



**Automatización de la operación de la compuerta plana del desarenador de la represa de la Central**

**Hidroeléctrica Agoyán**

Calderón Estrella, Christian Daniel

Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de ingeniería en Electrónica, Automatización y Control

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero en Electrónica, Automatización y Control

Ing. Ortiz Tulcán, Hugo Ramiro. Mgs

24 de agosto de 2020

## URKUND

### Document Information

Analyzed document	Automatización de la Operación de la Compuerta Plana del Desarenador de la Represa de la Central Hidroeléctrica Agoyán.docx (D77294910)
Submitted	7/29/2020 7:41:00 PM
Submitted by	Ortiz Tulcán Hugo Ramiro
Submitter email	hrtortiz@espe.edu.ec
Similarity	3%
Analysis address	hrtortiz.espe@analysis.orkund.com

### Sources included in the report

<b>SA</b>	Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE / TESIS_VITERI v 13.pdf Document TESIS_VITERI v 13.pdf (D21240770) Submitted by: efitipan@espe.edu.ec Receiver: efitipan.espe@analysis.orkund.com		1
<b>SA</b>	Tesis_cap4.docx Document Tesis_cap4.docx (D62422015)		2
<b>W</b>	URL: <a href="https://core.ac.uk/download/pdf/60987627.pdf">https://core.ac.uk/download/pdf/60987627.pdf</a> Fetched: 7/26/2020 11:12:47 PM		1
<b>W</b>	URL: <a href="https://docplayer.es/95436840-Escuela-politecnica-nacional.html">https://docplayer.es/95436840-Escuela-politecnica-nacional.html</a> Fetched: 6/2/2020 6:32:30 AM		10
<b>W</b>	URL: <a href="https://docplayer.es/14725649-Escuela-politecnica-del-ejercito.html">https://docplayer.es/14725649-Escuela-politecnica-del-ejercito.html</a> Fetched: 7/29/2020 7:43:00 PM		1
<b>SA</b>	9847--canales_sj.pdf Document 9847--canales_sj.pdf (D36149557)		1
<b>SA</b>	TESIS ESCRITA MARIO VILLACRES [605].pdf Document TESIS ESCRITA MARIO VILLACRES [605].pdf (D24286500)		6
<b>SA</b>	Cardenas Freddy y Catagña Rafael1.docx Document Cardenas Freddy y Catagña Rafael1.docx (D17407492)		1
<b>SA</b>	Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE / SISTEMA DE ENTRENAMIENTO EN REDES INDUSTRIALES.docx Document SISTEMA DE ENTRENAMIENTO EN REDES INDUSTRIALES.docx (D21285571) Submitted by: hrtortiz@espe.edu.ec Receiver: hrtortiz.espe@analysis.orkund.com		1

Firma:



.....  
**Ortiz Tulcán Hugo Ramiro**  
**DIRECTOR**



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA,  
AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL

### CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “**Automatización de la operación de la compuerta plana del desarenador de la represa de la central hidroeléctrica Agoyán**” fue realizado por el señor **Calderón Estrella, Christian Daniel** el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 24 de agosto de 2020



---

Ortiz Tulcán, Hugo Ramiro  
CC: 1707721591



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA,  
AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL**

**RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA**

Yo, **Calderón Estrella, Christian Daniel** con cédula de identidad número 1803641040, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“Automatización de la operación de la compuerta plana del desarenador de la represa de la central hidroeléctrica Agoyán”** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Baños de Agua Santa, 24 de agosto de 2020

---

Calderón Estrella, Christian Daniel

CC: 1803641040



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA,  
AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL**

**AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN**

Yo, **Calderón Estrella, Christian Daniel** con cédula de identidad número 1803641040, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **“Automatización de la operación de la compuerta plana del desarenador de la represa de la central hidroeléctrica Agoyán”** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son mí de responsabilidad.

