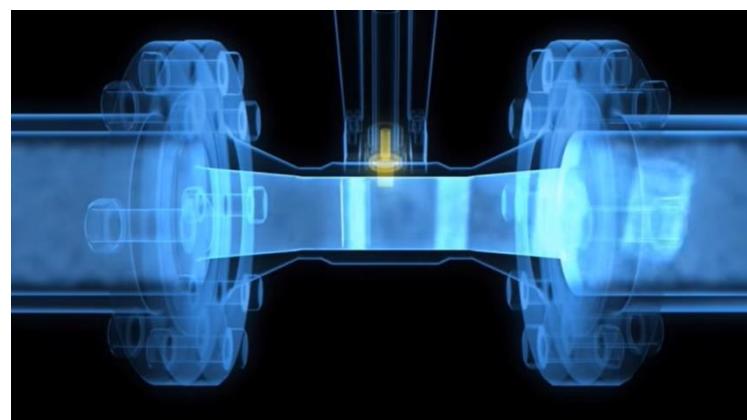
Nota: fuente <https://www.mx.endress.com/es/instrumentacion-campo>

**Transmisor de flujo del tipo vórtex:** los líquidos que recorren los ductos con peculiaridades diversas, demandan distintos algoritmos para su cálculo, como el principio del vórtex. Leonardo Da Vinci experimentó con los vórtices formados en el agua. Dentro de cada caudalímetro de vórtice, se encuentra un cuerpo denominado barra de vertido en el medio del ducto, este cuerpo obtura al líquido, posterior hay un sensor mecánico que registra las variaciones de presión más pequeñas en el líquido. Cuando el líquido comienza a moverse y alcanza caudal, gradualmente aparecen vórtices. Las oscilaciones de presión coinciden con las oscilaciones de los vórtices.

La separación entre dos vórtices sucesivos se relaciona a una capacidad del líquido; ergo, contando los vórtices generados se deduce el flujo total, cuanto más grande es la rapidez del líquido, más grande será las oscilaciones de los vórtices. En la figura 65, se describe este principio de funcionamiento.

**Figura 65**

*Imagen del principio de medición del caudalímetro del tipo vórtex.*

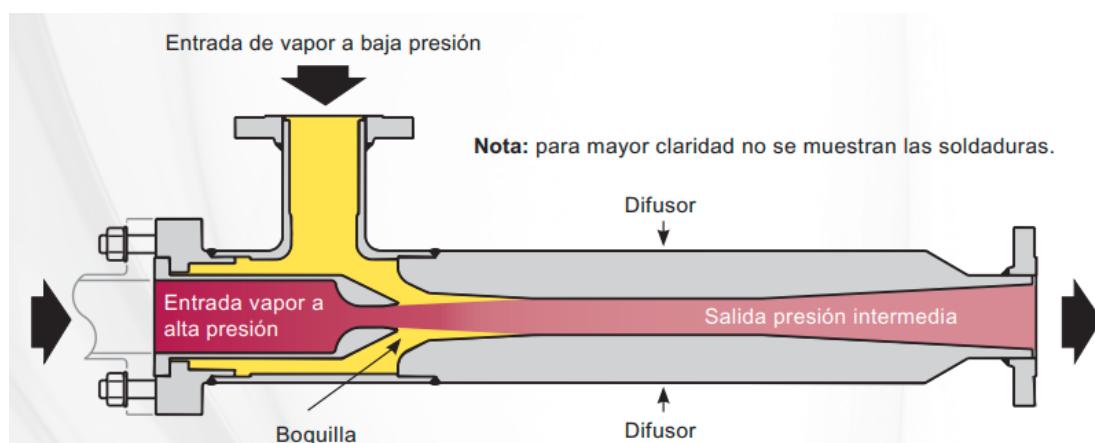


Nota: fuente <https://www.mx.endress.com/es/instrumentacion-campo>

**Termocompresor:** instrumento que regula la presión en el vapor, reutilizando el vapor saliente del proceso. El termocompresor dispone de una boquilla, cámara de succión y difusor. Posee 3 vías: el ingreso de vapor, la salida regulada de vapor, y la vía para vapor recuperado.

**Figura 66**

*Diagrama del principio de funcionamiento del termocompresor.*



Nota: fuente <https://vaporparalaindustria.com/optimizacion-energetica-con-recuperacion-de-vapor-flash-y-termocompresor/>

**Actuador neumático del tipo diafragma:** los actuadores son de diversas formas para satisfacer necesidades de las válvulas de control. Las carcasa de diafragma superior e inferior albergan los componentes internos del actuador y crean cámaras de presión a las que se puede aplicar una señal de control neumático. La carcasa superior del diafragma se retira para acceder a los componentes internos. El diafragma es un elemento flexible que responde a la presión a la que se aplica la señal de control neumático. La placa del diafragma es una placa rígida contra la que el diafragma empuja a medida que aumenta la presión.

**Figura 67**

*Diagrama del actuador del tipo diafragma de acción directa y acción inversa.*



Nota: fuente <https://www.mx.endress.com/es/instrumentacion-campo>

El vástagos del actuador está conectado directamente a la placa del diafragma. Normalmente, se utiliza un bloque de acoplamiento para acoplar el vástagos del actuador con el vástagos de la válvula. El componente final de este actuador es el resorte que proporciona una fuerza opuesta al diafragma; también proporcionará un modo de falla inherente. Se encuentran dos tipos de actuadores, el de la derecha es un actuador de conexión directa, que dispone la conexión de carga en la parte superior del diafragma; mientras que el actuador de la izquierda es de acción inversa y con conexión de carga debajo de la carcasa del diafragma. A medida que aumentamos la presión, el actuador de acción directa de la derecha se extiende hacia el conjunto de la válvula; mientras que el

actuador de acción inversa de la izquierda se retrae del conjunto de la válvula. Si la presión disminuye o se pierde, el resorte moverá el vástagos del actuador en la dirección opuesta alejándose del cuerpo de la válvula.

**Actuador neumático del tipo cilindro:** son del tipo cilindro neumático doble efecto y regreso por muelle, de la marca Neles fabricados para el control modulante. Con vida útil idónea para maniobrar válvulas rotativas. Dentro de ese tipo de actuador, existen varias modificaciones y mejoras según la necesidad, como quedarse quieto o en la posición de falla actual. Si se requiere el modo de falla, existe la serie de retorno por resorte, que ofrece un cartucho de resorte autónomo para proporcionar fallas en la posición abierta o cerrada. Los actuadores de retorno por resorte están disponibles con un resorte de rango medio, así como resortes más livianos y resortes más fuertes dependiendo del rango y la aplicación. Con topes de recorrido ajustables, ya que son un estándar para posiciones abierta o cerrada, el rango del ángulo de giro al final de la carrera es de 85 a 95 grados. Los rangos de temperatura son variables según el modelo de construcción elegido, operan a temperaturas desde -20°C hasta 120°C. En la figura 68, se muestran ejemplos de estos actuadores.

### Figura 68

*Imagen de actuador neumático del tipo cilindro para válvulas de control.*



Nota: fuente <https://www.mx.endress.com/es/instrumentacion-campo>

**Posicionadores electromecánicos para válvulas de control:** dispositivos que nos permiten estrangular o posicionar con precisión la válvula de control en un punto de referencia deseado. Hay muchos estilos disponibles según el tipo de válvula de control. Todos los posicionadores requieren dos cosas para una operación adecuada: la primera la onda de control y la segunda la retroalimentación de posición. La onda de control o conocida también como entrada que proporciona un punto de referencia. La señal de retroalimentación indica la posición actual de la válvula. La entrada es proporcionada por una señal de control neumático a un fuelle. A medida que aumenta la presión de entrada, los fuelles se expanden y actúan sobre una viga. El haz gira y mueve una aleta en relación con una boquilla; ya que la posición de la aleta ha cambiado, la presión de la boquilla cambia y opera un relé neumático. En ese punto, con un transductor de presión a presión para la entrada. Para que sea un posicionador, retorna la retroalimentación de posición.

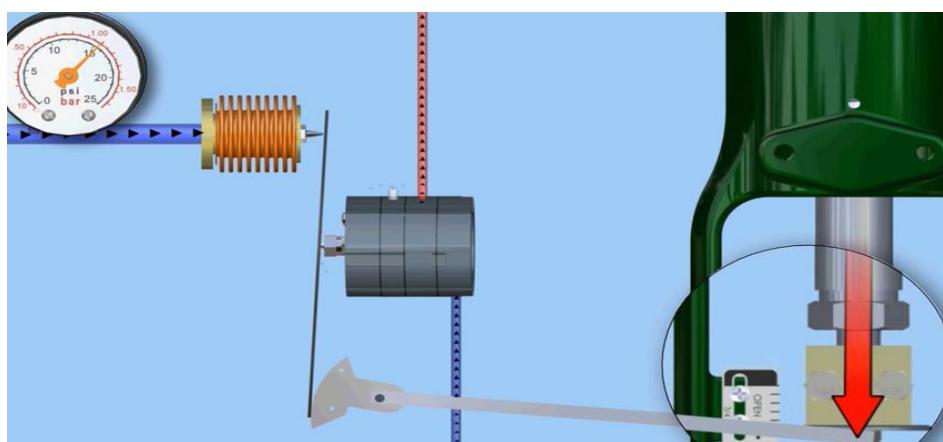
La señal de retroalimentación asegura que el actuador responda a onda entrante y la posición de la válvula corresponda a la onda entrante. La señal de retroalimentación se proporciona desde la válvula de control al posicionador mediante componentes mecánicos. Se usa una leva unida a un brazo que gira a medida que la válvula se desplaza. La retroalimentación también actúa sobre el haz y es una fuerza opuesta a la señal de entrada en el fuelle. Si se aumenta la entrada al dispositivo, el fuelle volverá a actuar sobre el haz y moverá la aleta más cerca de la boquilla. A medida que aumentan las presiones de salida y de la boquilla, la válvula se mueve y la retroalimentación de la leva actúa en el lado opuesto del haz, aleja la aleta de la boquilla, la viga es un componente de suma.

Tanto la señal de control como la señal de retroalimentación se aplican al haz de suma y se comparan constantemente entre sí. Si las fuerzas son iguales, la relación entre la boquilla y la aleta permanece estable y la presión de salida del dispositivo es constante, se mantiene la posición de la válvula. Si ocurriera un cambio en una de las fuerzas, la aleta se ajusta nuevamente en la relación de la boquilla y las presiones de salida cambian hasta que ambas fuerzas se igualan nuevamente. Si el posicionador está correctamente calibrado, la posición de la válvula corresponderá a una onda única.

Hay muchos beneficios adicionales al usar un posicionador de una válvula de control, además de la posición del vástago. Los posicionadores de precisión a menudo se seleccionan para lograr el control del estrangulamiento de los actuadores de pistón, para acomodar las señales de control no compatibles, para garantizar el cierre adecuado de la válvula de control, para permitir el rango dividido y para cambiar la característica de ganancia del actuador.

**Figura 69**

*Imagen de componentes internos para un posicionador de válvula de control.*



Nota: fuente <https://www.mx.endress.com/es/instrumentacion-campo>

**Posicionadores electrónicos para válvulas de control:** los posicionadores electrónicos están diseñados para operar con todo tipo de actuadores para las válvulas de control, adicionando autodiagnósticos y mejores características de rendimiento y confiabilidad que los posicionadores electromecánicos. Entre los diagnósticos que pueden realizarse a este tipo de válvulas se encuentran autodiagnóstico, diagnóstico en línea, de rendimiento, de comunicación. Asimismo, estos posicionadores electrónicos tienen diversas opciones de comunicación.

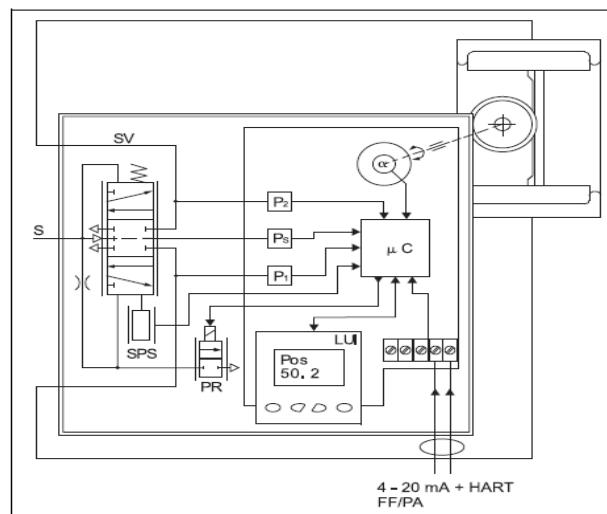
Se puede usar el mismo dispositivo o el *kit* de montaje para los diferentes actuadores; ya sean para válvulas lineales y rotativas, así como actuadores de simple o doble efecto. Este tipo de posicionador es de mayor precisión al momento de realizar la calibración correspondiente, ya que dispone de una señal de retroalimentación de posición

de la válvula. Este tipo de posicionadores está basado en un microcontrolador alimentado por un bus de campo, con una interfaz para el usuario lo cual permite hacer las configuraciones al posicionador según la forma de trabajo.

El microcontrolador controla la posición de la válvula con la señal de entrada, posición de la válvula con sensor, presiones del actuador, posición de la válvula. Con la señal eléctrica y la señal neumática, el microcontrolador lee la señal de entrada, así como la posición de sensores de posición entre la onda entrante y la posición. El microcontrolador calcula un nuevo valor para la corriente de bobina. Esta corriente cambia la presión piloto a la válvula de carrete, la presión mueve el carrete y cambian las presiones del actuador. El carrete abre el flujo hacia el lado impulsor del actuador de doble diafragma, haciendo que el aumento de presión mueva al pistón del diafragma. El actuador y el eje de realimentación giran, el sensor de posición mide la rotación, el algoritmo del microcontrolador module la corriente de la bobina, desde el valor de estado estable hasta que se alcance la nueva posición del actuador.

**Figura 70**

*Algoritmo de control de un posicionador electrónico.*



Nota: fuente <https://www.mx.endress.com/es/instrumentacion-campo>

## **Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación**

En este apartado se explica el desarrollo del proyecto y la clasificación de los procesos y análisis realizados en dos etapas:

### **3.1 Análisis del problema y toma de datos**

La máquina papelera presenta variación de humedad en el perfil de hoja a velocidades mayores a 1900 m/min. Estas pérdidas superan el 5% en la eficiencia acumulada. A velocidades menores a 1900 m/min, el sistema se comporta de manera estable; sin embargo, el no alcanzar la velocidad nominal de la máquina papelera, que es 2100 m/min, hace que se generen pérdidas de eficiencia por velocidad. Es decir que, a menos velocidad de máquina, mayor es la pérdida de eficiencia por este evento; sin embargo, mejor es la estabilidad del secado a bajas velocidades.

En este subcapítulo, se da detalle de las eficiencias de la máquina a velocidades que varían desde 1300 m/min hasta 1900 m/min, y el comportamiento del sistema a velocidades mayores a 1900 m/min. Adicional, se muestra la humedad en el perfil de hoja con valor óptimo de trabajo entre 4.5 a 8.0%, siendo el valor máximo y no debiendo superar al 10.0%. Asimismo, la temperatura del papel debe ser entre 40°C hasta máximo los 60°C y, de igual forma, la temperatura del *yankee* operando en rango entre 80°C hasta 130°C.

Para una velocidad de máquina de 2000 m/min, las pérdidas por variación en el secado del papel superan el 5%, motivo por el cual no es posible seguir incrementando la velocidad de la máquina hasta la velocidad nominal de 2100 m/min. Luego de la implementación del proyecto, se asignan los mismos datos para hacer comparaciones de las nuevas pérdidas asociadas por variación de humedad a la velocidad nominal.

### **3.2 Dimensionamiento de la solución propuesta**

Para las simulaciones, se dispone del comportamiento del vapor saturado y el condensado en el sistema conformado por la caldera, el tanque desaireador, el *yankee*, la

instrumentación para el control de ingreso y salida de vapor al *yankee*, el tanque separador de vapor y los componentes de la red de distribución. Para obtener un mejor secado de papel a velocidades mayores a 1950 m/min, se aumenta la capacidad de secado del *yankee* y obtener un mejor performance del sistema de control.

### **3.2.1 Especificaciones técnicas de equipos actuales**

Para aumentar la capacidad de secado, se modifica el diseño del *yankee*, así como el dimensionamiento de la red de distribución, según las nuevas necesidades de la máquina. El *yankee* está ubicado en la parte central y a nivel de la máquina papelera. El tanque separador de vapor está ubicado en el sótano de la máquina, a unos diez metros del *yankee* y unos cinco metros por debajo nivel de planta. La caldera se encuentra a unos trescientos cincuenta metros de la máquina papelera, en una zona denominada sala de calderas. El tanque desaireador se encuentra a dos metros de la caldera. Para las simulaciones, se asignan los equipos descritos. En la figura 71, se muestra la caldera pirotubular asignada, así como en la figura 72 las especificaciones técnicas del caldero.

**Figura 71**

*Fotografía de caldera pirotubular de la marca Cleaver Brooks.*



## **Figura 72**

*Especificaciones técnicas de caldera.*

CALDERA	
TIPO DE CALDERA	HORIZONTAL
MARCA	CLEAVER BROOKS
Nº SERIE	OL 105982
AÑO DE CONSTRUCCIÓN	2007
PRESION MAX. TRABAJO	300 PSI
PRESION DE TRABAJO	253 PSI
POTENCIA	600 BHP
SUPERFICIE CALENTAM.	3000 PIES 2
VAPOR GENERADO	20700 Lbs/pulg <sup>2</sup>
COMBUSTIBLE	511 m <sup>3</sup> /Hr
TIPO DE COMBUSTIBLE	GAS NATURAL

A la caldera, se realiza mantenimiento integral y reparaciones para que opere a su capacidad nominal sin problemas. Es del tipo horizontal de la marca Cleaver Brooks de 600BHP, suministra vapor a una presión de trabajo de 253 psi o 17.4 bar, se alimenta con energía eléctrica de 440 V trifásico con línea a tierra y usa gas natural para el proceso de combustión. La cual recibe agua sin oxígeno del tanque desaireador y agua de forma directa del tanque separador de condensado ubicado en la máquina papelera.

El tanque desaireador de la marca Hurst Boiler trabaja a una presión de operación de 5 psi o 0.35 bar. El cual recibe el condensado del tanque separador ubicado en la máquina. Impulsa agua hacia la caldera a una temperatura de 100°C. Para la alimentación de agua en el tanque desaireador, se usa agua blanda proveniente de los ablandadores, y para el calentamiento de agua, se usa vapor vivo proveniente de la red de calderos, la cual pasa por un circuito para reducir la presión desde los 253 psi hasta los 5 psi a la cual está diseñado el tanque desaireador. En el caso que se use la línea auxiliar del tanque separador, el condensado viene impulsado por la presión de dicho tanque que varía entre los 5.0 a 6.5 bar hacia el tanque desaireador. En la figura 73, se muestra este tanque, así como en la figura 74 se describen sus especificaciones técnicas.

**Figura 73**

*Fotografía del tanque desaireador de la marca Hurst.*



**Figura 74**

*Especificaciones técnicas del tanque desaireador.*

TANQUE DESAEREADOR	
MARCA	HURST
MODELO	OM-26
DIMENSIONES	Ø1.2Mtrsx3.0Mtrs
VOLUMEN TOTAL	1033 glns.
CAPAC. AL NIVEL	609 gln.
AUTONOMIA HASTA EL NIVEL DE TRABAJO	15 min
PRESION DE OPERACION	5 psig
TEMPERATURA DE OPERACION	105°C
MATERIAL	ASTM A516 gr 70
NORMA	ASME VIII
ALURA RESPECT. A LA BASE TANQUE	3 Metros.

El sistema de secado recibe vapor de la caldera a una presión que varía entre los 17.0 bares, pasa por el sistema de control que incluye al termocompresor y las válvulas de control, reduciendo la presión de vapor a 8.0 bares, luego ingresa al yankee. El yankee actual está diseñado para presión máxima de 8.0 bares como una limitante para seguir incrementando la velocidad. Por diseño, la máxima presión en el yankee es de 8.6 bar, a

una temperatura máxima de 232°C, con diámetro de 4 metros, construido de material de hierro gris fundido SA-27. El vapor calienta el *yankee* y que este entre en contacto con el papel para el secado en el papel. La diferencia de presión entre el ingreso y salida es conocida como la diferencial del *yankee*, que varía entre 1.1 a 1.4 bares. El vapor condensado a la salida del *yankee* va hacia el tanque separador. En la figura 75, se muestra el *yankee* actual de la máquina papelera.

**Figura 75**

*Fotografía del yankee actual de la máquina papelera.*



**Figura 76**

*Especificaciones técnicas del yankee actual de la máquina papelera.*

YANKEE	
FABRICACION	RECARD SPA
CERTIFICACION	PMT INDUSTRIES
TIPO	HORIZONTAL
SERIE	1317
AÑO DE FABRICACIÓN	2008
MATERIAL	SA278 CLASE 60
COSTURA	FUNDIDO EN 1 pza
DIAMETRO	16 ft
PRESION DE DISEÑO	8.6 bar
MAX. PRESION DE TRABAJO	8.0 bar
MAX. TEMPERATURA DE TRABAJO	232 °C
PRESION DIFERENCIAL DE TRABAJO	1.1 a 1.4 bar

El tanque separador de condensado de la máquina papelera recolecta el condensado del yankee, el rango de presión de vapor a la salida del yankee, va entre 6.5 a 7.0 bar con un flujo de condensado que va desde los 4380 kg/h hasta los 8000 kg/h, a una temperatura de trabajo entre los 180°C. El condensado se aloja en la parte inferior del tanque; mientras que el vapor en estado gaseoso se aloja en la parte superior del tanque. Para lograr esta separación de fases es necesario mantener estable y a un nivel determinado, el condensado, el cual retorna hacia la caldera, ya sea por la línea principal de forma directa o por el tanque desaireador por la línea auxiliar. El vapor del tanque separador de condensado, retorna al yankee a través del control de velocidad de vapor.

**Figura 77**

*Fotografía del tanque separador de condensado.*



**Figura 78**

*Especificaciones técnicas del tanque separador de condensado.*

TANQUE SEPARADOR DE CONDENSADO 1	
Presión de trabajo	6.7 barg
Temperatura	169 °C
Diámetro	1.0Mtrs
Altura	2.3 Mtrs
Flujo min. Condensado	4380 kg/hr
Flujo máx Condensado	8000 kg/hr

### 3.2.2 Cálculos para la simulación propuesta

Los procedimientos de cálculo de los parámetros del sistema propuesto son divididos en cuatro etapas. En la primera etapa, se calcula el diámetro de la tubería que transporta vapor. En la segunda y tercera etapa, se calcula las pérdidas sufridas en el condensado al ser transportada desde el *yankee* hacia el tanque separador de condensado, desde el tanque separador de condensado hasta el tanque desaireador y desde la caldera hacia el *yankee*. En la cuarta etapa, se evalúa el dimensionamiento de la tubería para el caudal de condensado que transporta, con referencia el tanque separador de condensado actual que dispone de un flujo entre los 4380 kg/h hasta los 8000 kg/h. En la figura 79, se describen las características del condensado.