Baños de Agua Santa, 24 de agosto de 2020



---

Calderón Estrella, Christian Daniel

CC: 1803641040

## Dedicatoria

*A mi padre Byron y mi madre Soraya  
por permitirme materializar mis metas,  
este es su logro.*

*A mis hermanos, abuelitos y tíos.*

*Finalmente, a las personas que  
con su ejemplo y accionar han guiado mi vida.*

*Christian Daniel Calderón Estrella*

## **Agradecimiento**

A CELEC E.P. Unidad de Negocio Hidroagoyán por bríndame la oportunidad de plasmar parte de mis conocimientos en el desarrollo de este proyecto, por las facilidades brindadas y el incalculable apoyo del personal de mantenimiento eléctrico/electrónico.

Al Ingeniero Marcelo Gavilanez por brindarme su apoyo y facilidades durante el desarrollo de este proyecto.

Al Ingeniero Omar Tenorio por su invaluable guía a lo largo del desarrollo del proyecto, muchas gracias.

Y a todo el personal de Hidroagoyán que de alguna manera contribuyó a la ejecución de este proyecto, mis infinitos agradecimientos.

*Christian Daniel Calderón Estrella*

## Índice de contenidos

Automatización de la operación de la compuerta plana del desarenador de la represa de la Central Hidroeléctrica Agoyán .....	1
Hoja de resultados de la herramienta Urkund .....	2
Certificación .....	2
Responsabilidad de autoría .....	4
Autorización de publicación .....	5
Dedicatoria .....	6
Agradecimiento .....	7
Índice de contenidos .....	8
Índice de tablas .....	11
Índice de figuras .....	14
Resumen .....	18
Abstract .....	19
Glosario .....	20
Capítulo I .....	21
Descripción del proyecto de investigación .....	21
Antecedentes .....	21
Componentes del desarenador de la represa de la central hidroeléctrica Agoyán .....	23
Justificación e importancia .....	26
Alcance del proyecto .....	30
Objetivos .....	31
Capítulo II .....	33
Estudio del sistema original de control de la compuerta plana .....	33
Descripción del sistema electromecánico de la compuerta plana del desarenador .....	33



Análisis de la filosofía de control de la operación de la compuerta plana del desarenador original...	50
Diagnóstico del sistema de control de la compuerta plana del desarenador .....	54
Propuesta de modernización .....	55
Capítulo III .....	60
Diseño de la automatización de la operación de la compuerta plana del desarenador de la represa de la central hidroeléctrica Agoyán .....	60
Diagrama de bloques del proceso .....	60
Descripción de los elementos .....	63
Dimensionamiento de las protecciones y seccionadores .....	93
Diseño del sistema de instrumentación .....	95
Diseño del sistema de comunicación .....	98
Configuración del convertidor de baja tensión .....	122
Diseño del sistema de control .....	124
Diseño de la Interfaz Humano Máquina .....	134
Capítulo IV .....	145
Implementación y montaje .....	145
Implementación del tablero de control principal .....	145
Montaje del tablero de control principal .....	147
Montaje del encoder SICK S4PA10000 .....	148
Montaje de los fines de carrera Omron WLCA2-LS .....	149
Montaje de los sensores de presión SITRANS P220 .....	150
Capítulo V .....	151
Pruebas y resultados .....	151
Pruebas en el sistema de comunicación .....	151
Pruebas en el sistema de instrumentación .....	154

	10
Pruebas en el sistema de control .....	158
Capítulo VI .....	162
Conclusiones y recomendaciones .....	162
Referencias.....	167
Anexos .....	171
Análisis de la encuesta .....	171
Tabla de asignación de variables.....	171
Tabla de direccionamiento modbus.....	171
Manual de usuario .....	171