**Figura 79**

*Especificaciones técnicas de la tubería, presiones y flujo del condensado.*

PROPIEDADES DE LA TUBERIA			
MATERIAL			ASTM A53 GrB
DIAMETRO			Ø3 "
CLASE			SCH 80
RUGOSIDAD (mm)			0.05
LONGITUD (L)			200 m
PROPIEDADES DEL FLUIDO DE CONDENSADO			
PRESION DEL CONDENSADO		PRESION EN LINEA DE RECUPERACION	
Presión	Densidad	Presión	Densidad
6.7Barg	898.02 kg / m3	5Psig	952.36 kg / m3
FLUJO (Kg / hr)		FLUJO MINIMO	4380 kg/hr
FLUJO MAXIMO		8000 kg/hr	
DENSIDAD ( Kg/m3 )			898.02088 kg / m3
VISCOCIDAD			0.000163

Se realiza un cálculo para la velocidad de descarga del condensado proveniente del tanque separador de condensado hacia el tanque desaireador, para diferentes cargas, y según la siguiente fórmula para fluidos. En la figura 80, se describen los parámetros para el cálculo del condensado.

$$v = \frac{m_c * V_{temp}}{3600 * \pi * (\frac{d}{2})^2} \quad (1)$$

## Figura 80

Parámetros para el cálculo de velocidad de condensado.

PARÁMETROS PARA EL CÁLCULO DE VELOCIDAD.	
v (m/s)	Velocidad del flujo.
mc (Kg / hr)	Flujo de condensado.
V Temp (Kg /m3)	Variable temporal de temperatura.
d ( m)	Diámetro interno de la tubería.

La presión del tanque separador de condensado es de 6.7 bar, el cual va al tanque desaireador, que opera alrededor de 0.35 bar; por lo tanto, habría tanto vapor *flash* como condensado. Se hace un cálculo de la proporción de la masa y volumen tanto del vapor *flash* como del condensado a los distintos valores de carga del condensado, en los flujos mínimos y máximos. Por medio de la presión inicial de descarga del tanque, como la presión de operación del tanque desaireador, con un cálculo de la proporción de vapor *flash* y condensado, con datos como las entalpias de saturación. Para una presión de 6.7 bar obtenemos las siguientes propiedades termodinámicas en las figuras 81 y 82.

## Figura 81

Propiedades termodinámicas de agua a una presión de 6.7 bar.

PROPIEDADES TERMODINAMICAS PRESION 6.7 BAR	
Temperatura de vapor saturado (°C)	168.906
Calor latente de vapor (kJ / Kg)	2052.39
Entalpia específica de vapor saturado (kJ / Kg)	2766.8
Entalpia específica de agua saturada (kJ / Kg)	714.416
Volumen específico de vapor saturado (m3 / Kg)	0.248798
Volumen específico de agua saturada (m3 / Kg)	0.00111288

## Figura 82

Propiedades termodinámicas de agua a una presión de 0.35 bar.

PROPIEDADES TERMODINAMICAS PRESION 5 PSI	
Temperatura de vapor saturado (°C)	108.392
Calor latente de vapor (kJ / Kg)	2234.06
Entalpia específica de vapor saturado (kJ / Kg)	2688.62
Entalpia específica de agua saturada (kJ / Kg)	454.555
Volumen específico de vapor saturado (m3 / Kg)	1.27239
Volumen específico de agua saturada (m3 / Kg)	0.00105023

De los cuales, para el cálculo se detallan, en la figura 83, el resumen de las entalpias de saturación como la entalpía de vapor saturado menos el agua saturada para la presión final de 0.35 bar.

### Figura 83

*Entalpía agua saturada y el vapor saturado a diferentes presiones.*

Presión bar	hf	hg	hfg
6.7	714.416	2766.8	2052.384
0.34473	454.555	2688.62	2234.065

Seguidamente se procederá al cálculo de la proporción de vapor *flash*, de la siguiente forma:

$$PROPORCIÓN_{VAPOR} = \frac{hf_{P=1} - hf_{P=2}}{hfg_2} * 100 \% \quad (2)$$

Donde

- hf1: entalpía de fluido congestionado (KJ/Kg)
- hfg: entalpía de vaporación (KJ/Kg)
- P1: presión inicial del proceso
- P2: presión final del proceso

Reemplazando los valores obtenidos se obtiene lo siguiente:

$$PROPORCIÓN_{VAPOR} = \frac{hf_{P=6.7\ bar} - hf_{P=0.35\ bar}}{hfg_{P=0.35\ bar}} * 100 \% \quad (3)$$

$$PROPORCIÓN_{VAPOR} = \frac{714.416 - 454.555}{2234.065} * 100 \% = 11.63 \% \quad (4)$$

El vapor *flash* obtenido en la línea de condensado representa el 11.63% del total del volumen, por tanto, el condensado sería el 88.37%.

Para el cálculo de la proporción de volumen, se asigna el valor de flujo máximo de 8000 Kg/h en el intervalo de 1 hora, por lo que se obtiene que la descarga de condensado

proveniente del tanque *flash* será de 8000 Kg. Con esta masa de condensado descargado a una presión de saturación de 6.7 bar la masa de vapor instantáneo es

$$- \text{ Masa vapor } \textit{flash} = (0.1163 \times 8000) \text{ Kg} = 930.4 \text{ Kg de vapor} \quad (5)$$

$$- \text{ Masa de condensado} = (8000 - 930.4) \text{ Kg} = 7069.6 \text{ Kg de condensado} \quad (6)$$

La densidad de agua saturada a una presión de 0.35 bar es de 950 Kg/m<sup>3</sup>. Para el cálculo del condensado a una presión de 6.7 bar, la masa de vapor *flash* es de 930.4 Kg. El volumen ocupado por los 7069.6 Kg de condensado es igual a 7.44 m<sup>3</sup>.

$$- \text{ Volumen condensado} = \text{peso} / \text{densidad} = 7069.6 / 950 = 7.44 \text{ m}^3 \quad (7)$$

De las tablas de vapor, el cálculo del volumen específico para 0.35 bar es de 1.27 kg/m<sup>3</sup>. Con este valor se calcula el volumen del vapor *flash*.

$$- \text{ Volumen vapor } \textit{flash} = \text{peso} / \text{densidad} = 930.4 / 950 = 0.98 \text{ m}^3 \quad (8)$$

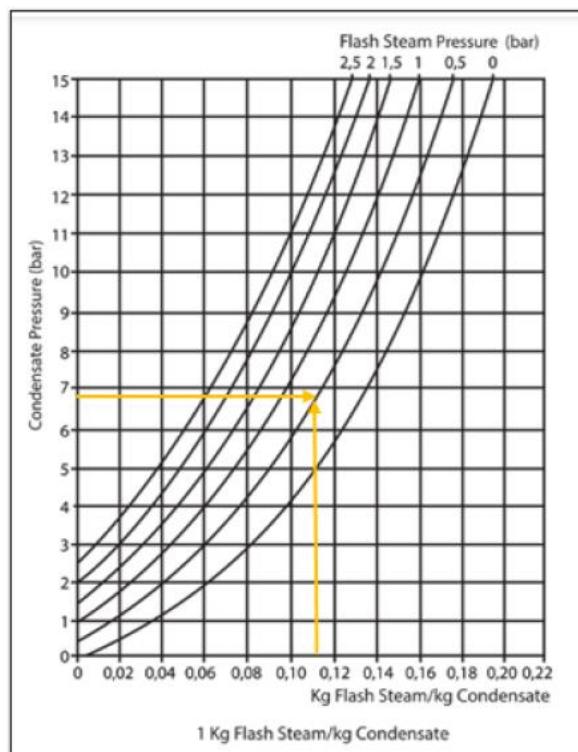
$$- \text{ Volumen total} = \text{volumen condensado} + \text{volumen vapor flash} = 8.42 \text{ m}^3 \quad (9)$$

$$- \text{ Porcentaje de volumen ocupado condensado} = (0.98/8.42) \times 100\% = 11.63\% \quad (10)$$

$$- \text{ Porcentaje de volumen ocupado vapor flash} = (100-11.63)\% = 88.37\% \quad (11)$$

#### Figura 84

*Diagrama de curvas características de vapor flash y descarga de condensado.*

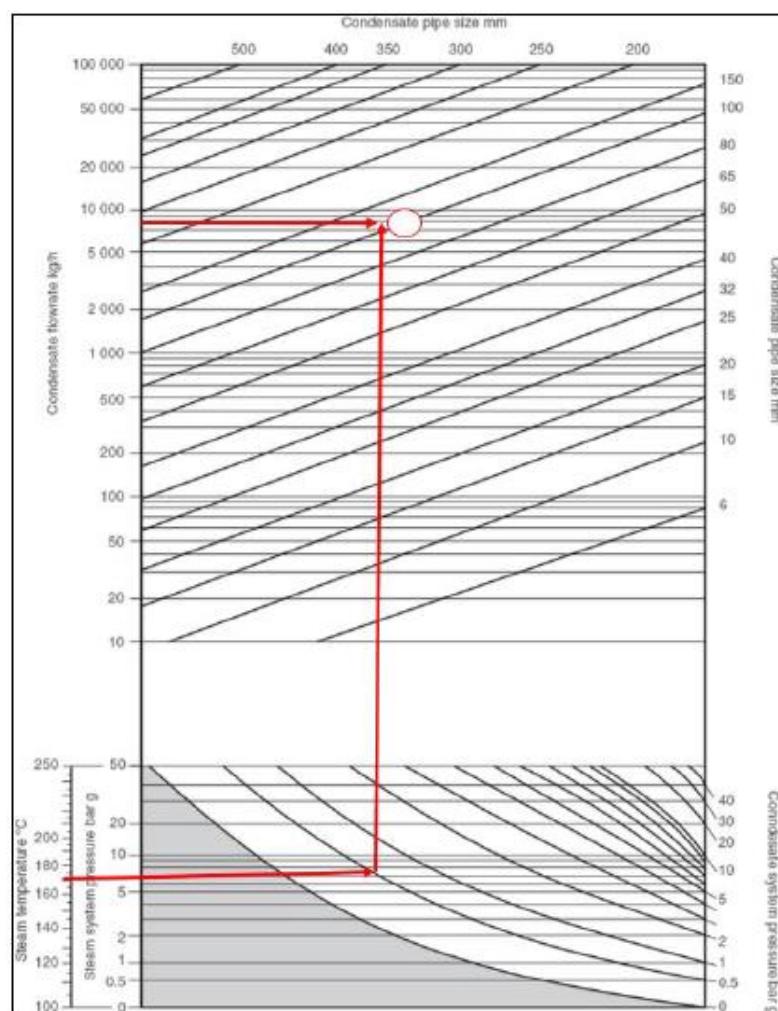


Como se ve en la figura 84, con la relación de proporción de condensado y de vapor *flash*, también la curva de la presión de condensado, brinda una presión de salida alrededor de los 0.5 bar en la descarga de la línea de condensado hacia el tanque desaireador.

En figura 85, se determina que, para las condiciones dadas como la presión inicial de vapor de ingreso y de salida, la descarga de condensado para el caso más crítico equivale a un flujo máximo de 8000 kg/, la curva se intercepta para un diámetro DN100 o de 4 pulgadas para las líneas de condensado para que no exista una sobrepresión ni que el sistema esté subdimensionado y pueda ocasionar golpes de ariete, o presurizar el tanque desaireador. Estas curvas características se validan en los flujos de descarga.

**Figura 85**

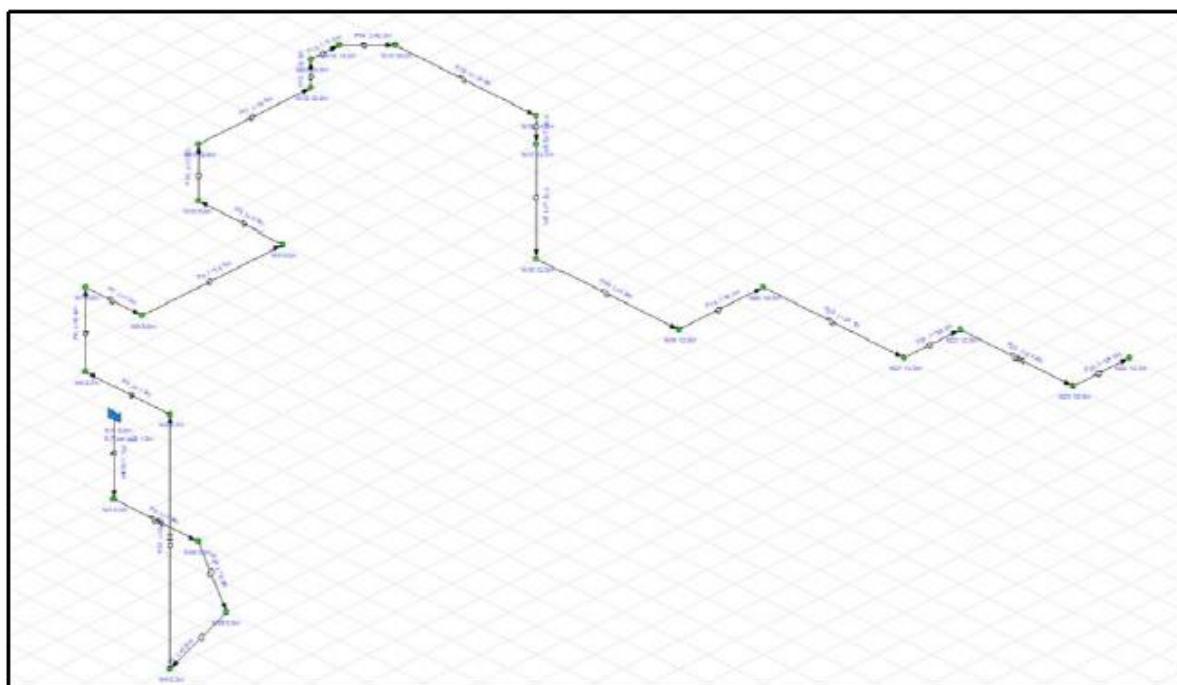
*Diagrama de curvas características para el dimensionamiento de tuberías para flujos de descarga.*



Por medio del software *Pipe Flow*, se realizó el recorrido de la línea de descarga de condensado para poder simular tanto las caídas de presión con la carga mínima y máxima de condensado del tanque separador de condensado, calculando las caídas de presión para que las líneas de condensado no estén sub dimensionadas. Para este cálculo se disponen de las subidas, curvas y bajadas, el recorrido de la línea, y los accesorios que ejercen pérdidas en las tuberías.

**Figura 86**

*Diagrama isométrico utilizando el software Pipe Flow.*



En la figura 87 y 88, se obtienen resultados para diferentes medidas en el diámetro de las tuberías. Esta inicia con un diámetro de 3 pulgadas, con la carga mínima de descarga de condensado para el valor de 4380 Kg/h, con una amplitud de 110 Kg/h. Lo resaltado en amarillo corresponde a la caída de presión máxima admisible para la tubería de 3 pulgadas cuyo valor de carga de condensado es de 5700 Kg/h. Sobrepasando esta carga se obtiene una presión negativa y el flujo ya no podrá seguir fluyendo, por lo que será necesario aumentar de diámetro a la tubería a 4 pulgadas.

**Figura 87**

Imagen del resultado del software Pipe Flow para carga de condensado

**Introducir Datos**

Unidades: SIBar

Grado de Tubería	ANSI Sch40
Presión del Condensado [?]	6.7 barg
Carga de Condensado [?]	4380 kg/h
Presión de la Línea de Recuperación	5 psig
Máxima Pérdida de Presión Permisible	7 bar
Longitud de la Tubería [?]	200 m
Válvulas de Flujo Cerradas (ej. Globo) (Cant) [?]	0
Válvulas de Flujo Instaladas (ej. Comp) (Cant) [?]	6
Válvulas Check (Cant) [?]	2
Codos (Cant)	25
Rugosidad Interna de la Tubería [?]	0.05 mm

Ocultar Opciones Avanzadas

**Calcular**    **Limpiar**

Tamaño de Tubería	NPS3
Diámetro Interno Tubería	77.9272 mm
Velocidad del Condensado	37.9912 m/s
Caída de Presión	4.16365 bar
Longitud Equivalente a una Tubería Horizontal	313.002 m

**Resultados**

**Figura 88**

Resultados del Software Pipe Flow para las caídas de presión.

CARGA DE CONDENSADO (kg/hr)	TAMAÑO DE TUBERIA	DIAMETRO INT. TUBERIA (m)	VELOC. CONDENSADO (m/s)	CAIDA DE PRESION (Bar)	LONG. EQUIVAL TUB HORIZONTAL (m)
4380	3"	77.9272	37.9912	4.16365	313.002
4490	3"	77.9272	38.9453	4.36685	313.349
4600	3"	77.9272	39.8994	4.57479	313.685
4710	3"	77.9272	40.8536	4.78749	314.01
4820	3"	77.9272	41.8077	5.00492	314.325
4930	3"	77.9272	42.7618	5.2271	314.63
5040	3"	77.9272	43.7159	5.45401	314.926
5150	3"	77.9272	44.67	5.68567	315.213
5260	3"	77.9272	45.6241	5.92206	315.492
5370	3"	77.9272	46.5783	6.16318	315.763
5480	3"	77.9272	47.5324	6.40904	316.026
5590	3"	77.9272	48.4865	6.65964	316.282
5700	3"	77.9272	49.4406	6.91496	316.531
5810	4"	102.26	29.265	2.05891	352.869
5920	4"	102.26	29.8191	2.13452	353.26
6030	4"	102.26	30.3731	2.21146	353.642
6140	4"	102.26	30.9272	2.28974	354.016
6250	4"	102.26	31.4813	2.36935	354.381
6360	4"	102.26	32.0353	2.45029	354.737
6470	4"	102.26	32.5994	2.53257	355.086
6580	4"	102.26	33.1435	2.61618	355.426
6690	4"	102.26	33.6975	2.70112	355.76
6800	4"	102.26	34.2516	2.7874	356.086

### **3.2.3 Especificaciones técnicas del fabricante**

Para poder aumentar la velocidad de la máquina papelera hasta velocidades de 2100 m/min sin problemas de variación en el secado por vapor, el fabricante de la máquina, ha calculado que es necesario aumentar la capacidad del *yankee*, aumentando el flujo mínimo de condensado de 4380 Kg/h a 5600 Kg/h y el flujo máximo de condensado de 8000 Kg/h a 9300 Kg/h. Así como la presión de trabajo del vapor de un valor de 6.7 bar a 7.7 bar y una temperatura de trabajo de un valor de 169°C a 174°C. El nuevo *yankee* con una nueva presión de diseño, incrementada de 8.6 bar a 10.0 bar; con una nueva presión de trabajo que se ha incrementado de 8.0 bar a 9.0 bar, y una presión diferencial de trabajo entre 0.8 a 1.2 bar. El diámetro del *yankee* se mantiene en 4 metros, las juntas de ingreso y salida se han incrementado de DN150 a DN200. En las figuras 89 y 90, se describen las especificaciones técnicas del nuevo *yankee*, así como del nuevo tanque de condensando.

**Figura 89**

*Especificaciones técnicas del nuevo yankee.*

YANKEE	
FABRICACION	TOSCOTEC
CERTIFICACION	GBM SRL
TIPO	HORIZONTAL
SERIE	7463
AÑO DE FABRICACIÓN	2022
MATERIAL	SA278 CLASE 60
COSTURA	FUNDIDO EN 1 pza
DIAMETRO	16 ft
PRESION DE DISEÑO	10.0 bar
MAX. PRESION DE TRABAJO	9.0 bar
MAX. TEMPERATURA DE TRABAJO	232 °C
PRESION DIFERENCIAL DE TRABAJO	0.8 a 1.2 bar

**Figura 90**

Especificaciones técnicas del nuevo tanque separador de condensado.

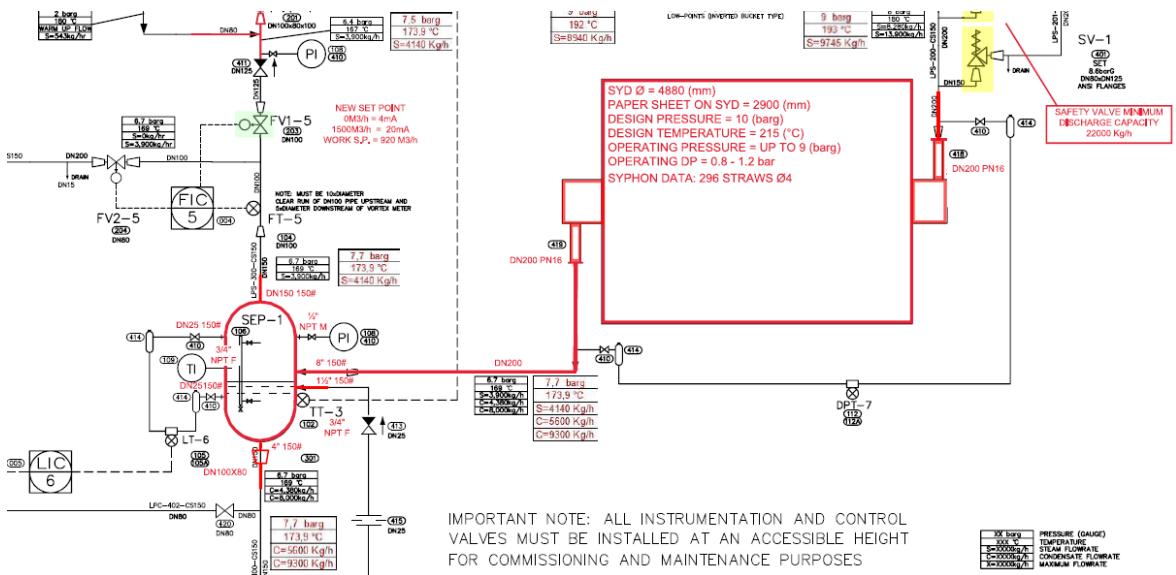
TANQUE SEPARADOR DE CONDENSADO 2	
FABRICANTE	TOSCOTEC
CERTIFICACION	GBM EIRL
PRESIÓN DE DISEÑO	12.0 bar
PRESIÓN DE TRABAJO	7.7 bar
TEMPERATURA	220 °C
DIAMETRO	1.0 metro
ALTURA	2.1 metro
CAPACIDAD	1300 litros
FLUJO MINIMO DE CONDENSADO	5600 Kg/h
FLUJO MAXIMO DE CONDENSADO	9300 Kg/h

De igual forma por el incremento en la capacidad del flujo mínimo y flujo máximo de condensado de vapor por el nuevo *yankee*, se aumenta la capacidad del tanque separador de condensado, aumentando la presión de trabajo de 6.7 bar a 7.7 bar, y un flujo mínimo de condensado de 5600 Kg/h y un flujo máximo de condensado de 9300 Kg/h. En la figura 91, se describe el diagrama PI&D del nuevo *yankee* y el nuevo tanque de condensado.

Como se aumenta el flujo de condensado del *yankee* a un valor de 9600 Kg/h, mediante el *software Pipe Flow* se va a calcular las caídas de presión según las presiones de vapor de trabajo, tanto en el nuevo tanque separador de condensado, así como el diámetro de las tuberías a utilizar. A continuación, en la figura 92, los datos obtenidos en el *software*.

**Figura 91**

Diagrama PI&D del nuevo yankee y tanque separador de condensado.



**Figura 92**

Resultados del Software Pipe Flow para los nuevos flujos de trabajo.