## Índice de tablas

<b>Tabla 1</b> Características de la compuerta plana del desarenador _____	34
<b>Tabla 2</b> Características del sistema de izaje _____	37
<b>Tabla 3</b> Funcionamiento del freno electromagnético PROBAMPER FL – 5 _____	43
<b>Tabla 4</b> Características eléctricas de la bomba de lubricación _____	44
<b>Tabla 5</b> Características del motor eléctrico trifásico para izaje _____	45
<b>Tabla 6</b> Estado de los elementos que conforman el sist. de control de la compuerta plana ____	54
<b>Tabla 7</b> Características del tablero eléctrico _____	64
<b>Tabla 8</b> Características técnicas del controlador S7-1200 1214C DC/DC/DC _____	65
<b>Tabla 9</b> Características técnicas del módulo de entradas analógicas SM 1231 AI _____	66
<b>Tabla 10</b> Características técnicas del módulo SM 1223 RLY _____	67
<b>Tabla 11</b> Características técnicas del convertidor de baja tensión Sinamics G120C USS/MB ____	69
<b>Tabla 12</b> Características técnicas del contactor LC1 D2510 _____	74
<b>Tabla 13</b> Características técnicas del relé auxiliar ABB CR-P024DC2 _____	75
<b>Tabla 14</b> Características técnicas del relé de monitoreo 3UG4615 _____	78
<b>Tabla 15</b> Características técnicas del disyuntor 3RV2021-4BA10 _____	80
<b>Tabla 16</b> Características técnicas del disyuntor ABB S202C2 _____	81
<b>Tabla 17</b> Características técnicas de los portafusibles CAMSCO _____	82
<b>Tabla 18</b> Características técnicas de la pasarela USR-TCP232-410S _____	83
<b>Tabla 19</b> Características técnicas del access point SCALANCE W761-1 _____	84
<b>Tabla 20</b> Características técnicas de la antena ANT792-6MN _____	85
<b>Tabla 21</b> Características técnicas del switch CSM 1277 _____	86
<b>Tabla 22</b> Características técnicas del encoder incremental SICK DFS60B-S4PA10000 _____	87

	12
<b>Tabla 23</b> Conexión del encoder DFS60B-S4PA10000 _____	88
<b>Tabla 24</b> Características técnicas del sensor de presión Siemens SITRANS P220 _____	89
<b>Tabla 25</b> Características del transformador _____	93
<b>Tabla 26</b> Consumo de los elementos del sistema de control _____	94
<b>Tabla 27</b> Consumo de los elementos del sistema de comunicación _____	94
<b>Tabla 28</b> Configuración del encoder SICK DFS60B-S4PA10000 _____	96
<b>Tabla 29</b> Códigos de funciones modbus _____	102
<b>Tabla 30</b> Configuración de los parámetros de red del PLC _____	106
<b>Tabla 31</b> Configuración de los parámetros de red de la pasarela _____	106
<b>Tabla 32</b> Configuración de los parámetros de red del CBT _____	107
<b>Tabla 33</b> Configuración de los parámetros de la salida analógica del CBT _____	107
<b>Tabla 34</b> Registros modbus del CBT _____	109
<b>Tabla 35</b> Parámetros de la instrucción MB_CLIENT _____	110
<b>Tabla 36</b> Configuración de la instrucción MB_CLIENTDIAGNOSTICO _____	112
<b>Tabla 37</b> Palabras de mando para el control del motor mediante el CBT _____	113
<b>Tabla 38</b> Configuración de la instrucción MB_CLIENTESCRITURADATOS _____	113
<b>Tabla 39</b> Configuración de la instrucción MB_CLIENTLECTURASTATUS _____	114
<b>Tabla 40</b> Configuración de la instrucción MB_CLIENTESCRITURAAO _____	115
<b>Tabla 41</b> Configuración de los parámetros del módulo SCALANCE W761-1 _____	118
<b>Tabla 42</b> Parámetros de la instrucción MB_SERVER _____	119
<b>Tabla 43</b> Tabla de registros modbus para la comunicación WLAN _____	121
<b>Tabla 44</b> Configuración de parámetros del motor en el asistente del CBT _____	123
<b>Tabla 45</b> Resultado de la prueba de comunicación con el CBT – operación normal _____	151