CARGA DE CONDENSADO (Kg/h)	TAMAÑO DE TUBERIA	DIAMETRO INTERIOR TUBERIA (m)	VELOCIDAD CONDENSAZO (m/s)	CAIDA DE PRESION (bar)	LONGITUD EQUIVALENTE TUBERIA
7240	4"	102.26	36.4679	3.14852	357.325
7350	4"	102.26	37.0220	3.23875	357.619
7460	4"	102.26	37.5760	3.33301	357.907
7570	4"	102.26	38.1301	3.42860	358.190
7680	4"	102.26	38.6842	3.52552	358.468
7790	4"	102.26	39.2383	3.62377	358.739
7900	4"	102.26	39.7923	3.72335	359.060
8010	4"	102.26	40.3464	3.82425	359.268
8120	4"	102.26	40.9004	3.87062	359.797
8230	4"	102.26	41.4544	3.95890	360.116
8340	4"	102.26	42.0084	4.04718	360.435
8450	4"	102.26	42.5624	4.13546	360.755
8560	4"	102.26	43.1164	4.22374	361.074
8670	4"	102.26	43.6705	4.31202	361.393
8780	4"	102.26	44.2245	4.40030	361.713
8890	4"	102.26	44.7785	4.48858	362.032
9000	4"	102.26	45.3325	4.57686	362.351
9110	4"	102.26	45.8865	4.66514	362.670
9220	4"	102.26	46.4406	4.75342	362.990
9330	4"	102.26	46.9946	4.84170	363.309
9440	4"	102.26	47.5486	4.92998	363.628
9550	4"	102.26	48.1026	5.01826	363.947
9660	4"	102.26	48.6566	5.10654	364.267

Según lo obtenido por el software, se calcula que el sistema de secado por vapor opere de forma óptima para diámetros de tubería de 4 pulgadas para un flujo máximo de 9600 Kg/h. Esta modificación del flujo hace que se incremente el diámetro de la tubería de 3 a 4 pulgadas; por lo que es necesario hacer las actualizaciones al sistema de

instrumentación y al sistema de control, que será materia de descripción de los siguientes capítulos.

### **3.3 Elaboración de especificaciones técnicas y selección de equipos**

Para las actualizaciones del sistema de instrumentación y del sistema de control, se define por equipo, las especificaciones técnicas y según estas características se hace un cuadro comparativo entre diferentes tipos de marcas y/o tecnologías, seleccionando el equipo más conveniente para el nuevo sistema de secado por vapor.

#### **3.3.1 Elaboración de especificaciones y selección del sistema de instrumentación**

Como ya se dispone con el dimensionamiento de las nuevas tuberías del sistema de vapor, pasando de 3 a 4 pulgadas, se define por instrumento las características requeridas y según ello se selecciona el instrumento adecuado.

**Transmisor de presión Lazo de Control PIT01 y PIC04:** para ambos tipos de transmisores de presión, se requiere un rango de medición de 0 a 20 bar de presión manométrica para aplicaciones con vapor saturado. En ese sentido, los transmisores de presión del tipo diafragma son los más precisos y robustos con una precisión menor o igual a 0.1%, con protección a sobrepresiones sin daños al sensor. Para ello, es necesario usar aceite de silicona como fluido de llenado en el diafragma y, como material acero inoxidable, el transmisor dispone certificación ante pruebas hidrostáticas para aplicaciones de vapor con rango de trabajo desde los 0°C hasta los 220°C.

Los transmisores con pantalla integral con teclado para las configuraciones y contrastes respectivos con comunicación digital basado en el protocolo *Hart* y señal de salida de 2 hilos de 4 a 20 ma, con parámetros de cero y span configurables, que el transmisor posea la característica de amortiguamiento en el tiempo de respuesta y que sea configurable mediante parámetro, con resistencia de aislamiento mayor a los 100 Mohm, resistencia a la vibración propia del proceso y protección a las sobretensiones eléctricas. El transmisor debe ser hermético al polvo y con protección IP67 ante los efectos de la

inmersión, con alimentación eléctrica de 24 Vdc e integrado ante modos de falla el transmisor de en su señal de salida el último valor valido.

Para este tipo de transmisor se disponen los modelos de las marcas ABB, Yokogawa y Endress & Hauser. A continuación, se detalla la comparación entre las tres marcas para la selección del instrumento en base a confiabilidad, las prestaciones y el costo. Los tres modelos cumplen con las especificaciones técnicas, sin embargo, se descarta la marca Yokogawa; ya que el tiempo de fabricación supera los seis meses por ser un modelo no muy común para esas aplicaciones y se descarta la marca Endress & Hauser por un costo superior al 35% de las marcas ABB y Yokogawa. El modelo escogido es el 266HSH de la marca ABB. En la tabla 93 se describe el modelo seleccionado, y en la figura 94 se realiza el cuadro comparativo.

### **Figura 93**

*Imagen de transmisor de presión Marca ABB Modelo 266HSH.*



*Nota:* fuente <https://new.abb.com/life-sciences/instrumentation>

**Figura 94**

Cuadro comparativo para los transmisores de presión tipo diafragma.

MARCA	ABB	YOKOGAWA	ENDRESS & HAUSER
MODELO	266HSH	EJA530E	CERABAR PMC
Rango 0 a 20 bar	Cumple	Cumple	Cumple
Rango 0 a 220°C	Cumple	Cumple	Cumple
Aplicación: Vapor	Cumple	Cumple	Cumple
Precisión < 0.1%	Cumple	Cumple	Cumple
Protección a sobrepresiones 100 bar	Cumple	Cumple	Cumple
Aceite de silicona en el diafragma	Cumple	Cumple	Cumple
Certificado para pruebas hidrostáticas	Cumple	Cumple	Cumple
Con pantalla integral con teclado	Cumple	Cumple	Cumple
Salida digital a 2 hilos 4 a 20 ma	Cumple	Cumple	Cumple
Comunicación con protocolo Hart	Cumple	Cumple	Cumple
Protección IP67	Cumple	Cumple	Cumple
Configuración de modo de Falla	Cumple	Cumple	No cumple
Tiempo de entrega	En stock	6 meses	2 meses
Costo	Menor a 2000 USD	Menor a 2000 USD	Mayor a 2000 USD

**Transmisor de temperatura Lazo de Control TIT01 y TIT02:** para ambos tipos de transmisores de temperatura, se requieren con un rango de medición de 0 a 300°C, para aplicaciones con vapor saturado a presiones de 20 bar. En ese sentido, los transmisores de temperatura con sensor tipo RTD son los más precisos y robustos, con una precisión menor o igual a 0.5%, transmisor integrado en el cabezal del instrumento, sensor a inmersión variable entre los 30 a 50 cm, conexión al proceso roscada y el diámetro de la tubería de 9 mm.

Los transmisores con cuello para alejar el transmisor de la temperatura del proceso, pantalla integral con teclado para las configuraciones y contrastes respectivos, comunicación digital basado en el protocolo *Hart* y señal de salida de 2 hilos de 4 a 20 ma, parámetros de cero y *span* configurables, resistencia de aislamiento mayor a los 100 Mohm, protección a las sobretensiones eléctricas. El transmisor debe ser hermético al polvo y con protección IP67 ante los efectos de la inmersión, alimentación eléctrica de 24 Vdc e integrado ante modos de falla el transmisor de en su señal de salida el último valor valido.

Para este tipo de transmisor, se dispone de los modelos de las marcas Endress & Hauser, Yokogawa y Rosemount. Se detalla la comparación entre las tres marcas para la selección del instrumento en base a confiabilidad, las prestaciones y el costo. Los tres

modelos cumplen con las especificaciones técnicas. Se descarta la marca Yokogawa; ya que el tiempo de fabricación supera los seis meses, ya que no es un modelo muy común para esas aplicaciones. Se descarta la marca Rosemount por el tiempo de entrega mayor a seis meses y por un costo superior al 20% de las marcas anteriores; por lo que el modelo escogido es el TR10 de la marca Endress & Hauser.

**Figura 95**

*Imagen de transmisor de temperatura Marca Endress & Hauser Modelo TR10.*



Nota: fuente <https://www.mx.endress.com/es/instrumentacion-campo>

**Figura 96**

*Cuadro comparativo para los transmisores de temperatura tipo RTD.*

MARCA	ENDRESS & HAUSER	YOKOGAWA	ROSEMOUNT
MODELO	TR10	YTA610	3144P
Rango 0 a 300°C, sensor tipo RTD	Cumple	Cumple	Cumple
Rango 0 a 20 bar	Cumple	Cumple	Cumple
Aplicación: Vapor	Cumple	Cumple	Cumple
Precisión < 0.5%	Cumple	Cumple	Cumple
Sonda de longitud variable	Cumple	Cumple	Cumple
Con pantalla integral con teclado	Cumple	Cumple	Cumple
Salida digital a 2 hilos 4 a 20 ma	Cumple	Cumple	Cumple
Comunicación con protocolo Hart	Cumple	Cumple	Cumple
Protección IP67	Cumple	Cumple	Cumple
Configuración de modo de Falla	Cumple	Cumple	Cumple
Tiempo de entrega	2 meses	6 meses	6 meses
Costo	Menor a 2000 USD	Menor a 2000 USD	Mayor a 2000 USD

**Transmisor de flujo Lazo de Control FIT01 y VIC05:** para ambos tipos de transmisores de flujo, se requiere que sea del tipo vórtex, ideales para aplicaciones con

vapor saturado, conexión del tipo bridado de 4 pulgadas de clase 300, con un rango de flujo de trabajo de 0 a 10000 kg/h, presiones de trabajo entre 0 y 20 bar y una temperatura de trabajo entre 0 y 250°C. Asimismo, el sensor debe resistir a las sobrepresiones en el sistema de hasta 100 bar. El transmisor de flujo con una precisión menor o igual a 1.0%. Para lograr esta precisión, el transmisor debe incluir medición de temperatura del proceso para la compensación del flujo. Asimismo, debe calcular el flujo másico. El transmisor cuenta con transmisor remoto, pantalla integral con teclado para las configuraciones y contrastes respectivos, comunicación digital basado en el protocolo *Hart* y señal de salida de 2 hilos de 4 a 20 ma, parámetros de cero y *span* configurables, resistencia de aislamiento mayor a los 100 Mohm, resistencia a la vibración propia del proceso y protección a las sobretensiones eléctricas. El transmisor debe ser hermético al polvo y con protección IP67 ante los efectos de la inmersión, con alimentación eléctrica de 220 Vac, alimentación de control de 24 Vdc e integrado el modo de falla el transmisor de en su señal de salida el último valor valido.

Para este tipo de transmisor, se disponen de los modelos de las marcas Yokogawa, ABB y Endress & Hauser. A continuación, se detalla la comparación entre las tres marcas para la selección del instrumento en base a confiabilidad, las prestaciones y el costo. Los tres modelos cumplen con las especificaciones técnicas. Se descarta la marca ABB y Endress & Hauser, ya que el tiempo de fabricación supera los seis meses, pues no son modelos muy comunes para esas aplicaciones. Se descarta, por un costo superior al 35%, la marca Yokogawa; por lo que el modelo escogido es el VYDN100 de la marca Yokogawa.

**Figura 97**

*Imagen de transmisor de flujo Marca Yokogawa Modelo VY DN100.*



*Nota: fuente <https://www.yokogawa.com/sa-es/solutions/products-and-services/>*

**Figura 98**

*Cuadro comparativo para los transmisores de flujo del tipo vórtex.*

MARCA	YOKOGAWA	ABB	ENDRESS & HAUSER
MODELO	VY DN100	FSV430	PROWIRL F200
Rango 0 a 10000 kg/h, medición tipo vortex	Cumple	Cumple	Cumple
Conexión bridada DN100 Clase 300	Cumple	Cumple	Cumple
Aplicación: Vapor	Cumple	Cumple	Cumple
Precisión <1.0 %	Cumple	Cumple	Cumple
Rango 0 a 20 bar	Cumple	Cumple	Cumple
Rango 0 a 250°C	Cumple	Cumple	Cumple
Con pantalla integral con teclado	Cumple	Cumple	Cumple
Salida digital a 2 hilos 4 a 20 ma	Cumple	Cumple	Cumple
Comunicación con protocolo Hart	Cumple	Cumple	Cumple
Protección IP67	Cumple	Cumple	Cumple
Configuración de modo de Falla	Cumple	Cumple	Cumple
Tiempo de entrega	Stock	6 meses	8 meses
Costo	Menor a 3000 USD	Mayor a 3000 USD	Mayor a 3000 USD

**Transmisor de presión diferencial Lazo de control LIC06 y DPT01:** para ambos tipos de transmisores de presión, con un rango de medición de 0 a 20 bar de presión manométrica por punto de medición, una presión diferencial entre el punto de baja y de alta entre 0 a 10 bar, para aplicaciones con vapor saturado y condensado. Para el lazo de control DPT01, se trabaja con medición de presión, mientras que, para el lazo LIC06, se trabaja con medición de nivel en un tanque con presencia de líquido y gas; es por ello que se usa la medición de presión diferencial.

En ese sentido, los transmisores de presión diferencial con diafragma interno son los más precisos y robustos, con una precisión menor o igual a 0.1%, protección a sobrepresiones sin daños a los sensores; para ello es necesario usar aceite de silicona como fluido de llenado en los diafragmas y como material acero inoxidable, con certificación ante pruebas hidrostáticas, para aplicaciones de vapor con rango de trabajo desde los 0°C hasta los 220°C. Los transmisores con pantalla integral con teclado para las configuraciones y contrastes respectivos, comunicación digital basado en el protocolo *Hart* y señal de salida de 2 hilos de 4 a 20 ma, parámetros de cero y *span* configurables, que el transmisor posea la característica de amortiguamiento en el tiempo de respuesta y que sea configurable mediante parámetro, con resistencia de aislamiento mayor a los 100 Mohm, con resistencia a la vibración propia del proceso y protección a las sobretensiones eléctricas. El transmisor debe ser hermético al polvo y con protección IP67 ante los efectos de la inmersión, alimentación eléctrica de 24 Vdc e integrado ante modos de falla, el transmisor da una señal de salida del último valor valido.

Para este tipo de transmisor, se disponen con los modelos de las marcas ABB, *Yokogawa* y *Endress & Hauser*. A continuación, se detalla la comparación entre las tres marcas para la selección del instrumento en base a confiabilidad, las prestaciones y el costo. Los tres modelos cumplen con las especificaciones técnicas. Se descarta la marca *Yokogawa*; ya que el tiempo de fabricación supera los seis meses, pues no es un modelo muy común para esas aplicaciones. Se descarta la marca *Endress & Hauser* por un costo superior al 35% de las marcas ABB y *Yokogawa*. El modelo escogido es el 266HSH de la marca ABB.

**Figura 99**

Imagen de transmisor de presión diferencial Marca ABB Modelo 265DS.



Nota: fuente <https://new.abb.com/life-sciences/instrumentation>

**Figura 100**

Cuadro comparativo para los transmisores de presión diferencial del tipo diafragma.

MARCA	ABB	YOKOGAWA	ENDRESS & HAUSER
MODELO	265DS	EJX110A	PMD75
Rango presión absoluta 0 a 20 bar	Cumple	Cumple	Cumple
Rango presión diferencial 0 a 20 bar	Cumple	Cumple	Cumple
Rango temperatura 0 a 220°C	Cumple	Cumple	Cumple
Aplicación: Vapor para 2 fases	Cumple	Cumple	Cumple
Precisión < 0.1%	Cumple	Cumple	Cumple
Protección a sobrepresiones 100 bar	Cumple	Cumple	Cumple
Aceite de silicona en el diafragma	Cumple	Cumple	Cumple
Certificado para pruebas hidrostáticas	Cumple	Cumple	Cumple
Con pantalla integral con teclado	Cumple	Cumple	Cumple
Salida digital a 2 hilos 4 a 20 ma	Cumple	Cumple	Cumple
Comunicación con protocolo Hart	Cumple	Cumple	Cumple
Protección IP67	Cumple	Cumple	Cumple
Configuración de modo de Falla	Cumple	Cumple	No cumple
Tiempo de entrega	2 meses	6 meses	6 meses
Costo	Menor a 2000 USD	Menor a 2000 USD	Mayor a 2000 USD

**Válvulas de bola segmentada, con actuador neumático tipo cilindro y con posicionadores electrónicos Lazo de control PIC04, VIC05 y LIC06:** las válvulas de control deben ser del tipo de bola segmentada o bola caracterizada, con una precisión menor al 2% para la posición, que trabaje de forma óptima en el rango de 0% a 100%, esto según su curva característica. La válvula debe ser de material acero inoxidable clase 300, del tipo wáter para que esté autosoportada entre dos bridas, para tuberías de proceso de 4 pulgadas o DN100. Las válvulas operan en aplicaciones con vapor saturado y condensado, con rango de presión entre 0 a 20 bar y rango de temperatura de 0 a 250°C,

frecuencia de mantenimiento mayor a los 5 años de operación. Estas válvulas son accionadas por actuadores neumáticos del tipo cilindro, con gran alto torque para vencer la oposición que genere la válvula, una precisión menor al 2% para el control de posición.

Estos actuadores deben ser de doble efecto, con cuerpo de acero inoxidable, resistente a la corrosión, resistente a temperaturas ambientes hasta los 70°C, con orings de material de vitón, protección al polvo y grado de protección a inmersiones del tipo IP67, frecuencia de mantenimiento mayor a los 5 años de operación. Los posicionadores deben ser del tipo electrónico, con una precisión al 1% en la exactitud de la posición, que cuente con una realimentación de la posición real de la válvula, pantalla integral y teclado capaz de programar funciones como el *auto-tuning* o funciones de autodiagnóstico ante una falla, ya sea en la válvula-actuador o el posicionador mismo, integrado el modo de cierre o apertura total ante algún modo de falla, parámetro de cero y *span* configurables mediante el posicionador, alimentación eléctrica de 24Vdc, entrada de control 4 a 20 ma en 2 cables, comunicación que soporte el protocolo *Hart*, protección al polvo y una protección ante inmersiones de grado IP67, protección ante sobretensiones eléctricas, resistencia de aislamiento mayor a 100Mohm.

Para este tipo de válvulas de control, que incluyen válvula-actuador-posicionador, se disponen con los modelos de las marcas Neles, Bray Controls y Samson. A continuación, se detalla la comparación entre las tres marcas para la selección del instrumento en base a confiabilidad, las prestaciones y el costo. Los tres modelos cumplen con las especificaciones técnicas. La que mejor cumple con las características de confiabilidad con una mayor frecuencia de mantenimiento es la Marca Neles, asimismo, que es el modelo de mayor experiencia en el sector de vapor. En bases a costo y disponibilidad, la marca Bray Controls es la que mejor se acomoda a nuestras necesidades; sin embargo, va a prevalecer la confiabilidad y la experiencia en el sector de vapor, por lo que se elige a la marca Neles. Asimismo, esta decisión está alineada con la empresa fabricante de la máquina papelera. En la figura 101 y 102, se realiza el cuadro comparativo, y en la figura 103 se describe el modelo seleccionado.

**Figura 101**

Cuadro comparativo para las válvulas de bola segmentada y actuadores neumáticos.

MARCA	NELES	BRAY CONTROLS	SAMSON
<b>MODELO VALVULA</b>	<b>V-PORT</b>	<b>MODELO S19</b>	<b>3310</b>
<b>MODELO ACTUADOR</b>	<b>SERIE RA</b>	<b>SERIE 92</b>	<b>3241</b>
<b>MODELO POSICIONADOR</b>	<b>ND9000</b>	<b>SERIE 6A</b>	<b>3730</b>
Valvula tipo bola segmentada	Cumple	Cumple	Cumple
Valvula con precisión menor a 2%	Cumple	Cumple	Cumple
Rango óptimo de válvula de 0 a 100%	Cumple	Cumple	Cumple
Válvula DN100, acero inoxidable, Clase 300	Cumple	Cumple	Cumple
Válvula presión 0 a 20 bar, 0 a 250 °C	Cumple	Cumple	Cumple
Válvula aplicación: vapor saturado	Cumple	Cumple	Cumple
Válvula con mantenimiento mayor a 5 años	Cumple	Cumple parcialmente	No cumple
Actuador neumático tipo pistón doble efecto	Cumple	Cumple	Cumple
Actuador con precisión menor a 2%	Cumple	Cumple	Cumple
Actuador cuerpo acero inox, resistente a la corrosión	Cumple	Cumple	Cumple
Actuador con temperatura ambiente hasta 70°C	Cumple	Cumple	Cumple
Actuador con orings de vitón	Cumple	Cumple	Cumple
Actuador con mantenimiento mayor a 5 años	Cumple	Cumple parcialmente	No cumple

**Figura 102**

Cuadro comparativo para los posicionadores de las válvulas de control.

MARCA	NELES	BRAY CONTROLS	SAMSON
<b>MODELO VALVULA</b>	<b>V-PORT</b>	<b>MODELO S19</b>	<b>3310</b>
<b>MODELO ACTUADOR</b>	<b>SERIE RA</b>	<b>SERIE 92</b>	<b>3241</b>
<b>MODELO POSICIONADOR</b>	<b>ND9000</b>	<b>SERIE 6A</b>	<b>3730</b>
Posicionador electrónico con precisión menor a 1%	Cumple	Cumple	Cumple
Posicionador con realimentación de posición	Cumple	Cumple	Cumple
Posicionador con pantalla integral con teclado	Cumple	Cumple	Cumple
Posicionador con salida digital a 2 hilos 4 a 20 ma	Cumple	Cumple	Cumple
Posicionador con comunicación con protocolo Hart	Cumple	Cumple	Cumple
Posicionador con protección IP67	Cumple	Cumple	Cumple
Posicionador con configuración de modo de Falla	Cumple	Cumple	Cumple
Posicionador con mantenimiento mayor a 5 años	Cumple	Cumple parcialmente	Cumple parcialmente
Tiempo de entrega	3 meses	Stock	6 meses
Costo	Menor a 5000 USD	Menor a 3000 USD	Mayor a 5000 USD

**Figura 103**

Imagen de válvula Modelo V- port, Actuador Serie RA, Posicionador ND9000 de la marca Neles.



Nota: fuente <https://www.pce-sl.es/manufacturers/neles/>

**Termocompresor, con actuador neumático tipo diafragma y posicionador electrónico Lazo de control PIC04:** el fabricante de la máquina papelera, ha recomendado, en esta ampliación del secado por vapor, la marca y modelo para el termocompresor. Por ello, se ha decidido seguir dichas recomendaciones.

El termocompresor como tal o la válvula propiamente dicha es de la marca *Korting*, modelo 22-0150-114-R1. El termocompresor es de las dimensiones DN80 x DN100 x DN100, en donde el diámetro al ingreso de vapor vivo del termocompresor es DN80 o 3 pulgadas, el diámetro a la salida de vapor vivo del termocompresor es DN100 o 4 pulgadas, el diámetro del termocompresor de vapor recuperado es DN100 o 4 pulgadas. Este modelo de termocompresor presenta en su diseño una aguja de boquilla, responden con precisión a una amplia gama de condiciones de funcionamiento, asimismo, se caracteriza por la larga vida de servicio, con gran capacidad de regeneración de vapor recuperado, rápido tiempo de respuesta. Este modelo requiere de poco mantenimiento, con un alto grado de confiabilidad y fácil de usar. Su precisión radica en su diseño preciso, sus diseños están basados en curvas características en base a las pruebas realizadas en campo, la cual están soportadas en toda la experiencia de la marca *Korting* en el sector de vapor, y con software desarrollado a la interna, que utiliza cálculos computacionales en dinámica de fluidos.

El actuador neumático es del tipo diafragma de la marca Samson modelo 3277. El accionamiento con movimiento lineal de simple efecto con membrana enrollable y resortes internos para el movimiento del termocompresor, con una carrera nominal desde 7.5 hasta 30 mm del tipo normalmente cerrado, con fuerzas de empuje para vencer el torque del termocompresor, así como una rápida velocidad de respuesta para la precisión en el control de presión. Asimismo, el termocompresor con el posicionador incluido electro-neumático de la marca Samson modelo 3730-1, el cual puede ser adoptado para accionamiento lineales de simple efecto para poder gobernar el actuador 3277. Usado para rápidas respuestas en el control y condiciones ambientales exigentes. La carcasa es de acero inoxidable, con pantalla y teclado integrado, entrada de 2 hilos de 4 a 20 ma para el control,

parámetros preajustados de fábrica y puesta en marcha automática. En la figura 104, se describe el modelo seleccionado.

**Figura 104**

*Imagen del termocompresor de la Marca Korting Modelo 22-0150-114-R1, con actuador Marca Samson Modelo 3277, y posicionador Marca Samson Modelo 3730-1.*



Nota: fuente <https://proconsamx.com/samson/>

### **3.3.2 Elaboración de especificaciones y selección del sistema de control**

Como ya se dispone con la selección de los nuevos instrumentos, se integran mediante las entradas y salidas de 4 a 20 ma en 2 cables, así como el enlace *Hart* a las estaciones entrantes y salientes del control distribuido actual (DCS). Cabe mencionar que el sistema ya dispone con el DCS de la marca Siemens, y con esta actualización de instrumentos, se amplían los módulos de entrada y salida que requiera el DCS actual, así como la integración de señales, la programación de los bloques lógicos, el arranque, la sintonía de lazos y la programación de alarmas para el sistema SCADA.

Se hace el cuadro comparativo entre las distintas marcas del DCS. Se dispone con la tecnología PCS7 para la marca Siemens, con la tecnología *PlantPAX* para la marca *Rockwell Automation*, y la tecnología System 800xA para la marca ABB. En las figuras 105 y 106 se realiza el cuadro comparativo.

**Figura 105**

*Cuadro comparativo de los controladores de los sistemas DCS.*

MARCA	SIEMENS	ROCKWELL AUTOMATION	ABB
TECNOLOGÍA	PCS7	PLANTPAX	SYSTEM 800XA
Controladores con memoria central 48 Kbytes	Cumple	Cumple	Cumple
Controladores con memoria RAM 256 Kbytes	Cumple	Cumple	Cumple
Controladores con memoria EEPROM 256 Kbytes	Cumple	Cumple	Cumple
Controladores con tiempo procesamiento 0.6 us	Cumple	Cumple	Cumple
Controladores con área para periferia de 4 Kbytes	Cumple	Cumple	Cumple
Controladores con capacidad para bloques de programación de 144 Kbytes	Cumple	Cumple	Cumple
Controladores con 32768 canales digitales	Cumple	Cumple	Cumple
Controladores con 2048 canales analógicos	Cumple	Cumple	Cumple
Controladores con multiprocesamiento de 4 CPU	Cumple	Cumple	Cumple
Controladores con resolución de 1ms	Cumple	Cumple	Cumple
Controladores con emisión de paquetes por emisión 512 bytes	Cumple	Cumple	Cumple
Controladores con emisión de paquetes por recepción 1024 bytes	Cumple	Cumple	Cumple
Controlador con alimentación 24 Vdc menor a 4 Amp.	Cumple	Cumple	Cumple

**Figura 106**

*Cuadro comparativo del sistema de adquisición de datos de los sistemas DCS.*

MARCA	SIEMENS	ROCKWELL AUTOMATION	ABB
TECNOLOGÍA	PCS7	PLANTPAX	SYSTEM 800XA
Software con plataforma de ingeniería y proyectos	Cumple	Cumple	Cumple
Modo de programación por interconexión de bloques	Cumple	Cumple	Cumple
Modo de programación por secuencia de bloques	Cumple	Cumple	Cumple
Software para configuración de hardware en línea	Cumple	Cumple	Cumple
Software con bloques lógicos para el control de válvulas	Cumple	Cumple	Cumple
Software con bloques lógicos para el control PID	Cumple	Cumple	Cumple
Software con arquitectura de multiproyectos	Cumple	Cumple	Cumple
Sistema de control con arquitectura cliente servidor	Cumple	Cumple	Cumple
Sistema de control con estación de ingeniería	Cumple	Cumple	Cumple
SCADA con faceplates para instrumentación y control	Cumple	Cumple	Cumple
SCADA con animaciones de objetos, efectos ópticos, estilos, colores	Cumple	Cumple	Cumple
SCADA con opción para tendencias de variables	Cumple	Cumple	Cumple
SCADA con más de 2000 alarmas configurables	Cumple	Cumple	Cumple
SCADA con faceplate para control PID	Cumple	Cumple	Cumple
SCADA con niveles de supervisión	Cumple	Cumple	Cumple
Sistema DCS compatible con el sistema actual	Cumple	No cumple	No cumple
Puesta en servicio del sistema DCS	Menor a 2 meses	Menor a 4 meses	Menor a 4 meses
Inversión para puesta en marcha	Menor a 20,000 USD	Mayor a 50,000 USD	Mayor a 40,000 USD

El sistema de control distribuido de Siemens, conocido como PCS7, dispone de dos controladores lógicos programables S7-400 con CPU 315. Los cuales son los de mayor rendimiento en la familia SIMATIC y ejecuta labores de automatismo basadas en arquitecturas centrales.

Una de sus principales características es el modo multicomputador, que permite el uso de varias CPU en un solo bastidor. También posee la característica de modularidad, ya que en el potente bus del S7-400 se pueden implementar numerosas líneas de comunicación de alto rendimiento, distribuyéndolos en varias líneas de distribución como

una tarea de programación y tareas de interfaces, otra tarea para el control son los *drives* de máquina *Sinamics*, los cuales también son de la familia Siemens, y para el bus de campo de E/S. En la figura 107, se muestran las características, y en figura 108 se describe el CPU S7-400.

**Figura 107**

*Cuadro comparativo de los CPUs de los controladores S7-400.*

Tipo de controlador (AS)	CPU	Interfaces			
		PN/IE (2 puertos)	MDI/DP	DP	Módulo DP enchufable opcional
<b>Controladores estándar</b>					
AS 410S	CPU 410-5H, CPU 410E y CPU 410SIS	2	-	1	-
AS 414-3	CPU 414-3	-	1	1	1
AS 414-3IE	CPU 414-3 PN/DP	1	1	-	1
AS 416-2	CPU 416-2	-	1	1	-
AS 416-3	CPU 416-3	-	1	1	1
AS 416-3IE	CPU 416-3 PN/DP	1	1	-	1
AS 417-4	CPU 417-4	-	1	1	2

Nota: fuente <https://www.siemens.com/global/en/products/automation/systems/industrial/plc/>

**Figura 108**

*Imagen de controlador S7-400 con CPU-314 para el DCS Siemens PCS7.*



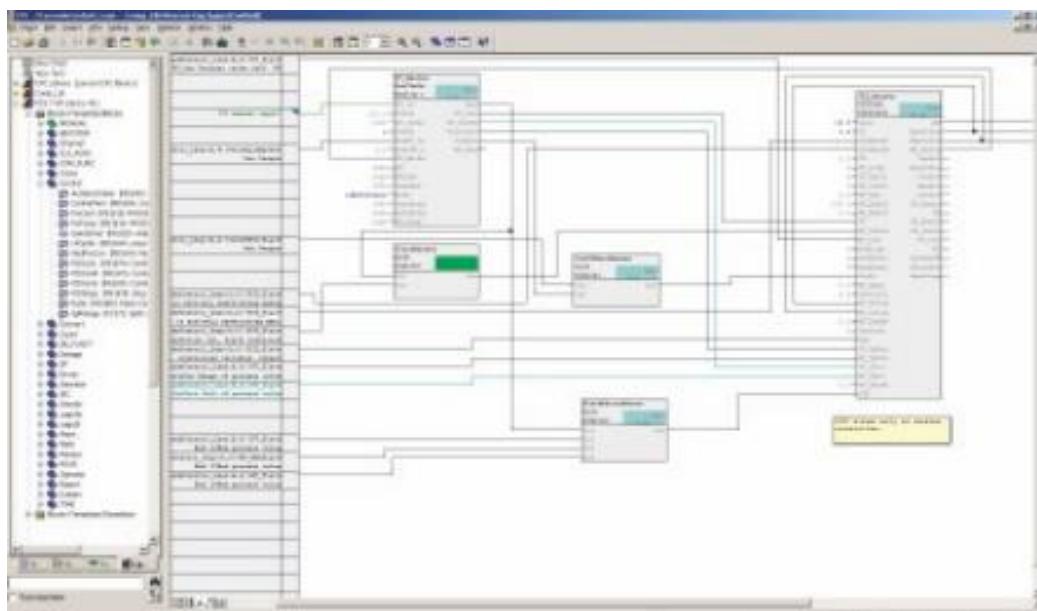
Nota: fuente <https://www.siemens.com/global/en/products/automation/systems/industrial/plc/>

El *Simatic Manager* es la plataforma de integración de Siemens, almacenando esquemas CFC y SFC para los controladores. Este tipo de esquemas son modos de

programación del controlador, ya sea CFC basado en bloques lógicos y el SFC basado en bloques secuenciales. Para la configuración de *hardware*, se usa la aplicación *HW Config*, con la cual se configura y parametriza los controladores, los componentes en la comunicación y la periferia del proceso.

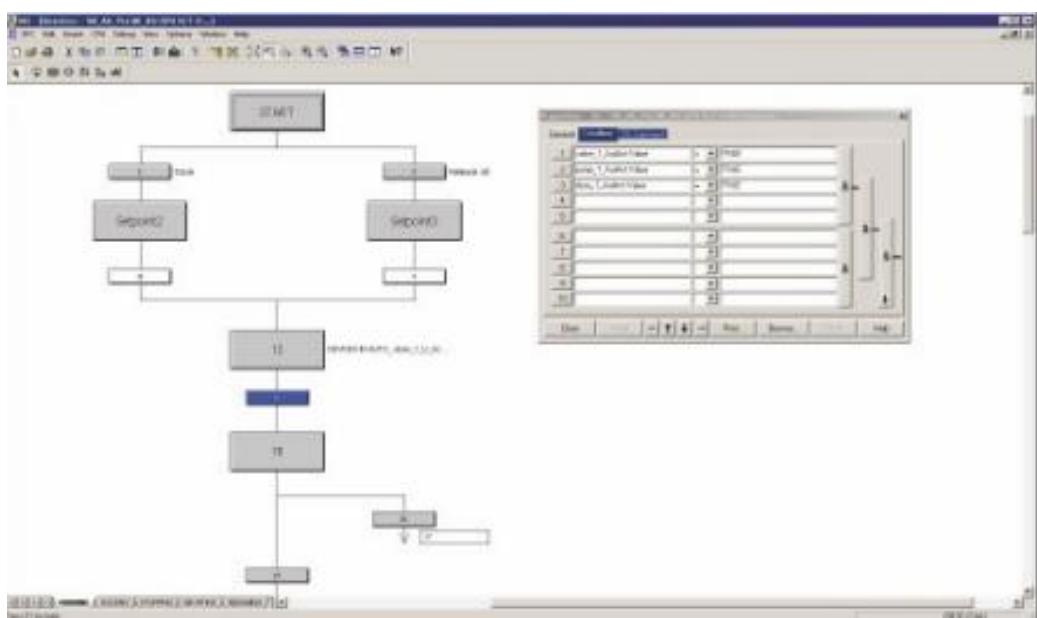
**Figura 109**

*Imagen de lenguaje de programación interconexión de bloques CFC del PCS7.*



**Figura 110**

*Imagen de lenguaje de programación secuencial SFC del PCS7.*



El arquetipo de ingeniería está centrado en: estación de ingeniería clásica y exclusiva, donde se da la edición de proyectos en una estación centralizada. Para editar los proyectos se dispone de la herramienta de Multiproyectos. La operación se soporta en poderosas *Industrial Workstations Simatic PCS7*, controlando hasta cuatro monitores en proceso en modo multimonitor. La arquitectura PCS7 almacena datos pasados, alertas, alarmas, tendencias, gráficas, que facilitan la operación. En las figuras 111, 112 y 113, se muestran las prestaciones del sistema PCS7.

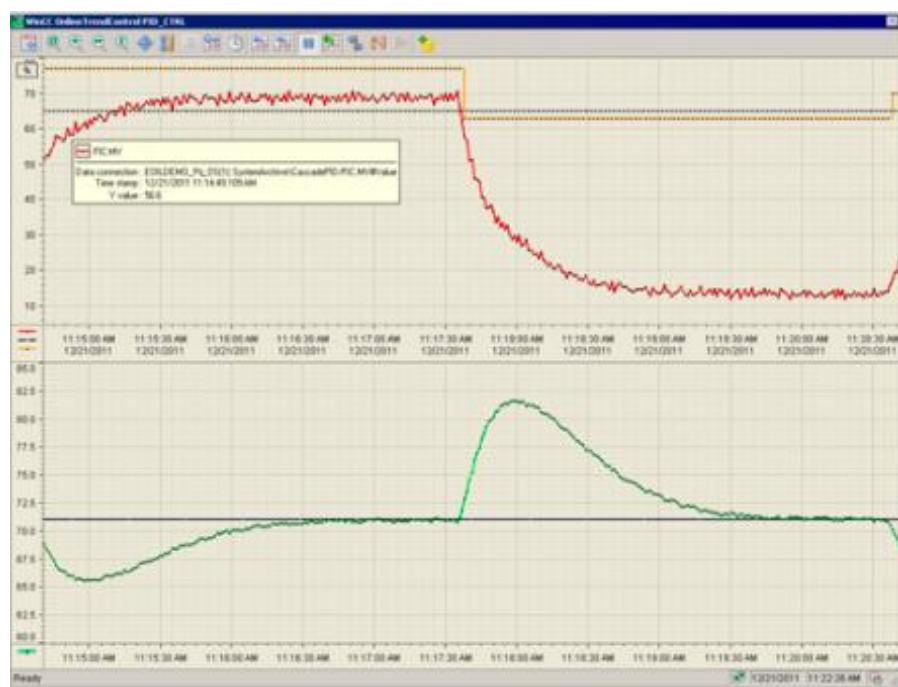
**Figura 111**

*Imagen de software WINCC como interfaz de operación del sistema PCS7.*



**Figura 112**

Imagen de función de tendencia en variables de procesos Software WINCC – PCS7.



**Figura 113**

Imagen de función de lista de alarmas Software WINCC – PCS7.



### **3.4 Instalación, precomisionamiento, comisionamiento y puesta en marcha**

La instalación, precomisionamiento, comisionamiento y puesta en marcha es realizada con personal propio del área de Mantenimiento, siendo especialistas en izaje y montaje electromecánico, especialistas mecánicos, especialistas electricistas, especialistas instrumentistas y especialistas programadores. De igual forma, con el soporte de la empresa fabricante de la máquina papelera, y otras dos empresas soporte para esta última etapa: la primera empresa ha desarrollado los cálculos y la ingeniería para el nuevo *yankee* y la actualización al sistema de secado por vapor, y a la segunda empresa, que es especialista en la programación del sistema DCS y especialista sistemas de instrumentación.

#### **3.4.1 Instalación y montaje de equipos**

Esta etapa se inicia con el desmontaje de los equipos, que son cambiados por nuevos de mayor capacidad como el *yankee*, el tanque separador de condensado, los ductos de vapor y la instrumentación de campo para el desmontaje del *yankee*, el tanque separador de condensado y las tuberías de distribución de vapor por ser equipos de gran tamaño y volumen.

Para el retiro del *yankee* actual, primero se desconectan todas las conexiones neumáticas y de instrumentación del *yankee*; como segundo punto, se desacopla el *yankee* del reductor y los motores eléctricos que lo gobiernan, así como las conexiones eléctricas de los motores y la lubricación del reductor; como tercer punto, se procede con el retiro de la capota, que es la estructura que proporciona secado por aire caliente y que trabaja de forma adyacente al *yankee*, desconectando todas las conexiones neumáticas y de instrumentación que las gobierna, así como las conexiones al proceso y a los ductos de aire; como cuarto punto, se retira toda la parte delantera de la máquina papelera para que pueda salir por dicha zona tanto el *yankee* como la capota. La referencia de la parte delantera de la máquina papelera, es al sistema de bobinado conocido como pope, para el

cual se hacen las desconexiones de las estructuras mecánicas, desconexiones de pistones y el sistema hidráulico, desconexiones de pistones y el sistema neumático, desconexiones de motores eléctricos y el sistema de sensores que lo gobiernan. Como quinto punto, se desconecta la junta rotativa de vapor, las conexiones bridadas del proceso al yankee y toda conexión mecánica entre el yankee y las tuberías de distribución de vapor. Por último, se procede con el izaje para el retiro de la capota y yankee por la delante de la máquina.

**Figura 114**

*Fotografía de la desconexión de la parte delantera, sistema de bobinado.*



**Figura 115**

*Fotografía del izaje y desconexión de la capota.*



**Figura 116**

*Fotografía del retiro del yankee actual por la parte delantera.*



Retiro del tanque separador de condensado actual. Primero, se procede con el retiro de las conexiones neumáticas y de instrumentación del tanque; segundo, la desconexión de la bomba de descarga, así como del motor eléctrico y sus conexiones; tercero, la desconexión de las bridas de proceso del tanque y toda conexión mecánica del tanque separador hacia el proceso. Terminados estos tres puntos, se hace el izaje del tanque separador de condensado por la parte delantera de la máquina.

El desmontaje de los instrumentos está a cargo de personal de mecánico e instrumentista de Mantenimiento, para lo cual se han identificado los siguientes equipos: medidor de presión PT01, medidor de temperatura TT01, medidor de flujo FT01, medidor de presión PIC04, termocompresor, 01 válvula de control del lazo PIC04, 01 medidor de presión diferencial DPT07, 01 medidor de flujo VIC05, 02 válvulas de control del lazo VIC05, medidor de nivel LIC06, 02 válvulas de control del lazo LIC06, 01 medidor de temperatura del lazo LIC06. Se procede con la desconexión neumática y de control de todos estos instrumentos. Luego, con la desconexión mecánica, siendo en las válvulas las conexiones bridadas y en los instrumentos las conexiones roscadas. Por último, se da inicio al desmontaje de los ductos de vapor.

Para desmontar las tuberías de vapor, se identifican las juntas flexibles, así como las estructuras de izaje y soporte de las tuberías. Identificados estos puntos, se conectan las conexiones bridadas entre tuberías y las conexiones mecánicas al proceso; ya que solo se amplía el diámetro las tuberías, mas no las distancias, no es necesario cambiar la forma geométrica del recorrido de las tuberías. En la figura 117, se detallan imágenes del paso a paso que se dio para la desconexión de equipos actuales.

**Figura 117**

*Fotografía del retiro de la instrumentación actual del sistema de vapor.*



Para el montaje de equipos, se inicia en el sentido opuesto. Es decir, con la llegada del nuevo *yankee*, se coordina y gestiona el traslado a planta en Santa Anita -Lima. Llegado a planta, se inspecciona al *yankee* con los ensayos no destructivos correspondientes, que validan el buen estado, se descarta cualquier tipo de desperfecto, ya sea en la fabricación o en el transporte del mismo.

Como tercer punto, se inicia el montaje del nuevo *yankee* por la parte delantera de la máquina. Luego de ello el montaje de la capota, en este punto para su validación se realizan mediciones de la distancia en toda la circunferencia del *yankee*, se deja las distancias de regulación en 50 mm cuando está en posición cerrada y en 300 mm cuando

está en posición abierta. Como quinto punto, se hacen las conexiones mecánicas, así como la conexión al reductor y las conexiones eléctricas a los motores. En paralelo, se realizan las conexiones neumáticas y de control, así como la junta rotativa. En sexto punto, se realizan las conexiones neumáticas y de control de la capota, así como las conexiones a procesos y a los ductos de aire a los cuales están intercomunicados.

Por último, se normaliza el sistema de bobinado por la parte delantera, el cual se sacó para que por ahí pueda ingresar tanto el yankee como la capota, así como las conexiones de las estructuras mecánicas, las conexiones de los pistones y sistema hidráulico, las conexiones de los pistones y sistema neumático, las conexiones de motores eléctricos y el sistema de sensores que lo gobiernan. En las figuras 118, 119 y 120, se muestran las acciones.

**Figura 118**

*Fotografía de la llegada del yankee desde Europa al puerto de Pisco.*



**Figura 119**

*Fotografía del izaje y montaje del nuevo yankee en la máquina.*



**Figura 120**

*Fotografía del izaje y montaje de la capota con el nuevo yankee en la máquina.*



Para la instalación del nuevo tanque separador de condensado, este llegó en la misma embarcación que el *yankee*, desde el puerto de Pisco hasta Santa Anita. Llegado a planta, se procede con la inspección visual y los ensayos no destructivos al tanque, validando el buen estado en su arribo y descartando cualquier desperfecto de fábrica o en el transporte. Validado este punto, se procede con el izaje y la instalación del tanque. Colocado el tanque, se procede con el cambio de los ductos de vapor, de manera secuencial en base a las estructuras de soporte y a las bridas entre tuberías y conexiones al proceso interconectándolas entre sí, conectándolas con el proceso como las conexiones con las juntas rotativas del *yankee*, así como las conexiones con las bridas del tanque tanto en la carga como en la descarga. Luego, se procede con la conexión de la bomba, así como del motor eléctrico, las conexiones eléctricas, conexiones neumáticas y conexiones de control del tanque. En la figura 121, se muestra este detalle.

### **Figura 121**

*Fotografía del montaje de tanque separador de condensado.*



En primer punto, se validan según las especificaciones técnicas definidas en el apartado 3 del capítulo 3, aprobando así los instrumentos. Luego, se procede con el

montaje para el caso de los transmisores (PT01, TT01, PIC04, LIC06, TT06, DPT007), que son de tipo roscado y con el soporte del equipo de estructuras de Mantenimiento. Se procede con la soldadura de las uniones roscadas de los instrumentos, dichas posiciones son fijadas en base a las reservas de cable de los anteriores instrumentos. Una vez concluido el proceso de soldadura, se procede a realizar ensayos no destructivos como tintes penetrantes, determinando que no existen fallas en la soldadura. Para las válvulas de control, termocompresor y flujómetros, que son de conexión del tipo wafler (FT01, PV1-4, PV2-4, VV1-5, VV2-5, LV1-6, LV2-6, VIC05) se sueldan las bridas de clase 300 en las nuevas tuberías de distribución de vapor. Esto con el soporte del equipo de estructuras, validando en los ensayos no destructivos de tintes penetrantes el buen estado de la soldadura. La posición de los instrumentos es fijada en base a las reservas de los cables de los instrumentos anteriores. Se lleva a cabo el montaje mecánico de los instrumentos, la conexión neumática y la conexión de control para dichos instrumentos.