<b>Tabla 46</b>	Resultado de la prueba de comunicación con el CBT – condición de falla _____	152
<b>Tabla 47</b>	Resultado de la prueba de comunicación con el W761-1 – operación normal _____	153
<b>Tabla 48</b>	Resultado de la prueba de comunicación con el W761-1 – condición de falla _____	154
<b>Tabla 49</b>	Resultado de la prueba del encoder en operación normal _____	155
<b>Tabla 50</b>	Resultado de la prueba del encoder simulando condición de falla _____	155
<b>Tabla 51</b>	Resultado de la prueba del encoder prueba de marcas _____	156
<b>Tabla 52</b>	Resultado de la prueba de los sensores de presión en operación normal _____	156
<b>Tabla 53</b>	Resultado de la prueba de los sensores de presión simulando condición de falla _____	157
<b>Tabla 54</b>	Resultado de la prueba de equilibrio de presiones _____	157
<b>Tabla 55</b>	Resultado de la prueba de conmutación del selector de modo de mando _____	158
<b>Tabla 56</b>	Resultado de la prueba de la apertura de la compuerta _____	159
<b>Tabla 57</b>	Resultado de la prueba del cierre de la compuerta _____	159
<b>Tabla 58</b>	Resultado de la prueba del paro de emergencia _____	160
<b>Tabla 59</b>	Resultado del indicador de posición vs HMI _____	160
<b>Tabla 60</b>	Resultado de las pruebas de luces indicadoras _____	161

## Índice de figuras

<b>Figura 1</b> Ubicación del bloque 13 en la represa Agoyán _____	22
<b>Figura 2</b> <i>Represa y embalse de Hidroagoyán: (1) muro ataguía</i> _____	23
<b>Figura 3</b> Desarenador de la Central Hidroeléctrica Agoyán _____	24
<b>Figura 4</b> Estanque del desarenador _____	25
<b>Figura 5</b> Toma de carga. _____	26
<b>Figura 6</b> Compuerta plana (1) y compuerta radial del desarenador (2) _____	27
<b>Figura 7</b> (1) bloque 13 y (2) oficina de operación _____	28
<b>Figura 8</b> <i>Diagrama de bloques inicial</i> _____	31
<b>Figura 9</b> Componentes mecánicos: (1) compuerta plana y (2) sistema de izaje _____	34
<b>Figura 10</b> Sistemas de cajas reductoras _____	35
<b>Figura 11</b> Perspectiva esquemática del sistema de izaje _____	36
<b>Figura 12</b> Dispositivo para fallas de izaje _____	37
<b>Figura 13</b> Componentes eléctricos del sistema de control original de la compuerta plana ____	38
<b>Figura 14</b> Tablero de la bomba de lubricación _____	39
<b>Figura 15</b> Diagrama eléctrico del tablero de control de la bomba de lubricación _____	39
<b>Figura 16</b> Tablero local del freno electromagnético _____	40
<b>Figura 17</b> Tablero de control de la compuerta plana del desarenador original _____	41
<b>Figura 18</b> <i>Válvulas de los sensores de presión</i> _____	42
<b>Figura 19</b> Transmisor de posición original Hartmann y Braun _____	44
<b>Figura 20</b> Sensores de presión originales _____	46
<b>Figura 21</b> Diagrama de la acometida eléctrica de la compuerta plana del desarenador ____	47
<b>Figura 22</b> Circuito de potencia original _____	48