**Figura 122**

*Especificaciones técnicas de la actualización de los instrumentos del sistema de vapor.*

DESCRIPCIÓN	COMPONENTE	TAG	MARCA	MODELO
Transmisor de temperatura	Transmisor	TT01	ENDRESS & HAUSER	TR10
Transmisor de presión	Transmisor	PT01	ABB	266HSH
Transmisor de flujo	Transmisor	FT01	YOKOGAWA	VY DN100
Transmisor de presión	Transmisor	PIC04	ABB	266HSH
Termocompresor	Válvula		KORTING	22-0150-114-R1
	Actuador	PV 1-4	SAMSON	3277
	Posicionador		SAMSON	3730-1
Valvula 2 de control Lazo PIC04	Válvula	PV 2-4	NELES	V - PORT
	Actuador		NELES	SERIE RA
	Posicionador		NELES	ND9000
Transmisor de flujo	Transmisor	VIC05	YOKOGAWA	VY DN100
Valvula 1 de control Lazo VIC05	Válvula		NELES	V - PORT
	Actuador	VV 1-5	NELES	SERIE RA
	Posicionador		NELES	ND9000
Valvula 2 de control Lazo VIC05	Válvula	VV 1-5	NELES	V - PORT
	Actuador		NELES	SERIE RA
	Posicionador		NELES	ND9000
Transmisor de nivel	Transmisor	LIC06	ABB	265DS
Transmisor de temperatura	Transmisor	TT06	ENDRESS & HAUSER	TR10
Valvula 1 de control Lazo LIC06	Válvula	LV 1-6	NELES	V - PORT
	Actuador		NELES	SERIE RA
	Posicionador		NELES	ND9000
Valvula 2 de control Lazo LIC06	Válvula	LV 2-6	NELES	V - PORT
	Actuador		NELES	SERIE RA
	Posicionador		NELES	ND9000
Transmisor de presión diferencial	Transmisor	DPT007	ABB	265DS

**Figura 123**

*Fotografía de la validación de los instrumentos llegados según especificaciones técnicas.*



**Figura 124**

*Fotografía del montaje e instalación de nuevos instrumentos del sistema de vapor.*



Se comienza la ampliación de módulos entrantes y salientes del DCS actual, así como la actualización del software del DCS de la versión PCS7 V7.1 a la versión PCS7 V9.0.

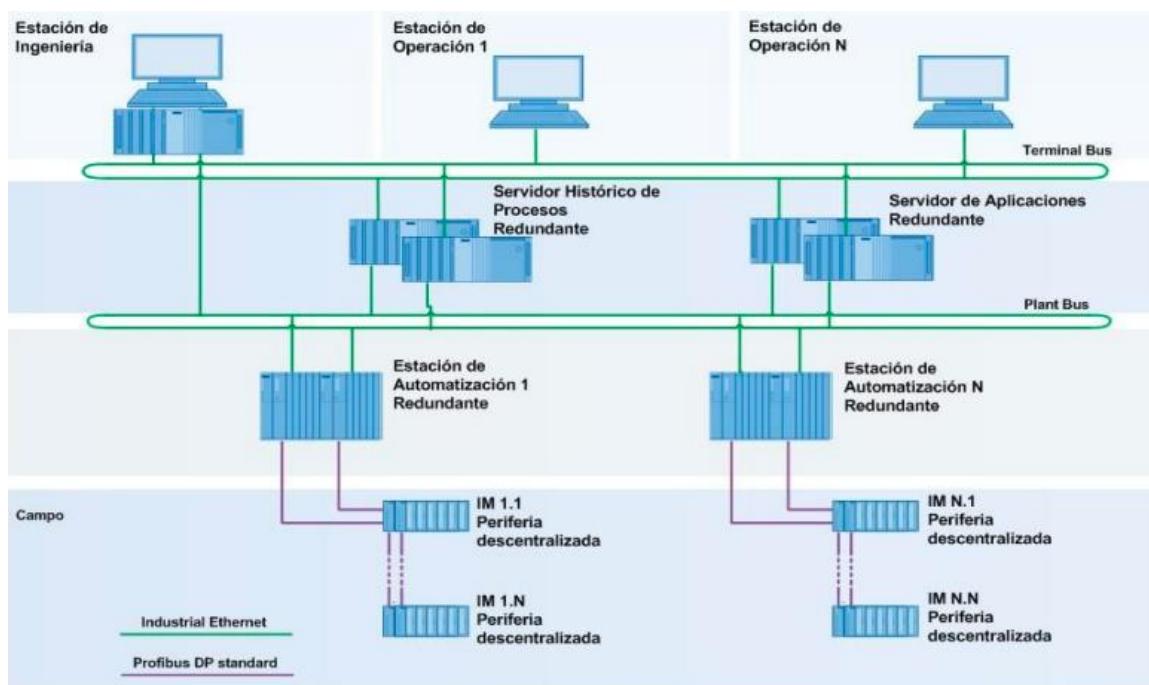
Se realiza la actualización de las tres *workstation* que se dispone en la sala de control. Una de ellas trabaja como la estación de ingeniería y las otras dos trabajan como estación de operación. El modelo a la cual se migran las *workstation* será la PCS7 IPC647D. El sistema de control PCS7 trabaja con una arquitectura de comunicaciones, las cuales constan de *workstation* o estaciones, pueden ser estación de ingeniería o también conocida como ES (*engineering station*), y estación de operación o conocida como OS (*operator station*).

En la estación de ingeniería se hace todo el desarrollo de la programación del controlador, configuración de comunicación y enlaces, programación del sistema interfaz con el operador o SCADA; mientras que, en la estación de operación, se ejecutan en línea el sistema interfaz con el operador, conocido también como SCADA.

Como primer punto, se sacan los respaldos de las tres *workstation*, creando imágenes del sistema operativo Windows XP, plataforma en la cual trabaja el *software* PCS7, asimismo, se saca respaldos de las configuraciones de las conexiones y de la comunicación de estas tres *workstation*. Se procede a sacar los respaldos a los controladores S7-400 del DCS, así como del sistema SCADA WinCC, y las conexiones-comunicaciones en el sistema. Se saca el respaldo de la configuración del *hardware*, así como la configuración de la programación de los bloques lógicos CFC y SFC del controlador S7-400. Una vez que se ha sacado todos los respaldos, se procede con la instalación de los tres *workstation* nuevos. Inicia con la instalación del sistema operativo Windows XP como máquina virtual, instalado el sistema operativo se procede con la instalación del software PCS7 en la versión actualizada 9.0 y, por último, se procede con la carga de los respaldos y las conexiones de las comunicaciones, terminando así la etapa de instalación. En las figuras 125, 126 y 127, se muestran estos detalles.

**Figura 125**

Arquitectura de comunicación ES y OS del sistema PCS7.



Nota: fuente <https://www.siemens.com/global/en/products/automation/systems/industrial/plc/>

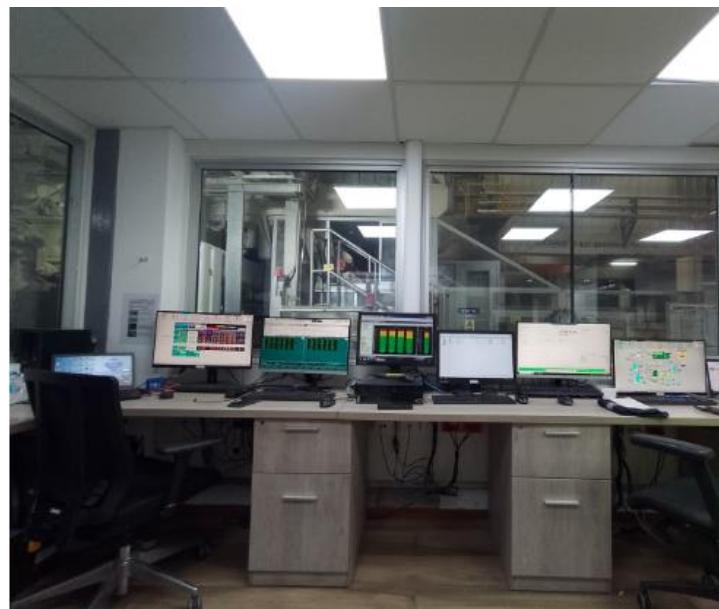
**Figura 126**

Fotografía del proceso de respaldo a workstation y software PCS7 V7.1.



**Figura 127**

*Fotografía de la actualización de workstation y software PCS7 a sala de control.*



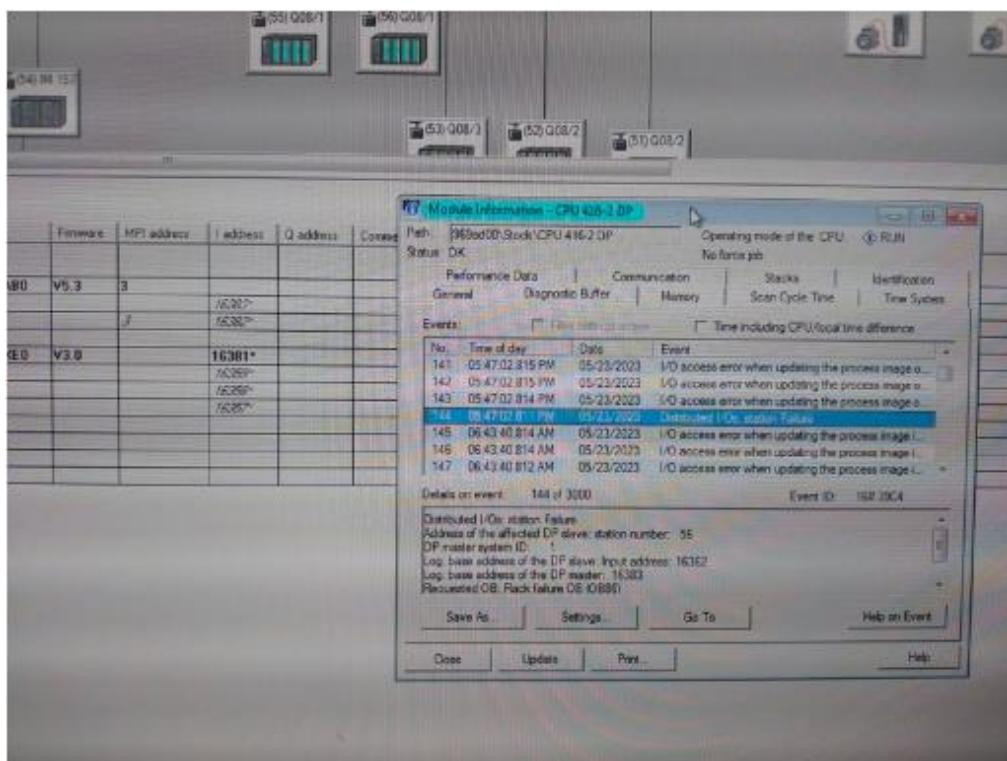
### **3.4.2 Precomisionamiento de equipos**

En esta etapa, se hacen las pruebas de ensayos estáticos e inspecciones previas al arranque de máquina, garantizando que el sistema de instrumentación y control estén de acuerdo a las especificaciones técnicas e ingeniería del proyecto, detectando de forma temprana alguna anomalía o avería en el sistema. Para este precomisionamiento, se centra en la actualización del sistema DCS, así como el sistema de instrumentación.

**Pruebas de precomisionamiento a sistema de control DCS – PCS7 V 9.0:** el primer ensayo a este sistema es la validación del procedimiento de respaldo tanto a la estación de ingeniería como a los dos controladores S7-400 del sistema DCS PCS7. Se realiza la compilación del proyecto *offline* y, al hacer la comparación entre el proyecto *offline* y *online*, no hay mayores diferencias, tanto a nivel de *hardware* como a nivel de los bloques lógicos en ambos controladores; por lo que el sistema permite conectarse en línea a ambos controladores. Estas acciones se muestran en la figura 128 y 129.

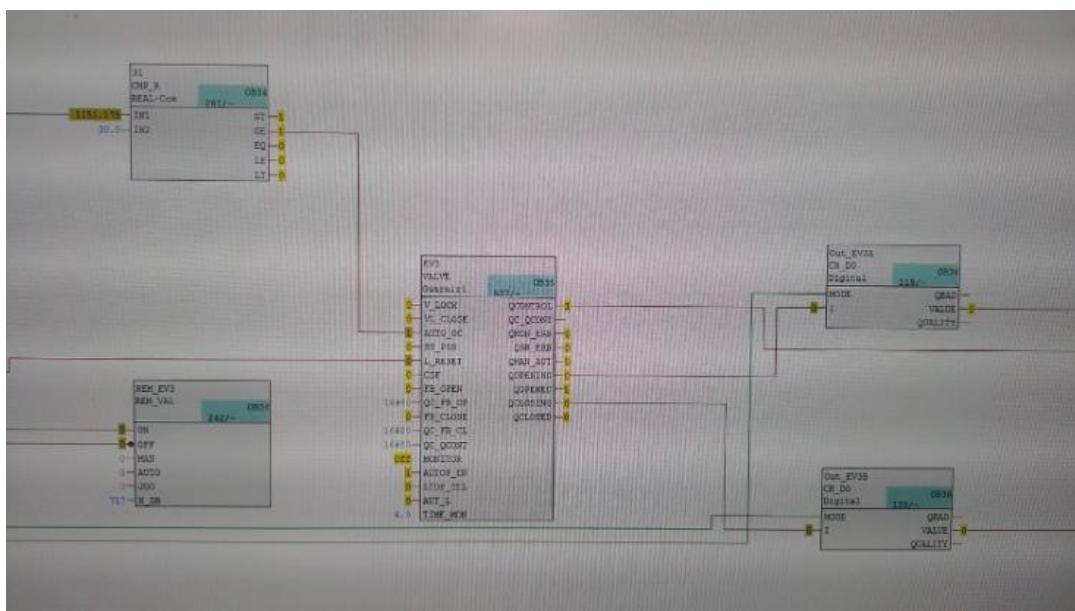
**Figura 128**

Fotografía de la validación del respaldo de hardware en software PCS7 V9.0.



**Figura 129**

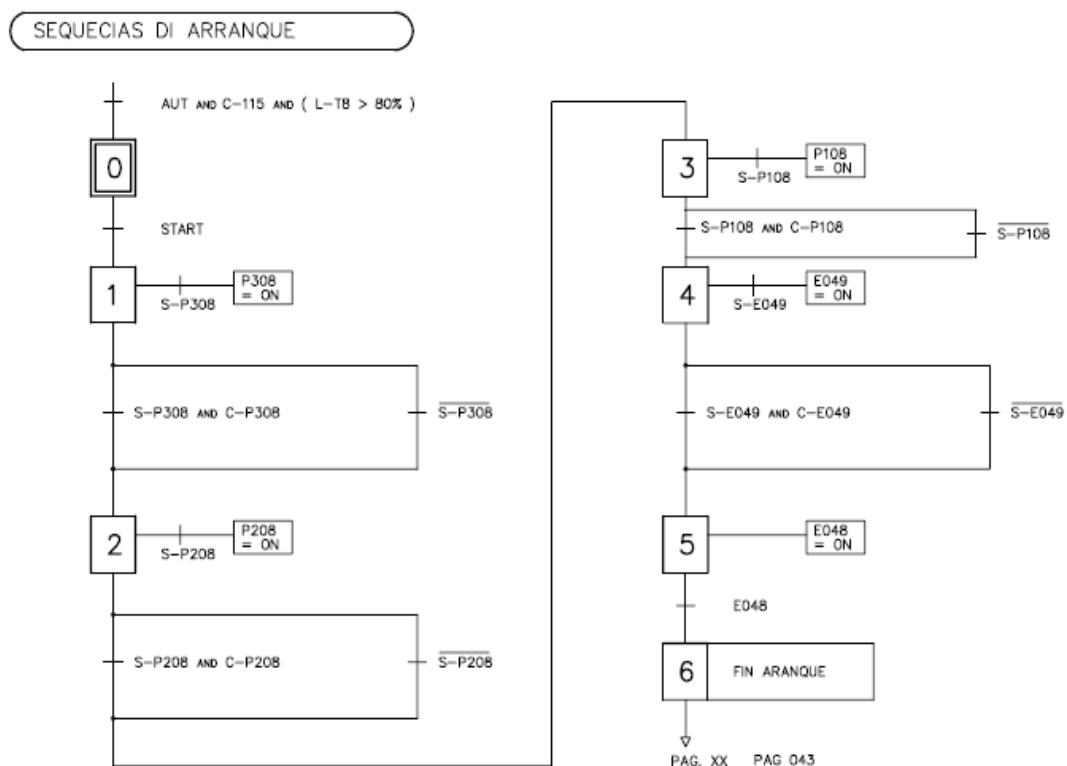
Fotografía de la validación del respaldo de bloques lógicos en software PCS7 V9.0.



En el segundo ensayo, se valida la migración de forma correcta en las principales secuencias de la máquina papelera, por nombrar a la aproximación, secuencia de clarificación, secuencia de refinación, secuencia de vacío, secuencia de cortadura del sistema de vapor, secuencia de secado por aire, secuencia de bobinado. Se ingresa a los bloques lógicos SFC y, en cada uno de ellos, se valida que la secuencia corresponde según el plano lógico de la máquina y el diagrama de bloques lógicos antes de hacer la actualización del software PCS V7.1. Esto se muestra en las figuras 130 y 131.

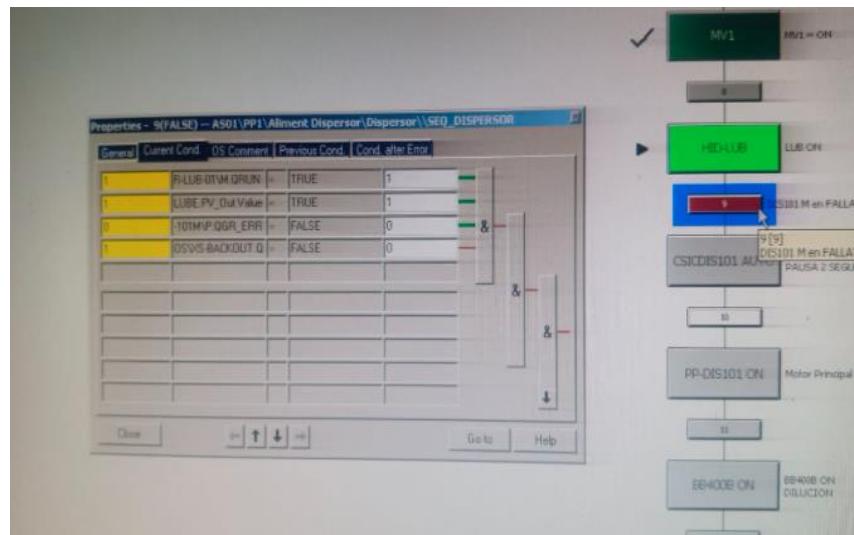
**Figura 130**

*Diagrama de secuencia de bloque lógico para la secuencia de aproximación.*



**Figura 131**

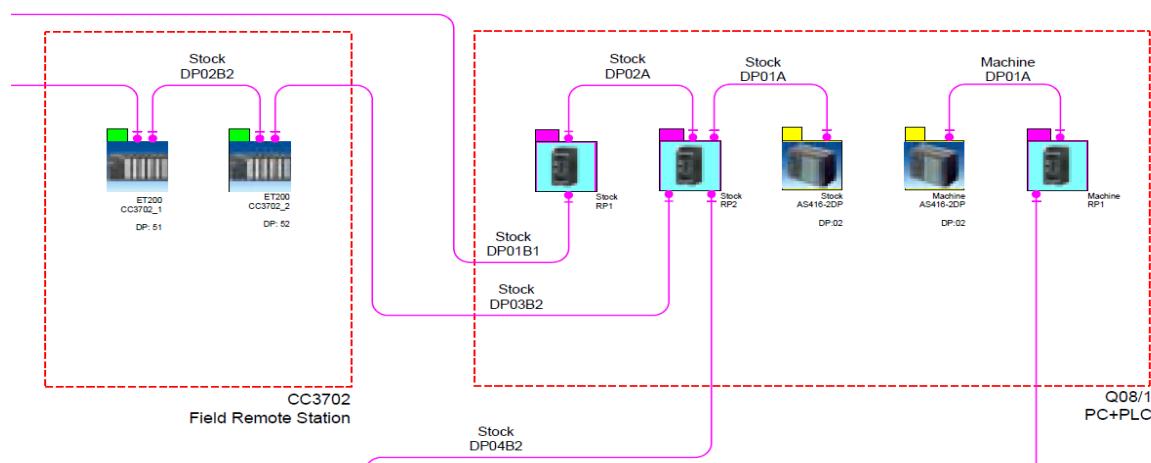
Fotografía de la validación en el software PCS7 de la secuencia de aproximación.



Como último ensayo, se valida la comunicación entre el terminal de ingeniería y los terminales de operación, los controladores del DCS, las estaciones remotas de entrada y salida, los variadores de velocidad mediante la red *Profibus DP*, entre los controladores del DCS y los instrumentos de campo mediante la red *Profibus PA* y la red *HART*. Estas se prueban mediante el *software Simatic HW Config* y *Simatic Net Pro*. Los detalles se muestran en las figuras 132, 133.

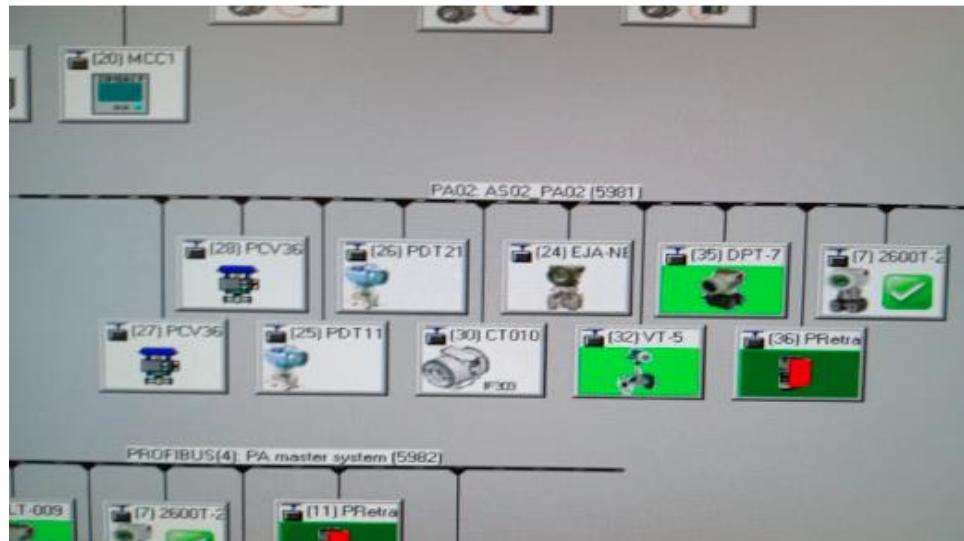
**Figura 132**

Plano de la red *Profibus DP* de los DCS en la máquina.



**Figura 133**

*Fotografía de la validación de las conexiones entre los controladores y los dispositivos de campo.*



Todos estos ensayos al sistema de control DCS son registrados en el protocolo de pruebas de precomisionamiento del PCS7, detallados en las figuras 134 y 135.

**Figura 134**

*Protocolo de precomisionamiento sistema DCS Siemens PCS7.*

PROTOCOLO DE PRUEBAS DE PRECOMISIONAMIENTO		
EQUIPO	DCS PCS7	
DESCRIPCIÓN DE PRUEBA	ESTADO	OBSERV.
Validación backup Hardware PCS7 V9.0	Realizado	Sin Observ.
Validación backup Software PCS7 V9.0	Realizado	Sin Observ.
Conexión en línea sin errores Hardware PCS7 V9.0	Realizado	Sin Observ.
Conexión en línea sin errores Software PCS7 V9.0	Realizado	Sin Observ.
Validación en línea secuencia Sistema Aproximación	Realizado	Sin Observ.
Validación en línea secuencia Sistema Clarificación	Realizado	Sin Observ.
Validación en línea secuencia Sistema Refinación	Realizado	Sin Observ.
Validación en línea secuencia Sistema Vacío	Realizado	Sin Observ.
Validación en línea secuencia cortadura Sistema Vapor	Realizado	Sin Observ.
Validación en línea secuencia Sistema Secado por Aire	Realizado	Sin Observ.
Validación en línea secuencia Sistema Bobinado	Realizado	Sin Observ.
Validación comunicación entre ES y OS	Realizado	Sin Observ.
Validación comunicación entre ES y controlador DCS	Realizado	Sin Observ.
Validación comunicación entre OS y controlador DCS	Realizado	Sin Observ.
Validación comunicación entre DCS y estaciones remota ETM	Realizado	Sin Observ.
Validación comunicación entre DCS y drives SINAMICS	Realizado	Sin Observ.
Validación comunicación entre DCS y dispositivos Profibus DP	Realizado	Sin Observ.
Validación comunicación entre DCS y dispositivos Profibus PA	Realizado	Sin Observ.
Validación comunicación entre DCS y dispositivos Hart	Realizado	Sin Observ.

**Figura 135**

*Fotografía del precomisionamiento de los controladores del sistema DCS Siemens PCS7.*



**Pruebas de precomisionamiento a lazo de instrumentación de presión PIT01:**

el lazo de control PIT01 está conformado con el medidor de temperatura TT01, un medidor de presión PT01 y un medidor de flujo FT01. La función de este lazo es la visualización de la llegada del vapor saturado al sistema, así como contabilizar el flujo de vapor consumido en la máquina. Se inicia con el contraste del transmisor de temperatura, el cual es sometido al horno de calibración de temperatura marca *Isotech* modelo *Quick Cal*, validando la señal del transmisor a temperaturas de 25, 50, 75 y 100°C y comprobando que los errores de medición están dentro del rango aceptable del instrumento. De igual forma, el transmisor de presión es sometido al módulo calibrador de presiones de la marca *Wika* modelo CP7000, generando presiones de 1, 2, 3 y 4 bares y comprobando que los errores de medición se encuentran dentro del rango aceptable del instrumento.

Para el transmisor de presión PT01 y el transmisor de temperatura TT01, se direcciona a una entrada análoga del sistema DCS - tablero Q08/2, configura el *hardware* del DCS como entrada análoga de dos hilos, ya que por este mismo cable llega la señal de

alimentación de 24Vdc para los transmisores y ellos envían, por este medio, la señal análoga de medición.

Para el flujómetro FT01, se direcciona a la entrada análoga según el plano eléctrico, configurándolo como entrada de 4 hilos, ya que el cable de 2 hilos que va del transmisor al módulo del DCS transmite solo la entrada y no los 24Vdc, pues este transmisor usa 220 Vac para la alimentación eléctrica.

Conectados los tres transmisores, se configuran mediante el *handheld* modelo CA300 marca *Yokogawa*, con conexión punto a punto y se configura el cero, el rango de medición o *span*, la salida análoga, así como el tiempo de respuesta y el tipo de aplicación, que en este caso es vapor saturado. Una vez terminadas estas pruebas con el calibrador de procesos multifunción marca *Fluke* modelo 754, se generan las señales de 4, 8, 12, 16 y 20 mA para la validación en el *software* PCS7, así como la validación en el WINCC según el rango fijado. Con esto se valida que tanto el cableado, el direccionamiento de la entrada, la lógica en el DCS y la configuración del SCADA se realizan de forma correcta.

### **Figura 136**

*Fotografía de la configuración con handheld del instrumento de presión PT01.*



**Figura 137**

*Protocolo de precomisionamiento del lazo de instrumentación de presión PT01.*

PROTOCOLO DE PRUEBAS DE PRECOMISIONAMIENTO		
EQUIPO	LAZO PIT01	
DESCRIPCIÓN DE PRUEBA	ESTADO	OBSERV.
Contraste transmisor TT01 con Horno Marca Isotech	Realizado	Sin Observ.
Configuración entrada análoga como 2 hilos para TT01	Realizado	Sin Observ.
Conexión de control del TT01 al módulo DCS	Realizado	Sin Observ.
Configuración parametros transmisor TT01 con handheld	Realizado	Sin Observ.
Prueba de entrada análoga 4, 8, 12, 16, 20 mA para TT01	Realizado	Sin Observ.
Validación en PCS7 y el WINCC de variación del TT01	Realizado	Sin Observ.
Contraste transmisor PT01 con Generador presión Marca Wika	Realizado	Sin Observ.
Configuración entrada análoga como 2 hilos para PT01	Realizado	Sin Observ.
Conexión de control del PT01 al módulo DCS	Realizado	Sin Observ.
Configuración parametros transmisor PT01 con handheld	Realizado	Sin Observ.
Prueba de entrada análoga 4, 8, 12, 16, 20 mA para PT01	Realizado	Sin Observ.
Validación en PCS7 y el WINCC de variación del PT01	Realizado	Sin Observ.
Configuración entrada análoga como 4 hilos para FT01	Realizado	Sin Observ.
Conexión de control y eléctrica del FT01 al módulo DCS	Realizado	Sin Observ.
Configuración parametros transmisor FT01 con handheld	Realizado	Sin Observ.
Prueba de entrada análoga 4, 8, 12, 16, 20 mA para FT01	Realizado	Sin Observ.
Validación en PCS7 y el WINCC de variación del FT01	Realizado	Sin Observ.

#### **Pruebas de precomisionamiento a lazo de instrumentación de presión PIC04:**

el lazo de control PIC04 está conformado con el transmisor de presión PIC04, un termocompresor PV1-4 y una válvula de control PV2-4. La función de este lazo es controlar la presión de vapor al ingreso del yankee a través del termocompresor y la válvula de control PV2-4. Se contrasta el transmisor de presión, sometido al módulo calibrador de presión de la marca *Wika* modelo CP7000, que genera presiones de 1, 2, 3 y 4 bares, comprueba que los errores de medición se encuentran dentro del rango aceptable.

Para el transmisor de presión PIC04, se direcciona a una entrada análoga del sistema DCS - tablero Q08/2, configurando el *hardware* del DCS como entrada análoga de dos hilos, ya que por este mismo cable llega la señal de alimentación de 24Vdc para el transmisor y por ahí se envía la señal análoga de medición.

Para el termocompresor PV1-4 y la válvula de control PV2-4 se configura en el *hardware* del DCS como salida análoga de 2 hilos, ya que por ahí se envía la alimentación de 24 Vdc como la onda de 4 a 20 mA para los posicionadores de válvulas.

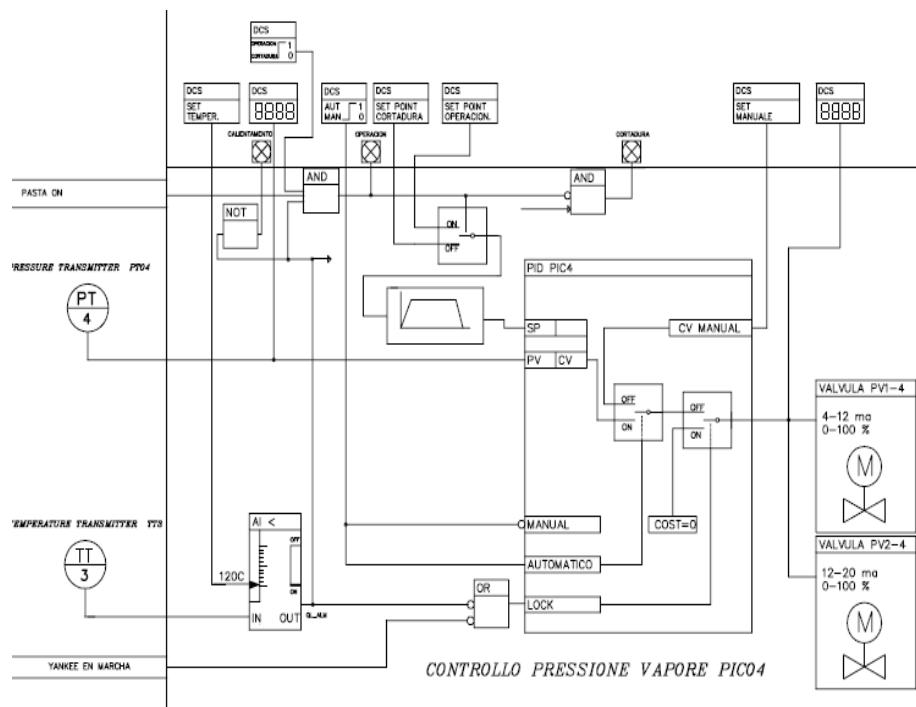
Para el medidor de presión PIC04 configurado mediante el *handheld* Modelo CA300 marca *Yokogawa*. Esta conexión se realiza punto a punto y se configura el cero, el rango de medición o *span*, la salida análoga, así como el tiempo de respuesta y el tipo de

aplicación, que es vapor saturado. Para los posicionadores de las válvulas, con pantalla táctil, la configuración se realiza por este medio. Se configura el tipo de actuador, ya sea de simple o doble efecto, el modo de control, el cero y el *span*, y el *auto tuning* a la válvula.

Terminadas las pruebas, con el calibrador de procesos multifunción marca *Fluke* modelo 754 se generan las señales de 4, 8, 12, 16 y 20 mA para el transmisor de presión PIC04, se realiza la validación en el software PCS7, así como en el WINCC según el rango fijado. Con esto, se valida que el cableado, el direccionamiento de la entrada, la lógica en el DCS y la configuración del SCADA se realiza de forma correcta. Para los posicionadores se realiza lo mismo, solo que esta vez se modifica, desde el SCADA, la posición de forma manual de las válvulas de 0, 25, 50, 75 y 100%, contrastando con el calibrador de procesos que efectivamente lleguen esos valores al posicionador y que la válvula se mueve en esos porcentajes de apertura. En las figuras 138 y 139, se muestra el detalle, mientras que en la figura 140 el protocolo de precomisionamiento.

**Figura 138**

*Diagrama de la lógica del sistema de control lazo PIC04 en la máquina.*



**Figura 139**

*Fotografía de la configuración con handheld del instrumento de presión PIC04.*



**Figura 140**

*Protocolo de precomisionamiento del lazo de instrumentación de presión PIC04.*

PROTOCOLO DE PRUEBAS DE PRECOMISIONAMIENTO		
EQUIPO	LAZO PIC04	
DESCRIPCIÓN DE PRUEBA	ESTADO	OBSERV.
Contraste transmisor PIC04 con Generador presión Marca Wika	Realizado	Sin Observ.
Configuración entrada analógica como 2 hilos para PIC04	Realizado	Sin Observ.
Conexión de control del PIC04 al módulo DCS	Realizado	Sin Observ.
Configuración parámetros transmisor PIC04 con handheld	Realizado	Sin Observ.
Prueba de entrada analógica 4, 8, 12, 16, 20 mA para PIC04	Realizado	Sin Observ.
Validación en PCS7 y el WINCC de variación del PIC04	Realizado	Sin Observ.
Configuración salida analógica como 2 hilos para PV1-4	Realizado	Sin Observ.
Conexión de control del posicionador PV1-4 al módulo DCS	Realizado	Sin Observ.
Configuración parámetros posicionador PV1-4 mediante teclado	Realizado	Sin Observ.
Prueba de salida analógica 0, 25, 50, 75 y 100% PV1-4 desde PCS7	Realizado	Sin Observ.
Validación de la variación desde el DCS en el posicionador PV1-4	Realizado	Sin Observ.
Configuración salida analógica como 2 hilos para PV2-4	Realizado	Sin Observ.
Conexión de control del posicionador PV2-4 al módulo DCS	Realizado	Sin Observ.
Configuración parámetros posicionador PV2-4 mediante teclado	Realizado	Sin Observ.
Prueba de salida analógica 0, 25, 50, 75 y 100% PV2-4 desde PCS7	Realizado	Sin Observ.
Validación de la variación desde el DCS en el posicionador PV2-4	Realizado	Sin Observ.

**Pruebas de precomisionamiento a lazo de instrumentación de flujo VIC05:** el lazo de control VIC05 está conformado con un transmisor de presión de flujo VIC05 y dos válvulas de control VV1-5 y VV2-5. La función de este lazo es controlar la velocidad y flujo

de vapor *flash* a la salida del *yankee*, a través de sus dos válvulas de control VV1-5 y VV2-5.

Para el transmisor de flujo VIC05, se direcciona a una entrada análoga del sistema DCS - tablero Q08/2, configurando el *hardware* del DCS como entrada análoga de cuatro hilos, ya que por este cable solo se envía la señal análoga de medición, pues la alimentación eléctrica del transmisor se hace a través de 220Vac

Para las válvulas de control VV1-5 y VV2-5, se configura en el *hardware* del DCS como salida análoga de 2 hilos, ya que por ahí se envía la alimentación de 24 Vdc como la onda de 4 a 20 ma para los posicionadores de las válvulas.

Para el medidor de flujo VIC05 configurado mediante el *handheld* modelo CA300 marca *Yokogawa*, realizado punto a punto, configurando el cero, el rango de medición o *span*, la salida análoga, así como el tiempo de respuesta y el tipo de aplicación, que es vapor saturado.

Para los posicionadores de las válvulas con una pantalla táctil, la configuración se realiza por este medio. Se configura el tipo de actuador, ya sea de simple o doble efecto, el modo de control, el cero como el *span*, se realiza un *auto tuning* a la válvula para que el posicionador reconozca el tipo de movimiento. Con el calibrador de procesos multifunción marca *Fluke* modelo 754 se generan las señales de 4, 8, 12, 16 y 20 ma para el transmisor de flujo VIC05, se realiza la validación en el software PCS7, así como en el WINCC según el rango fijado.

Con esto se valida el cableado, el direccionamiento de la entrada, la lógica en el DCS y la configuración del SCADA se realiza de forma correcta. Para los posicionadores se realiza lo mismo, solo que esta vez se modifica, desde el SCADA, la posición de forma manual de las válvulas de 0, 25, 50, 75 y 100%, y se contrasta con el calibrador de procesos que lleguen esos valores al posicionador, y que la válvula se mueva en esos porcentajes de apertura. En la figura 141 y 142 el protocolo de precomisionamiento.

**Figura 141**

Fotografía de la configuración con handheld del instrumento de flujo VIC05.



**Figura 142**

Protocolo de precomisionamiento del lazo de instrumentación de flujo VIC05.

PROTOCOLO DE PRUEBAS DE PRECOMISIONAMIENTO		
EQUIPO	LAZO VIC05	
DESCRIPCIÓN DE PRUEBA	ESTADO	OBSERV.
Configuración entrada análoga como 4 hilos para VIC05	Realizado	Sin Observ.
Conexión de control del VIC05 al módulo DCS	Realizado	Sin Observ.
Configuración parametros transmisor VIC05 con handheld	Realizado	Sin Observ.
Prueba de entrada análoga 4, 8, 12, 16, 20 mA para VIC05	Realizado	Sin Observ.
Validación en PCS7 y el WINCC de variación del VIC05	Realizado	Sin Observ.
Configuración salida análoga como 2 hilos para VV1-5	Realizado	Sin Observ.
Conexión de control del posicionador VV1-5 al módulo DCS	Realizado	Sin Observ.
Configuración parametros posicionador VV1-5 mediante teclado	Realizado	Sin Observ.
Prueba de salida análoga 0, 25, 50, 75 y 100% VV1-5 desde PCS7	Realizado	Sin Observ.
Validación de la variación desde el DCS en el posicionador VV1-5	Realizado	Sin Observ.
Configuración salida análoga como 2 hilos para VV2-5	Realizado	Sin Observ.
Conexión de control del posicionador VV2-5 al módulo DCS	Realizado	Sin Observ.
Configuración parametros posicionador VV2-5 mediante teclado	Realizado	Sin Observ.
Prueba de salida análoga 0, 25, 50, 75 y 100% VV2-5 desde PCS7	Realizado	Sin Observ.
Validación de la variación desde el DCS en el posicionador VV2-5	Realizado	Sin Observ.

**Pruebas de precomisionamiento a lazo de instrumentación de nivel LIC06:** el lazo LIC06 está conformado con un transmisor de nivel LIC06, un transmisor de temperatura TT06 y dos válvulas de control LV1-6 y LV2-6. La función de este lazo es controlar el nivel de condensado del tanque, el cual recibe vapor *flash* y condensado del *yankee*.

Este control se hace a través las válvulas de control LV1-6 y LV2-6. Se contrasta el transmisor de nivel, que es un transmisor de presión diferencial, el cual es sometido al módulo calibrador de presión de la marca *Wika* modelo CP7000. Genera presiones de 1, 2, 3 y 4 bares con punto de referencia de baja la presión atmosférica, comprueba que los errores de medición se encuentran dentro del rango aceptable de los instrumentos; asimismo, se hace el contraste del transmisor de temperatura, el cual es sometido al horno de calibración de temperatura marca *Isotech* modelo *Quick Cal*, valida la señal del transmisor a temperaturas de 25, 50, 75 y 100°C y comprueba que los errores de medición están dentro del rango aceptable del instrumento.

Para el transmisor de nivel LIC06 y temperatura TT06, se direccionan a entradas análogas del sistema DCS - tablero Q08/2, configurando el *hardware* del DCS como entradas análogas de dos hilos, ya que por este mismo cable llega la señal de alimentación de 24Vdc para los transmisores y por ahí se envían las señales análogas de medición.

Para las válvulas de control LV1-6 y LV2-6, se configuran en el *hardware* del DCS como salida análoga de 2 hilos, ya que por ahí se envía la alimentación de 24 Vdc como la onda 4 a 20 mA para los posicionadores de las válvulas.

Para el medidor de nivel LIC06 y temperatura TT06, se hacen las configuraciones mediante el *handheld* modelo CA300 marca *Yokogawa* con conexión punto a punto y se configuran el cero, el rango de medición o *span*, la salida análoga, así como el tiempo de respuesta y el tipo de aplicación, que es vapor saturado.

Para los posicionadores de las válvulas, ambos modelos disponen de una pantalla táctil, por lo que la configuración se realiza por este medio. Se configura el tipo de actuador, ya sea de simple o doble efecto, el modo de control se configura tanto el cero como el *span*, se realiza un *auto tuning* a la válvula, para que el posicionador reconozca el tipo de movimiento.

Terminada estas pruebas con el calibrador de procesos multifunción marca *Fluke* modelo 754, se generan las señales de 4, 8, 12, 16 y 20 mA para el transmisor de nivel

LIC06 y el transmisor de temperatura TT06, se realiza la validación en el software PCS7, así como la validación en el WINCC según el rango fijado.

Con esto se valida que tanto el cableado, el direccionamiento de las entradas, la lógica en el DCS y la configuración del SCADA, se realiza de forma correcta. Para los posicionadores se realiza lo mismo, solo que esta vez se modifica desde el SCADA la posición de forma manual de las válvulas de 0, 25, 50, 75 y 100%, y se contrastan con el calibrador de procesos que efectivamente lleguen esos valores al posicionador, y que la válvula se mueva en esos porcentajes de apertura. En la figura 143, se muestra el detalle, así como en la figura 144, el protocolo de precomisionamiento.

**Figura 143**

*Fotografía de la configuración con handheld del instrumento de nivel LIC06.*



**Figura 144**

*Protocolo de precomisionamiento del lazo de instrumentación de nivel LIC06.*

PROTOCOLO DE PRUEBAS DE PRECOMISIONAMIENTO		
EQUIPO	LAZO LIC06	
DESCRIPCIÓN DE PRUEBA	ESTADO	OBSERV.
Contraste transmisor TT06 con Horno Marca Isotech	Realizado	Sin Observ.
Configuración entrada análoga como 2 hilos para TT06	Realizado	Sin Observ.
Conexión de control del TT06 al módulo DCS	Realizado	Sin Observ.
Configuración parametros transmisor TT06 con handheld	Realizado	Sin Observ.
Prueba de entrada análoga 4, 8, 12, 16, 20 mA para TT06	Realizado	Sin Observ.
Validación en PCS7 y el WINCC de variación del TT06	Realizado	Sin Observ.
Contraste transmisor LIC06 con Generador Presión Marca Wika	Realizado	Sin Observ.
Configuración entrada análoga como 2 hilos para LIC06	Realizado	Sin Observ.
Conexión de control del LIC06 al módulo DCS	Realizado	Sin Observ.
Configuración parametros transmisor LIC06 con handheld	Realizado	Sin Observ.
Prueba de entrada análoga 4, 8, 12, 16, 20 mA para LIC06	Realizado	Sin Observ.
Validación en PCS7 y el WINCC de variación del LIC06	Realizado	Sin Observ.
Configuración salida análoga como 2 hilos para LV1-6	Realizado	Sin Observ.
Conexión de control del posicionador LV1-6 al módulo DCS	Realizado	Sin Observ.
Configuración parametros posicionador LV1-6 mediante teclado	Realizado	Sin Observ.
Prueba de salida análoga 0, 25, 50, 75 y 100% LV1-6 desde PCS7	Realizado	Sin Observ.
Validación de la variación desde el DCS en el posicionador LV1-6	Realizado	Sin Observ.
Configuración salida análoga como 2 hilos para LV2-6	Realizado	Sin Observ.
Conexión de control del posicionador LV2-6 al módulo DCS	Realizado	Sin Observ.
Configuración parametros posicionador LV2-6 mediante teclado	Realizado	Sin Observ.
Prueba de salida análoga 0, 25, 50, 75 y 100% LV2-6 desde PCS7	Realizado	Sin Observ.
Validación de la variación desde el DCS en el posicionador LV2-6	Realizado	Sin Observ.

### **Pruebas de precomisionamiento a lazo de instrumentación de presión**

**diferencial DPT007:** el lazo DPT007 está conformado con un transmisor de presión diferencial DPT007 con función de visualizar el diferencial de presión de vapor, respecto al ingreso y a la salida del yankee. Se contrasta el transmisor de presión diferencial con el calibrador de presión de la marca *Wika* modelo CP7000, genera presiones de 1, 2, 3 y 4 bares con la presión atmosférica como referencia, comprobando que los errores de medición se encuentran dentro del rango aceptable.

Para el transmisor de presión diferencial DPT007, se direcciona a una entrada análoga del sistema DCS - tablero Q08/2, configurando el *hardware* del DCS como entrada análoga de dos hilos, ya que por este mismo cable llega la señal de alimentación de 24Vdc para el transmisor y por ahí se envía la señal análoga de medición. Se configura mediante el *handheld* modelo CA300 marca *Yokogawa*. Esta conexión se realiza punto a punto y se configura el cero, el rango de medición o *span*, la salida análoga, así como el tiempo de respuesta y el tipo de aplicación, que es vapor saturado.

Con el calibrador de procesos multifunción marca *Fluke* modelo 754, se generan las señales de 4, 8, 12, 16 y 20 mA para el transmisor de presión diferencial, se valida en el software PCS7, así como en el WINCC según el rango fijado, con esto se valida que tanto el cableado, el direccionamiento de la entrada, la lógica en el DCS y la configuración del SCADA se realizan de forma correcta.