	15
<b>Figura 23</b> Diagrama de bloques del proceso _____	61
<b>Figura 24</b> PLC Siemens S7-1200 1214C DC/DC/DC _____	67
<b>Figura 25</b> Módulo SM 1231 AI (izq.) y módulo SM 1223 RLY (der.) _____	68
<b>Figura 26</b> Diagrama de bloques del convertidor de baja tensión _____	70
<b>Figura 27</b> Interfaces del convertidor de baja tensión G120C USS/MB _____	71
<b>Figura 28</b> Panel de operador del convertidor de baja potencia BOP-2 _____	72
<b>Figura 29</b> <i>Conexión eléctrica del convertidor G120C USS/MB</i> _____	73
<b>Figura 30</b> contactor telemecanique LC1-D2510 _____	75
<b>Figura 31</b> Relé auxiliar ABB CR-P024DC2 _____	75
<b>Figura 32</b> Contactos STECK S-LPL42 _____	76
<b>Figura 33</b> Luz indicadora Telemecanique ZBV-6 _____	77
<b>Figura 34</b> <i>Diagrama de conexión del relé de monitoreo 3UG4615</i> _____	79
<b>Figura 35</b> Disyuntor trifásico Siemens 3RV2021-4BA10 _____	80
<b>Figura 36</b> Disyuntor ABB S202C2 _____	81
<b>Figura 37</b> Portafusibles y fusibles CAMSCO _____	82
<b>Figura 38</b> Pasarela USB – TCP232-410S _____	83
<b>Figura 39</b> Access point SCALANCE W761-1 _____	84
<b>Figura 40</b> Antena ANT792-6MN _____	85
<b>Figura 41</b> Switch de comunicación Siemens Sinamics CSM 1277 _____	86
<b>Figura 42</b> Encoder incremental SICK DFS60B-S4PA1000 _____	87
<b>Figura 43</b> Conector m23 del encoder SICK DFS60B-S4PA10000 _____	88
<b>Figura 44</b> Sensor de presión Siemens SITRANS P220 _____	90
<b>Figura 45</b> Diagrama de conexión eléctrica del WLCA2-LS _____	91

	16
<b>Figura 46</b> Fin De Carrera OMRON WLCA2-LS _____	91
<b>Figura 47</b> Indicador de posición digital ENDRESS+HAUSER RIA45 _____	92
<b>Figura 48</b> Programador del encoder incremental SICK DFS60B-S4PA1000 _____	97
<b>Figura 49</b> Esquema de conexión eléctrica del sensor de presión SITRANS P220 _____	98
<b>Figura 50</b> Pirámide de las comunicaciones _____	99
<b>Figura 51</b> Conexión rs-485 para dispositivos de una red modbus _____	101
<b>Figura 52</b> Modelo cliente servidor _____	103
<b>Figura 53</b> Arquitectura de la red de comunicación _____	103
<b>Figura 54</b> Diagrama de bloques de la comunicación PLC – CBT _____	104
<b>Figura 55</b> Conector RS-485 para modbus RTU del CBT _____	105
<b>Figura 56</b> Conector RS-485 para modbus RTU de la pasarela _____	105
<b>Figura 57</b> Diagrama de bloques para el indicador de posición digital _____	108
<b>Figura 58</b> Diagrama de flujo de la comunicación PLC-CBT _____	111
<b>Figura 59</b> Distancia entre el tablero de control principal y la oficina de operación _____	117
<b>Figura 60</b> Diagrama de flujo de la comunicación con el sistema SCADA _____	120
<b>Figura 61</b> Diagrama de conexión para configurar el CBT _____	122
<b>Figura 62</b> Diagrama de flujo del bloque de organización MAIN _____	124
<b>Figura 63</b> Diagrama de flujo del bloque de organización STARTUP _____	125
<b>Figura 64</b> Diagrama de flujo del paro de emergencia _____	126
<b>Figura 65</b> Diagrama de flujo de la medición y tratamiento de posición _____	127
<b>Figura 66</b> Diagrama de flujo de la medición y tratamiento de presiones _____	129
<b>Figura 67</b> <i>Diagrama de flujo de la lógica de control</i> _____	131
<b>Figura 68</b> <i>Diagrama de flujo de la subrutina abrir</i> _____	132