**Figura 145**

*Protocolo de precomisionamiento del lazo de instrumentación de presión DPT007.*

PROTOCOLO DE PRUEBAS DE PRECOMISIONAMIENTO		
EQUIPO	LAZO DPT007	
DESCRIPCIÓN DE PRUEBA	ESTADO	OBSERV.
Contraste transmisor DPT007 con Generador Presión Marca Wika	Realizado	Sin Observ.
Configuración entrada análoga como 2 hilos para DPT007	Realizado	Sin Observ.
Conexión de control del DPT007 al módulo DCS	Realizado	Sin Observ.
Configuración parametros transmisor DPT007 con handheld	Realizado	Sin Observ.
Prueba de entrada análoga 4, 8, 12, 16, 20 mA para DPT007	Realizado	Sin Observ.
Validación en PCS7 y el WINCC de variación del PDT007	Realizado	Sin Observ.

**Figura 146**

*Fotografía de la configuración con handheld del instrumento de presión DPT007.*



Las pruebas y ensayos de precomisionamiento, tanto en el sistema de control del DCS PCS7, así como en el sistema de instrumentación de los lazos PIT01, PIC04, VIC05,

LIC06 y DPT007 se han ejecutado de forma correcta sin mayor observación. Con esto, se pasa a la etapa de comisionamiento.

### **3.4.3 Comisionamiento de equipos y puesta en marcha**

Se ejecutan ensayos con la máquina papelera operando con pulpa de papel y vapor para el secado del papel. Se validan las secuencias de encendido y apagado del secado por vapor, se valida el automático de las etapas de calentamiento, cortadura, operación del yankee y el sistema de vapor, así como la prueba de los *interlocks* de seguridad programados en el DCS *Siemens PCS7*. También, se valida el buen montaje mecánico y el estado de las soldaduras, ya que el sistema está sometido a las condiciones de operación de la caldera. Por último, se realiza la sintonía de los lazos de control PIC04 - VIC05 - LIC06, se hacen las regulaciones necesarias para que el sistema trabaje de manera estable y sin oscilaciones a diferentes velocidades de la máquina, llegando hasta los 2100 m/min, el cual es el objetivo principal de este proyecto.

**Validación de secuencias de encendido y apagado del secado de vapor / Validación del automático de las etapas de calentamiento, cortadura, operación del yankee / Pruebas de *Interlock* del sistema:** estas tres pruebas se agrupan ya que están relacionados una con otra. A continuación, se detalla el paso a paso de cómo trabaja el sistema. Esto validado según la lógica del DCS, ya sea para el encendido y apagado, así como las etapas de funcionamiento del sistema, y los *interlocks* que dispone el sistema para pasar de una etapa a otra. Una vez explicado, se procede con el protocolo de pruebas con condiciones de operación en la máquina.

El modo seguro es aquel modo que adopta el sistema ante un corte imprevisto de la energía eléctrica o simplemente por seguridad cuando el sistema este apagado. Este modo existe, ya que el sistema transporta vapor desde la caldera a una presión de 17.5 bar, puede presurizar el yankee hasta esta presión de ocurrir alguna falla, con presión de diseño del yankee actual es 10.0 bar. Para evitar incidentes, todas las válvulas de control, incluido el termocompresor (PV1-4, PV2-4, WV1-5, LV1.6, LV2-6), son normalmente

cerradas y, ante el fallo, se cierran totalmente. Esta es una de las especificaciones técnicas y uno de los motivos del por qué se eligió a la marca Neles, por su programación ante este tipo de eventos. La única que es normalmente abierta y ante un fallo se apertura totalmente es la válvula VV2-5, que es la válvula de descarga al medio ambiente. El protocolo de pruebas se detalla en la siguiente figura.

**Figura 147**

*Protocolo de puesta en marcha: Modo Seguro.*

PROTOCOLO DE PRUEBAS DE PUESTA EN MARCHA		
MODO DE OPERACIÓN	MODO SEGURO	
DESCRIPCIÓN DE PRUEBA	ESTADO	OBSERV.
Estado de Valvula PV1-4 en 0%	Conforme	Sin Observ.
Estado de Valvula PV2-4 en 0%	Conforme	Sin Observ.
Estado de Valvula VV1-5 en 0%	Conforme	Sin Observ.
Estado de Valvula VV2-5 en 100%	Conforme	Sin Observ.
Estado de Valvula LV1-6 en 0%	Conforme	Sin Observ.
Estado de Valvula LV2-6 en 0%	Conforme	Sin Observ.

En modo calentamiento, para que el sistema inicie con el encendido, se comprueba que el *yankee* este girando a una velocidad mayor a 100 m/min, la caldera está encendida, la unidad de lubricación está encendida en automático con una presión de línea mayor a 8.0 bar y el aceite a una temperatura mayor a 50°C. Con estas condiciones se habilita el proceso de calentamiento del *yankee*. De perderse estas condiciones, automáticamente el sistema pasa a apagarse y colocarse en modo seguro descrito en el punto 1.

El termocompresor se apertura a 2.5% para que ingrese vapor de calentamiento al *yankee*, incrementa la presión al ingreso del *yankee* desde 0 bar hasta 1.5 bar. Este incremento de la presión se realiza tan lentamente que este proceso dura de 2 a 3 horas. En este modo, las válvulas PV2-4, VV1-5, VV2-5, LV1-6, LV2-6 permanecen cerradas, incluidas la válvula VV2-5, que es normalmente abierta. Una vez que se llega a una presión 1.5 bar en el lazo de control de PIC04 o, en su defecto, una vez que pasen las 3 horas, lo que ocurra antes, se culmina en el proceso de calentamiento pasando al de cortadura.

**Figura 148**

*Protocolo de puesta en marcha: Modo Calentamiento.*

PROTOCOLO DE PRUEBAS DE PUESTA EN MARCHA		
MODO DE OPERACIÓN	CALENTAMIENTO	
DESCRIPCIÓN DE PRUEBA	ESTADO	OBSERV.
Secuencia en off si la velocidad de yankee menor a 100m/min	Si apaga	Sin Observ.
Secuencia en off si la caldera esta apagada	Si apaga	Sin Observ.
Secuencia en off si la unidad de lubricación esta apagada	Si apaga	Sin Observ.
Secuencia en off si la presión de la unid. lub. es menor a 8.0 bar	Si apaga	Sin Observ.
Secuencia en off si la temperatura de la unid. lub. es menor a 50°C	Si apaga	Sin Observ.
Estado de Válvula PV1-4 en 2.5%	Conforme	Sin Observ.
Estado de Válvula PV2-4 en 0%	Conforme	Sin Observ.
Estado de Válvula VV1-5 en 0%	Conforme	Sin Observ.
Estado de Válvula VV2-5 en 0%	Conforme	Sin Observ.
Estado de Válvula LV1-6 en 0%	Conforme	Sin Observ.
Estado de Válvula LV2-6 en 0%	Conforme	Sin Observ.
Fin de secuencia si la presión PIC04 es igual 1.5 bar	Conforme	Sin Observ.
Fin de secuencia si el tiempo del modo calentamiento es de 3 horas	Conforme	Sin Observ.

En modo de cortadura, el sistema inicia a una presión en el PIC04 mayor a 1.5 bar, el *yankee* girando a una velocidad de 100 m/min, el formador y la prensa también girando a una velocidad de 100 m/min, la caldera encendida, la unidad de lubricación encendida en automático con presión mayor a 8.0 bar y el aceite a una temperatura mayor a 50°C, el sistema de clarificación encendido y las bombas de lavado de tela y fieltro encendidas. Con estas condiciones, se habilita el proceso de cortadura del *yankee*.

En este modo, el PIC04, que trabaja en manual a una presión de 1.5 bar y una apertura del termocompresor de 2.5%, pasa a modo automático. Luego de 5 minutos en donde se hacen las validaciones de las condiciones estén dadas para operar, automáticamente se incrementa el punto de operación del PIC04 a 3.5 bar, el termocompresor empieza a modular para llegar a este valor. Con este cambio, la válvula PV2-4 permanece en 0%, el lazo VIC05 trabaja en automático a una velocidad de 30 m/s. Con ello, la válvula VV1-5 empieza a modular para llegar a la velocidad de vapor. Por seguridad, la válvula VV2-5 se apertura a un 10% para la descarga al medio ambiente. El lazo LIC06 dispone a las válvulas LV1-6 y LV2-6 en 0%, la velocidad de *yankee* aumenta de 100 m/min a 500 m/min, incrementándose cada 5 minutos en 100 m/min; es decir, a los 5 minutos la velocidad será 200 m/min, a los 10 minutos la velocidad será 300 m/min, y así

sucesivamente. De igual forma pasa a la velocidad del formador y prensa, cada 5 minutos se incrementa en 100 m/min. Llegado a los 3.5 bar, se contabiliza un tiempo 60 minutos.

**Figura 149**

*Protocolo de puesta en marcha: Modo Cortadura.*

PROTOCOLO DE PRUEBAS DE PUESTA EN MARCHA		
MODO DE OPERACIÓN	CORTADURA	
DESCRIPCIÓN DE PRUEBA	ESTADO	OBSERV.
Secuencia en off si la presión PIC04 es menor a 1.5 bar	Si apaga	Sin Observ.
Secuencia en off si la velocidad de yankee menor a 100m/min	Si apaga	Sin Observ.
Secuencia en off si la velocidad formador-prensa menor a 100m/min	Si apaga	Sin Observ.
Secuencia en off si la caldera esta apagada	Si apaga	Sin Observ.
Secuencia en off si la unidad de lubricación esta apagada	Si apaga	Sin Observ.
Secuencia en off si la presión de la unid. lub. es menor a 8.0 bar	Si apaga	Sin Observ.
Secuencia en off si la temperatura de la unid. lub. es menor a 50°C	Si apaga	Sin Observ.
Secuencia en off si el sistema de clarificación esta apagada	Si apaga	Sin Observ.
Secuencia en off si las bombas de lavado estan apagadas	Si apaga	Sin Observ.
Luego de 5 minutos PIC04 en automatico y seteado a 3.5 bar	Conforme	Sin Observ.
Estado de Válvula PV1-4 en automatico y modulando	Conforme	Sin Observ.
Estado de Válvula PV2-4 en 0%	Conforme	Sin Observ.
Luego de 5 minutos VIC05 en automatico y seteado a 30 m/s	Conforme	Sin Observ.
Estado de Válvula VV1-5 en automatico y modulando	Conforme	Sin Observ.
Estado de Válvula VV2-5 en manual a 10%	Conforme	Sin Observ.
Estado de Válvula LV1-6 en 0%	Conforme	Sin Observ.
Estado de Válvula LV2-6 en 0%	Conforme	Sin Observ.
Cada 5 minutos velocidad de yankee aumenta en 100 m/min	Conforme	Sin Observ.
Cada 5 minutos velocidad formador-prensa aumenta en 100 m/min	Conforme	Sin Observ.
Luego de 20 minutos la velocidad de yankee en 500 m/min	Conforme	Sin Observ.
Luego de 20 minutos la velocidad prensa-formador en 500 m/min	Conforme	Sin Observ.
Una vez que la presión llegue a 3.5 bar se contabilizan 60 minutos	Conforme	Sin Observ.
Fin de secuencia de cortadura luego de los 60 minutos	Conforme	Sin Observ.

En modo de operación, los lazos de control PIC04, VIC05 y LIC06 quedan habilitados para ser configurados de forma libre por el operador, esto según la velocidad de las máquinas papeleras.

La velocidad de la máquina inicia desde 1300 m/min, hasta los 2100 m/min. Una vez se encuentre estable, incrementa su velocidad cada 100 m/min hasta los 1900 m/min; es decir en 1300, 1400, 1500, 1600, 1700, 1800 y 1900 metros por minuto. A partir de esta velocidad, ya que, no se disponen de registros históricos, se hace el incremento cada 50 m/min; es decir 1900, 1950, 2000, 2050 y 2100 metros por minuto. Según registros históricos de la máquina y, por recomendación del fabricante, se recomienda operar el PIC04 entre 6.0 bar hasta 8.5 bar. Según la velocidad de la máquina, la presión crece en relación directa a la rapidez de la máquina; es decir, a más velocidad, el sistema solicita más presión de vapor para amortiguar las variaciones en el secado de papel.

Para el lazo VIC05, el rango de trabajo debe ser fijo en 30 m/s hasta un máximo a 35 m/s; y, para el lazo LIC06, el sistema opera entre 30% a 40%. Los lazos de control PIT01 y DPT007 validan que el sistema se encuentre con las condiciones normales de operación. De haber desviaciones en estos valores, origina que los *centerlines* en los lazos de control PIC04, VIC05 y LIC06 sean alterados con problemas de secado por vapor en el papel. Los valores en estos lazos deben ser PT01 entre 17.0 a 17.5 bar, el valor del TT01 entre 210 a 220 °C, el valor de FT01 entre 4500 kg/h hasta 6000 kg/h, y el valor del DPT007 entre 1.1 a 1.4 bar. Por último, para el método de las sintonías de los lazos de control PID se usa como base los valores anteriores, que se disponen antes de la actualización del *yankee* y, aplicando el método de sintonía *Ziegler-Nichols*, se obtendrán los nuevos valores en los lazos de control. Los detalles se muestran en las figuras 150 hasta la 160.

**Figura 150**

*Protocolo de puesta en marcha: Modo Operación a 1300 m/min.*

PROTOCOLO DE PRUEBAS DE PUESTA EN MARCHA		
MODO DE OPERACIÓN	VELOCIDAD 1300 M/MIN	
DESCRIPCIÓN DE PRUEBA	ESTADO	OBSERV.
Condiciones iniciales P1 en 17.2 bar, T1 en 215°C	Conforme	Sin Observ.
Seteo del lazo PIC04 en 6.5 bar	Conforme	Muy Inestable
Seteo del lazo VIC05 en 30 m/s	Conforme	Lig. Inestable
Seteo del lazo LIC06 en 30%	Conforme	Lig. Inestable
Sintonía de PID lazo PIC04 (K=3.5, Ti=30, Td=0.8)	Conforme	Lig. Estable
Sintonía de PID lazo VIC05 (K=2.0, Ti=40, Td=1.0)	Conforme	Estable
Sintonía de PID lazo LIC06 (K=2.2, Ti=35, Td=1.2)	Conforme	Estable
Condiciones finales DPT007 en 1.1bar y FT01 en 4000 kg/h	Conforme	Sin Observ.

**Figura 151**

*Protocolo de puesta en marcha: Modo Operación a 1400 m/min.*

PROTOCOLO DE PRUEBAS DE PUESTA EN MARCHA		
MODO DE OPERACIÓN	VELOCIDAD 1400 M/MIN	
DESCRIPCIÓN DE PRUEBA	ESTADO	OBSERV.
Condiciones iniciales P1 en 17.3 bar, T1 en 217°C	Conforme	Sin Observ.
Seteo del lazo PIC04 en 6.7 bar	Conforme	Lig. Inestable
Seteo del lazo VIC05 en 30 m/s	Conforme	Estable
Seteo del lazo LIC06 en 30%	Conforme	Estable
Sintonía de PID lazo PIC04 (K=3.5, Ti=35, Td=0.8)	Conforme	Estable
Sintonía de PID lazo VIC05 (K=2.0, Ti=40, Td=1.0)	Conforme	Estable
Sintonía de PID lazo LIC06 (K=2.2, Ti=35, Td=1.2)	Conforme	Estable
Condiciones finales DPT007 en 1.1bar y FT01 en 4200 kg/h	Conforme	Sin Observ.

**Figura 152**

*Protocolo de puesta en marcha: Modo Operación a 1500 m/min.*

PROTOCOLO DE PRUEBAS DE PUESTA EN MARCHA		
MODO DE OPERACIÓN	VELOCIDAD 1500 M/MIN	
DESCRIPCIÓN DE PRUEBA	ESTADO	OBSERV.
Condiciones iniciales P1 en 17.2 bar, T1 en 220°C	Conforme	Sin Observ.
Seteo del lazo PIC04 en 6.9 bar	Conforme	Lig. Inestable
Seteo del lazo VIC05 en 30 m/s	Conforme	Estable
Seteo del lazo LIC06 en 30%	Conforme	Estable
Sintonía de PID lazo PIC04 (K=3.5, Ti=40, Td=0.8)	Conforme	Estable
Sintonía de PID lazo VIC05 (K=2.0, Ti=40, Td=1.0)	Conforme	Estable
Sintonía de PID lazo LIC06 (K=2.2, Ti=35, Td=1.2)	Conforme	Estable
Condiciones finales DPT007 en 1.1bar y FT01 en 4400 kg/h	Conforme	Sin Observ.

**Figura 153**

*Protocolo de puesta en marcha: Modo Operación a 1600 m/min.*

PROTOCOLO DE PRUEBAS DE PUESTA EN MARCHA		
MODO DE OPERACIÓN	VELOCIDAD 1600 M/MIN	
DESCRIPCIÓN DE PRUEBA	ESTADO	OBSERV.
Condiciones iniciales P1 en 17.2 bar, T1 en 220°C	Conforme	Sin Observ.
Seteo del lazo PIC04 en 7.1 bar	Conforme	Lig. Inestable
Seteo del lazo VIC05 en 32 m/s	Conforme	Lig. Inestable
Seteo del lazo LIC06 en 30%	Conforme	Estable
Sintonía de PID lazo PIC04 (K=3.5, Ti=40, Td=0.9)	Conforme	Estable
Sintonía de PID lazo VIC05 (K=2.2, Ti=40, Td=1.0)	Conforme	Estable
Sintonía de PID lazo LIC06 (K=2.2, Ti=35, Td=1.2)	Conforme	Estable
Condiciones finales DPT007 en 1.1bar y FT01 en 4600 kg/h	Conforme	Sin Observ.

**Figura 154**

*Protocolo de puesta en marcha: Modo Operación a 1700 m/min.*

PROTOCOLO DE PRUEBAS DE PUESTA EN MARCHA		
MODO DE OPERACIÓN	VELOCIDAD 1700 M/MIN	
DESCRIPCIÓN DE PRUEBA	ESTADO	OBSERV.
Condiciones iniciales P1 en 17.1 bar, T1 en 218°C	Conforme	Sin Observ.
Seteo del lazo PIC04 en 7.3 bar	Conforme	Lig. Inestable
Seteo del lazo VIC05 en 32 m/s	Conforme	Estable
Seteo del lazo LIC06 en 32%	Conforme	Lig. Inestable
Sintonía de PID lazo PIC04 (K=3.5, Ti=40, Td=1.0)	Conforme	Estable
Sintonía de PID lazo VIC05 (K=2.2, Ti=40, Td=1.0)	Conforme	Estable
Sintonía de PID lazo LIC06 (K=2.2, Ti=40, Td=1.2)	Conforme	Estable
Condiciones finales DPT007 en 1.2bar y FT01 en 4800 kg/h	Conforme	Sin Observ.

**Figura 155**

*Protocolo de puesta en marcha: Modo Operación a 1800 m/min.*

PROTOCOLO DE PRUEBAS DE PUESTA EN MARCHA		
MODO DE OPERACIÓN	VELOCIDAD 1800 M/MIN	
DESCRIPCIÓN DE PRUEBA	ESTADO	OBSERV.
Condiciones iniciales P1 en 17.2 bar, T1 en 222°C	Conforme	Sin Observ.
Seteo del lazo PIC04 en 7.6 bar	Conforme	Inestable
Seteo del lazo VIC05 en 35 m/s	Conforme	Inestable
Seteo del lazo LIC06 en 32%	Conforme	Estable
Sintonía de PID lazo PIC04 (K=3.2, Ti=40, Td=0.8)	Conforme	Estable
Sintonía de PID lazo VIC05 (K=2.0, Ti=38, Td=1.0)	Conforme	Estable
Sintonía de PID lazo LIC06 (K=2.2, Ti=40, Td=1.2)	Conforme	Estable
Condiciones finales DPT007 en 1.2bar y FT01 en 5100 kg/h	Conforme	Sin Observ.

**Figura 156**

*Protocolo de puesta en marcha: Modo Operación a 1900 m/min.*

PROTOCOLO DE PRUEBAS DE PUESTA EN MARCHA		
MODO DE OPERACIÓN	VELOCIDAD 1900 M/MIN	
DESCRIPCIÓN DE PRUEBA	ESTADO	OBSERV.
Condiciones iniciales P1 en 17.1 bar, T1 en 220°C	Conforme	Sin Observ.
Seteo del lazo PIC04 en 7.9 bar	Conforme	Inestable
Seteo del lazo VIC05 en 35 m/s	Conforme	Estable
Seteo del lazo LIC06 en 35%	Conforme	Lig. Inestable
Sintonía de PID lazo PIC04 (K=3.2, Ti=42, Td=0.8)	Conforme	Estable
Sintonía de PID lazo VIC05 (K=2.0, Ti=38, Td=1.0)	Conforme	Estable
Sintonía de PID lazo LIC06 (K=2.2, Ti=35, Td=1.2)	Conforme	Estable
Condiciones finales DPT007 en 1.2bar y FT01 en 5400 kg/h	Conforme	Sin Observ.

**Figura 157**

*Protocolo de puesta en marcha: Modo Operación a 1950 m/min.*

PROTOCOLO DE PRUEBAS DE PUESTA EN MARCHA		
MODO DE OPERACIÓN	VELOCIDAD 1950 M/MIN	
DESCRIPCIÓN DE PRUEBA	ESTADO	OBSERV.
Condiciones iniciales P1 en 17.0 bar, T1 en 215°C	Conforme	Sin Observ.
Seteo del lazo PIC04 en 8.1 bar	Conforme	Lig. Inestable
Seteo del lazo VIC05 en 35 m/s	Conforme	Estable
Seteo del lazo LIC06 en 35%	Conforme	Estable
Sintonía de PID lazo PIC04 (K=3.1, Ti=42, Td=0.8)	Conforme	Estable
Sintonía de PID lazo VIC05 (K=2.0, Ti=38, Td=1.0)	Conforme	Estable
Sintonía de PID lazo LIC06 (K=2.2, Ti=35, Td=1.2)	Conforme	Estable
Condiciones finales DPT007 en 1.2bar y FT01 en 5600 kg/h	Conforme	Sin Observ.

**Figura 158**

*Protocolo de puesta en marcha: Modo Operación a 2000 m/min.*

PROTOCOLO DE PRUEBAS DE PUESTA EN MARCHA		
MODO DE OPERACIÓN	VELOCIDAD 2000 M/MIN	
DESCRIPCIÓN DE PRUEBA	ESTADO	OBSERV.
Condiciones iniciales P1 en 17.0 bar, T1 en 212°C	Conforme	Sin Observ.
Seteo del lazo PIC04 en 8.2 bar	Conforme	Lig. Inestable
Seteo del lazo VIC05 en 35 m/s	Conforme	Estable
Seteo del lazo LIC06 en 35%	Conforme	Estable
Sintonía de PID lazo PIC04 (K=3.0, Ti=42, Td=0.8)	Conforme	Estable
Sintonía de PID lazo VIC05 (K=2.0, Ti=38, Td=1.0)	Conforme	Estable
Sintonía de PID lazo LIC06 (K=2.2, Ti=35, Td=1.2)	Conforme	Estable
Condiciones finales DPT007 en 1.1bar y FT01 en 5800 kg/h	Conforme	Sin Observ.

**Figura 159**

*Protocolo de puesta en marcha: Modo Operación a 2050 m/min.*

PROTOCOLO DE PRUEBAS DE PUESTA EN MARCHA		
MODO DE OPERACIÓN	VELOCIDAD 2050 M/MIN	
DESCRIPCIÓN DE PRUEBA	ESTADO	OBSERV.
Condiciones iniciales P1 en 17.1 bar, T1 en 214°C	Conforme	Sin Observ.
Seteo del lazo PIC04 en 8.3 bar	Conforme	Estable
Seteo del lazo VIC05 en 38 m/s	Conforme	Lig. Inestable
Seteo del lazo LIC06 en 35%	Conforme	Estable
Sintonía de PID lazo PIC04 (K=3.0, Ti=42, Td=0.8)	Conforme	Estable
Sintonía de PID lazo VIC05 (K=2.0, Ti=36, Td=1.0)	Conforme	Estable
Sintonía de PID lazo LIC06 (K=2.2, Ti=35, Td=1.2)	Conforme	Estable
Condiciones finales DPT007 en 1.1bar y FT01 en 6000 kg/h	Conforme	Sin Observ.

**Figura 160**

*Protocolo de puesta en marcha: Modo Operación a 2100 m/min.*

PROTOCOLO DE PRUEBAS DE PUESTA EN MARCHA		
MODO DE OPERACIÓN	VELOCIDAD 2100 M/MIN	
DESCRIPCIÓN DE PRUEBA	ESTADO	OBSERV.
Condiciones iniciales P1 en 17.2 bar, T1 en 218°C	Conforme	Sin Observ.
Seteo del lazo PIC04 en 8.5 bar	Conforme	Estable
Seteo del lazo VIC05 en 40 m/s	Conforme	Estable
Seteo del lazo LIC06 en 35%	Conforme	Estable
Sintonía de PID lazo PIC04 (K=3.0, Ti=42, Td=0.8)	Conforme	Estable
Sintonía de PID lazo VIC05 (K=2.0, Ti=36, Td=1.0)	Conforme	Estable
Sintonía de PID lazo LIC06 (K=2.2, Ti=35, Td=1.2)	Conforme	Estable
Condiciones finales DPT007 en 1.1bar y FT01 en 6250 kg/h	Conforme	Sin Observ.

Con estas pruebas de comisionamiento, se dejan estables los lazos de control PIC04, VIC05, LIC06 del sistema de secado de vapor a velocidades de la máquina papelera desde 1300 m/min hasta los 2100 m/min. Asimismo, no se evidencias fugas ni fallas

relacionadas a mal montaje en el sistema de instrumentación. Con ello, se da por concluida la puesta en marcha de forma satisfactoria sin mayores observaciones.

### 3.5 Validación de la solución propuesta y toma de datos

Luego del arranque del nuevo automatismo para el secado de papel con vapor saturado en la máquina, se calculan las pérdidas relacionadas a la variación de humedad en el perfil de hoja para velocidades menores a 1900 m/min.

Se hace el cálculo de las pérdidas asociadas al secado por vapor para velocidades mayores a 1900 m/min, incrementándose de 50 m/min hasta llegar a los 2100 m/min. Se logró estabilidad en la sintonía de los lazos a estas velocidades. Asimismo, a mayores velocidades, las perdidas por velocidad disminuyen hasta valores cercanos a cero. Los detalles se muestran en las siguientes figuras desde la figura 161 hasta la figura 169.

**Figura 161**

*Pérdidas de eficiencia después del proyecto, a velocidad de 1300 m/min.*

Hora	Perfil de Humedad	Temperatura Jumbo (°C)	Temperatura Yankee (°C)
07:00	4.9%	40.1	89.2
08:00	5.0%	40.2	89.4
09:00	5.0%	40.3	89.4
10:00	4.9%	40.3	89.4
11:00	5.0%	40.2	89.3
12:00	4.9%	40.1	89.2
13:00	5.0%	40.1	89.3
14:00	5.0%	40.1	89.4
15:00	4.9%	40.2	89.2
16:00	4.9%	40.1	89.4
17:00	5.0%	40.2	89.3
18:00	4.9%	40.1	89.4
19:00	4.9%	40.2	89.3
20:00	4.9%	40.2	89.3
21:00	4.9%	40.2	89.4
22:00	5.0%	40.2	89.2
23:00	4.9%	40.1	89.2
00:00	4.9%	40.1	89.3
01:00	5.0%	40.1	89.2
02:00	4.9%	40.1	89.2
03:00	5.0%	40.2	89.4
04:00	5.0%	40.2	89.3
05:00	5.0%	40.2	89.4
06:00	4.9%	40.1	89.2
Fecha		21/07/2022	
Velocidad		1300 m/min	
Perdidas por velocidad		14.69%	
Perdidas por secado		0.09%	

**Figura 162**

Pérdidas de eficiencia después del proyecto, a velocidad de 1500 m/min.

Hora	Perfil de Humedad	Temperatura Jumbo (°C)	Temperatura Yankee (°C)
07:00	5.1%	40.5	91.5
08:00	5.2%	40.5	91.4
09:00	5.1%	40.6	91.5
10:00	5.1%	40.5	91.6
11:00	5.2%	40.4	91.4
12:00	5.2%	40.5	91.5
13:00	5.2%	40.6	91.4
14:00	5.1%	40.5	91.5
15:00	5.1%	40.5	91.4
16:00	5.1%	40.6	91.3
17:00	5.2%	40.5	91.5
18:00	5.1%	40.5	91.5
19:00	5.2%	40.5	91.4
20:00	5.1%	40.6	91.5
21:00	5.1%	40.6	91.4
22:00	5.1%	40.5	91.3
23:00	5.1%	40.4	91.4
00:00	5.2%	40.4	91.4
01:00	5.2%	40.4	91.5
02:00	5.2%	40.4	91.4
03:00	5.1%	40.5	91.5
04:00	5.2%	40.4	91.5
05:00	5.2%	40.5	91.5
06:00	5.2%	40.5	91.3
Fecha		26/07/2022	
Velocidad		1500 m/min	
Perdidas por velocidad		12.04%	
Perdidas por secado		0.17%	

**Figura 163**

Pérdidas de eficiencia después del proyecto, a velocidad de 1700 m/min.

Hora	Perfil de Humedad	Temperatura Jumbo (°C)	Temperatura Yankee (°C)
07:00	5.4%	41.4	92.5
08:00	5.4%	41.4	92.5
09:00	5.5%	41.5	92.4
10:00	5.4%	41.6	92.4
11:00	5.5%	41.6	92.5
12:00	5.4%	41.5	92.5
13:00	5.4%	41.5	92.4
14:00	5.5%	41.4	92.4
15:00	5.5%	41.5	92.5
16:00	5.5%	41.5	92.4
17:00	5.4%	41.6	92.5
18:00	5.4%	41.5	92.5
19:00	5.4%	41.5	92.6
20:00	5.4%	41.4	92.5
21:00	5.5%	41.4	92.5
22:00	5.5%	41.5	92.6
23:00	5.5%	41.5	92.5
00:00	5.4%	41.5	92.5
01:00	5.5%	41.4	92.4
02:00	5.4%	41.4	92.5
03:00	5.4%	41.5	92.4
04:00	5.5%	41.6	92.5
05:00	5.4%	41.6	92.4
06:00	5.5%	41.5	92.5
Fecha		28/07/2022	
Velocidad		1700 m/min	
Perdidas por velocidad		10.01%	
Perdidas por secado		0.22%	

**Figura 164**

Pérdidas de eficiencia después del proyecto, a velocidad de 1800 m/min.

Hora	Perfil de Humedad	Temperatura Jumbo (°C)	Temperatura Yankee (°C)
07:00	5.8%	42.8	93.8
08:00	5.7%	42.9	93.9
09:00	5.7%	42.9	93.7
10:00	5.7%	42.8	93.8
11:00	5.7%	42.8	93.9
12:00	5.8%	42.7	93.9
13:00	5.8%	42.7	93.8
14:00	5.7%	42.8	93.7
15:00	5.7%	42.9	93.8
16:00	5.7%	42.9	93.8
17:00	5.7%	42.8	93.9
18:00	5.8%	42.8	93.9
19:00	5.7%	42.7	93.8
20:00	5.8%	42.8	93.7
21:00	5.7%	42.7	93.7
22:00	5.8%	42.8	93.8
23:00	5.8%	42.9	93.8
00:00	5.8%	42.9	93.9
01:00	5.8%	42.8	93.8
02:00	5.7%	42.8	93.9
03:00	5.7%	42.9	93.8
04:00	5.7%	42.8	93.7
05:00	5.8%	42.8	93.7
06:00	5.7%	42.7	93.8
Fecha		30/07/2022	
Velocidad		1800 m/min	
Perdidas por velocidad		8.38%	
Perdidas por secado		0.27%	

**Figura 165**

Pérdidas de eficiencia después del proyecto, a velocidad de 1900 m/min.

Hora	Perfil de Humedad	Temperatura Jumbo (°C)	Temperatura Yankee (°C)
07:00	5.9%	43.5	95.3
08:00	6.0%	43.6	95.3
09:00	6.0%	43.6	95.4
10:00	6.0%	43.5	95.4
11:00	5.9%	43.5	95.4
12:00	6.0%	43.4	95.4
13:00	5.9%	43.4	95.5
14:00	6.0%	43.5	95.5
15:00	6.0%	43.5	95.4
16:00	6.0%	43.5	95.4
17:00	5.9%	43.6	95.3
18:00	6.0%	43.6	95.4
19:00	6.0%	43.6	95.4
20:00	5.9%	43.5	95.5
21:00	5.9%	43.4	95.5
22:00	5.9%	43.4	95.4
23:00	6.0%	43.5	95.4
00:00	6.0%	43.5	95.5
01:00	5.9%	43.6	95.5
02:00	6.0%	43.5	95.5
03:00	5.9%	43.6	95.4
04:00	6.0%	43.5	95.5
05:00	6.0%	43.5	95.4
06:00	5.9%	43.4	95.4
Fecha		31/07/2022	
Velocidad		1900 m/min	
Perdidas por velocidad		4.45%	
Perdidas por secado		0.29%	

**Figura 166**

Pérdidas de eficiencia después del proyecto, a velocidad de 1950 m/min.

Hora	Perfil de Humedad	Temperatura Jumbo (°C)	Temperatura Yankee (°C)
07:00	6.1%	45.6	97.4
08:00	6.2%	45.7	97.3
09:00	6.2%	45.7	97.4
10:00	6.1%	45.8	97.5
11:00	6.2%	45.8	97.6
12:00	6.1%	45.7	97.5
13:00	6.1%	45.7	97.6
14:00	6.2%	45.7	97.7
15:00	6.1%	45.6	97.6
16:00	6.2%	45.5	97.5
17:00	6.2%	45.6	97.4
18:00	6.1%	45.6	97.3
19:00	6.1%	45.7	97.3
20:00	6.2%	45.7	97.4
21:00	6.2%	45.8	97.5
22:00	6.0%	45.8	97.5
23:00	6.1%	45.8	97.4
00:00	6.2%	45.8	97.5
01:00	6.1%	45.7	97.6
02:00	6.0%	45.7	97.7
03:00	6.0%	45.6	97.6
04:00	6.1%	45.6	97.5
05:00	6.2%	45.7	97.6
06:00	6.1%	45.8	97.5
Fecha		1/08/2022	
Velocidad		1950 m/min	
Perdidas por velocidad		3.54%	
Perdidas por secado		0.33%	

**Figura 167**

Pérdidas de eficiencia después del proyecto, a velocidad de 2000 m/min.

Hora	Perfil de Humedad	Temperatura Jumbo (°C)	Temperatura Yankee (°C)
07:00	6.3%	46.6	98.5
08:00	6.3%	46.7	98.6
09:00	6.2%	46.8	98.5
10:00	6.3%	46.8	98.4
11:00	6.2%	46.7	98.5
12:00	6.1%	46.6	98.6
13:00	6.2%	46.6	98.6
14:00	6.3%	46.5	98.7
15:00	6.3%	46.5	98.6
16:00	6.3%	46.6	98.6
17:00	6.2%	46.7	98.5
18:00	6.1%	46.7	98.5
19:00	6.2%	46.8	98.4
20:00	6.2%	46.7	98.4
21:00	6.2%	46.7	98.5
22:00	6.1%	46.7	98.5
23:00	6.1%	46.6	98.6
00:00	6.2%	46.6	98.5
01:00	6.2%	46.5	98.6
02:00	6.3%	46.5	98.5
03:00	6.2%	46.7	98.6
04:00	6.1%	46.7	98.5
05:00	6.2%	46.7	98.6
06:00	6.3%	46.6	98.5
Fecha		3/08/2021	
Velocidad		2000 m/min	
Perdidas por velocidad		2.23%	
Perdidas por secado		0.38%	

**Figura 168**

Pérdidas de eficiencia después del proyecto, a velocidad de 2050 m/min.

Hora	Perfil de Humedad	Temperatura Jumbo (°C)	Temperatura Yankee (°C)
07:00	6.3%	47.5	99.5
08:00	6.3%	47.3	99.7
09:00	6.4%	47.2	99.5
10:00	6.4%	47.4	99.3
11:00	6.3%	47.5	99.4
12:00	6.3%	47.6	99.6
13:00	6.3%	47.7	99.5
14:00	6.2%	47.6	99.5
15:00	6.2%	47.5	99.7
16:00	6.3%	47.3	99.6
17:00	6.3%	47.1	99.8
18:00	6.4%	47.2	99.7
19:00	6.4%	47.4	99.6
20:00	6.3%	47.5	99.4
21:00	6.3%	47.6	99.5
22:00	6.2%	47.7	99.5
23:00	6.2%	47.6	99.4
00:00	6.3%	47.6	99.6
01:00	6.3%	47.5	99.8
02:00	6.2%	47.4	99.6
03:00	6.4%	47.3	99.4
04:00	6.3%	47.3	99.6
05:00	6.2%	47.2	99.7
06:00	6.3%	47.4	99.5
Fecha		4/08/2021	
Velocidad		2050 m/min	
Perdidas por velocidad		1.40%	
Perdidas por secado		0.43%	

**Figura 169**

Pérdidas de eficiencia después del proyecto, a velocidad de 2100m/min.

Hora	Perfil de Humedad	Temperatura Jumbo (°C)	Temperatura Yankee (°C)
07:00	6.4%	48.6	99.5
08:00	6.5%	48.5	99.7
09:00	6.4%	48.8	99.5
10:00	6.4%	48.7	99.3
11:00	6.3%	48.6	99.4
12:00	6.4%	48.7	99.6
13:00	6.4%	48.8	99.5
14:00	6.5%	48.6	99.5
15:00	6.4%	48.6	99.7
16:00	6.3%	48.5	99.6
17:00	6.4%	48.6	99.8
18:00	6.5%	48.7	99.7
19:00	6.5%	48.6	99.6
20:00	6.4%	48.5	99.4
21:00	6.3%	48.7	99.5
22:00	6.4%	48.6	99.5
23:00	6.4%	48.7	99.4
00:00	6.5%	48.7	99.6
01:00	6.4%	48.8	99.8
02:00	6.5%	48.7	99.6
03:00	6.4%	48.6	99.4
04:00	6.3%	48.5	99.6
05:00	6.4%	48.5	99.7
06:00	6.5%	48.6	99.5
Fecha		5/08/2021	
Velocidad		2100 m/min	
Perdidas por velocidad		0.24%	
Perdidas por secado		0.47%	

Con estos resultados, se concluye que el sistema de secado por vapor en una máquina papelera se ha estabilizado a velocidades mayores a 1900 m/min, llegando hasta los 2100 m/min, con pérdidas menores a 0.5%. Luego de ejecutado el proyecto, estas pérdidas en un inicio superaban el 5.0%. Las pérdidas de velocidad se han reducido hasta un 0.47%, debido a que, en eventos muy puntuales, el operador reduce la velocidad de la máquina a 1980 m/min por roturas de hoja, que están relacionados a otro tipo de fallas.

## **Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados**

### **4.1 Cumplimiento del primer objetivo específico**

El primer objetivo específico es “Dimensionar el sistema de control automático para el secado de papel mediante vapor saturado con velocidades según el programa establecido en la máquina papelera”, cuyo indicador de logro es “Diseño de la arquitectura del sistema de control automático para la máquina papelera”.

Para el cumplimiento del primer indicador de logro se realizó el análisis del problema y toma de datos (subcapítulo 3.1), dimensionamiento de la solución propuesta, especificaciones técnicas de los equipos actuales (subcapítulo 3.2.1), cálculo para la realización de la simulación de la solución propuesta (subcapítulo 3.2.2), especificaciones técnicas del fabricante de la máquina papelera (subcapítulo 3.2.3), elaboración de especificaciones técnicas y selección del sistema de instrumentación y del sistema de control (subcapítulo 3.3).

En función a lo descrito, se cumplió satisfactoriamente con el 100% del primer objetivo específico planteado.

### **4.2 Cumplimiento del segundo objetivo específico**

El segundo objetivo específico es “Implementar el sistema automático basado en DCS, para el secado de papel mediante vapor saturado con velocidades según el programa establecido en la máquina papelera”, cuyo indicador de logro es “Implementación del 100% del sistema de control automático para la máquina papelera”.

Para el cumplimiento del segundo indicador de logro se realizó la instalación y montaje de equipos del sistema DCS PCS7, transmisores y válvulas para el lazo de control PIC04, VIC05 y LIC06 (subcapítulo 3.4.1). Luego se realizó el precomisionamiento de los equipos instalados (subcapítulo 3.4.2) y, finalmente, el comisionamiento y la puesta en marcha de toda la solución propuesta (subcapítulo 3.4.3).

En función a lo descrito, se concluye que se ha realizado satisfactoriamente el 100% del segundo objetivo específico planteado.

#### **4.3 Cumplimiento del tercer objetivo específico**

El tercer objetivo específico es “Evaluar el funcionamiento del secado de papel, después de su implementación a velocidades según el programa establecido en la máquina papelera”, cuyo indicador de logro es “Reducir a menos de 1% las pérdidas de eficiencia por secado con vapor en la máquina papelera”.

Para el cumplimiento del tercer indicador de logro, se realizó la toma de muestras en el perfil de hoja para determinar el porcentaje de humedad y, con ello, realizar el cálculo de las pérdidas de eficiencia asociadas al secado con vapor en la máquina papelera (subcapítulo 3.5), a velocidades en la máquina papelera mayores a 1950 m/min, obteniendo un porcentaje de pérdidas relacionado al secado de 0.47%, el cual es menor al 1% especificado en el tercer indicador de logro.

En función a lo descrito, se cumplió satisfactoriamente la meta propuesta para el tercer objetivo específico planteado.

## Conclusiones

1. Para el mejor rendimiento del sistema de secado por vapor, se obtuvieron variaciones para el control de presión al ingreso del yankee menores a +/- 0.05 bar, a una temperatura de operación que varía desde los 200 hasta los 220 °C.
2. Para menor variación de humedad en la hoja, en el cilindro secador yankee se obtuvieron valores de diferencial de presión de vapor que varían desde 1.1 hasta 1.2 bar, siendo el valor promedio de 1.14 bar.
3. Para optimizar el vapor recuperado usado en el secado, se obtuvieron valores de velocidad que varían desde los 30 hasta los 40 m/s, a una temperatura promedio de operación de 162°C.
4. Para optimizar el condensado reutilizado en las calderas, se obtuvo que el nivel promedio es de 1.2 metros sometido a una presión que varía desde los 4.8 hasta los 5.2 bar.
5. La menor pérdida de eficiencia en la máquina asociadas al secado mediante vapor es de 0.47%, se obtiene a la velocidad de máquina de 2030 m/min con presión de ingreso de 8.4 bar y presión de trabajo de 213°C.
6. La mayor pérdida de eficiencia en la máquina asociadas al secado mediante vapor es de 0.74%, se obtiene a la velocidad de máquina de 2100 m/min, con presión de ingreso de 8.8 bar y presión de trabajo de 206°C.

## **Recomendaciones**

- Las pérdidas asociadas al secado de vapor en la máquina papelera se redujeron hasta valores por debajo del 0.5%, se recomienda continuar con la sintonía de los lazos PID con el pasar de los días para que el sistema termine de estabilizarse.
- Hacer mantenimiento general al sistema de secado por aire caliente, ya que este secado proporciona el 40% del total del secado al papel en la máquina, enfocándose, principalmente, en el quemador de combustión y su sistema de control.
- Otra máquina papelera presenta problemas de secado por vapor, ya que el *yankee*, con el pasar de los años, ha perdido capacidad de secado. Se recomienda hacer la actualización del sistema de secado por vapor similar al que se ha realizado en la proyecto.

## Referencias bibliográficas

- Brunete, A., San Segundo, P., y Herrero, R. (2020). Introducción a la Automatización Industrial.
- Carrión, J., Orellana, D., Carrión, M., Vega, A., Cuenca, J. y Carvajal, R. (2019). Fiabilidad de Redes Eléctricas.
- Creus, A. (2009). Instrumentos Industriales su Ajuste y Calibración.
- Creus, A. (2011). Automatización Industrial.
- De Silva, C. (2016). Sensors and Actuators - Engineering System Instrumentation.
- Dong-Seong, K. y Tran-Dang, H. (2019). Industrial Sensors and Control in Communication Networks - From Wired Technologies to Cloud Computing and the Internet of Things.
- Frost, H. (2018). High Pressure Boilers Study Guide.
- Hernández, I. y Hernández, J. (2010). Control Automático de flujos químicos para el acondicionamiento del secador Yankee. Trabajo de titulación profesional.
- Jara, S. (2018). Implementación de Planta de destintado para reducir los costos de producción para la fabricación de Papel Tissue. Trabajo de titulación profesional.
- Kuo, B. y Golnaraghi, F. (2017). Automatic Control Systems.
- Kuphaldt, T. (2017). Lessons In Industrial Instrumentation.
- Lamb, F. (2013). Industrial Automation - Hands On.
- Liptak, B. (2006). Instrument Engineers' Handbook – Process Measurement and Analysis / Volumen 1.
- Manesis, S. y Nikolakopoulos, G. (2018). Introduction to Industrial Automation.
- Ministerio de Trabajo del Perú (2013). Controles en Calderas. Artículo.
- Ministerio de la Producción del Perú (2016). Rehabilitación y mejoramiento de la Máquina Papelera 02. Artículo.
- Munguía, J. y Meliton, E. (2010). Control de la relación Chorro – Tela en una máquina para la fabricación de papel. Trabajo de titulación profesional.

Oppenheimer, A. (2018). Sálvese quien pueda. El futuro del trabajo en la era de la automatización.

Parker, P. (2020). The 2021 – 2026 world Outlook for Tissue Paper and Other Machine – Creped Paper.

Rodríguez, R. (2014). Reducción del consumo de vapor en una máquina papelera utilizando el control por presión diferencial a través de un control remoto. Trabajo de titulación profesional.

Rojano, S. (2014). Instrumentación y Control en Instalaciones de Proceso, Energía y Servicios Auxiliares.

Suárez, F. (2015). Determinación del ahorro energético a partir de la recuperación del vapor condensado en una fábrica de Papel Tissue. Trabajo de titulación profesional.

Valiente, C. (2013). Modelamiento del proceso de Secado de Papel Tissue. Trabajo de titulación profesional.

Wohlfarth, R. y Kohan, A. (2021). Boiler Operator's Guide.