	17
<b>Figura 69</b> <i>Diagrama de flujo de la subrutina cerrar</i> _____	132
<b>Figura 70</b> <i>Diagrama de flujo de la subrutina parar</i> _____	133
<b>Figura 71</b> <i>Diagrama de flujo de la subrutina de registro de eventos</i> _____	133
<b>Figura 72</b> <i>Diagrama de flujo de la subrutina salida a la oficina de operación</i> _____	134
<b>Figura 73</b> Descripción de colores en pantallas HMI _____	137
<b>Figura 74</b> Representación de valores en HMI _____	138
<b>Figura 75</b> Representación de alarmas en la HMI _____	139
<b>Figura 76</b> Representación de colores en HMI _____	140
<b>Figura 77</b> Objetos y botones de navegación _____	141
<b>Figura 78</b> Arquitectura de las pantallas HMI _____	142
<b>Figura 79</b> Diseño de la pantalla de control _____	143
<b>Figura 80</b> Diseño de la pantalla de monitoreo _____	144
<b>Figura 81</b> Distribución de los elementos en: izq.: puerta y der.: doble fondo del tablero ____	145
<b>Figura 82</b> Tablero de control principal terminado _____	147
<b>Figura 83</b> Montaje del tablero de control principal _____	148
<b>Figura 84</b> Montaje del encoder SICK S4PA10000 _____	149
<b>Figura 85</b> Montaje de los fines de carrera _____	149
<b>Figura 86</b> Montaje de los sensores de presión SITRANS P220 _____	150

## Resumen

En este documento se realiza una breve descripción de los componentes de la represa de la Central Hidroeléctrica Agoyán con énfasis en el desarenador y su compuerta plana con el propósito de modernizar el sistema de control que rige sobre dicha compuerta; para esto se efectuó un análisis del sistema original en el que se profundiza en la filosofía de control y el entendimiento del proceso con el fin de replicar y mejorar las prestaciones del nuevo sistema automático. Para la operación de la compuerta plana se dispone de dos tipos de mando: local desde el tablero principal de control ubicado sobre la compuerta en la cota de 1667 m.s.n.m. y mediante la HMI de la oficina de operación. La automatización consta de un controlador Siemens S7-1200 junto a un convertidor de baja tensión Sinamics G120C comunicados mediante el protocolo Modbus RTU, dispositivos de mando y señalización y un enlace WLAN que permite establecer la comunicación entre el tablero local de control y el sistema SCADA de la represa. Además de un encoder para determinar la posición de la compuerta y sensores para la medición de presión aguas arriba y aguas debajo de la compuerta que permiten abrirla cuando ambas sean iguales evitando el desgaste innecesario de los componentes mecánicos.

### **PALABRAS CLAVE:**

- **S7-1200**
- **SINAMICS G120C USS/MB**
- **MODBUS RTU**
- **SCADA**
- **WLAN**

## **Abstract**

In this document, a brief description of the components of the Agoyán Hydroelectric Power Plant dam is made, with emphasis on the sand trap and its flat gate with the purpose of modernizing the control system that governs said gate; For this, an analysis of the original system was carried out, which delves into the control philosophy and the understanding of the process in order to replicate and improve the benefits of the new automatic system. Two types of control are available for the operation of the flat gate: local from the main control panel located above the gate at the elevation of 1,667 meters above sea level. and through the HMI of the operation office. The automation consists of a Siemens S7-1200 controller together with a Sinamics G120C low-voltage converter communicated using the Modbus RTU protocol, command and signaling devices and a WLAN link that allows communication to be established between the local control panel and the SCADA system. of the dam. In addition to an encoder to determine the position of the gate and sensors to measure pressure upstream and downstream of the gate that allow it to be opened when both are equal, avoiding unnecessary wear on the mechanical components.

### **KEYWORDS:**

- **S7-1200**
- **SINAMICS G120C USS/MB**
- **MODBUS RTU**
- **SCADA**
- **WLAN**

## Glosario

<b>CENACE</b>	Centro Nacional de Control de la Energía
<b>M.S.N.M</b>	Metros sobre el nivel del mar
<b>SCADA</b>	Supervisory Control and Data Acquisition
<b>CBT</b>	Convertidor de baja tensión
<b>PLC</b>	Programmable Logic Controller
<b>HMI</b>	Human Machine Interface
<b>LAN</b>	Local Area Network
<b>WLAN</b>	Wireless Local Area Network
<b>UAC</b>	Unidad de Adquisición y Control
<b>IEC</b>	International Electrotechnical Commission
<b>BOP</b>	Basic Operator Panel
<b>RTU</b>	Remote Terminal Unit
<b>TCP</b>	Transmission Control Protocol
<b>RPM</b>	Revoluciones por minuto
<b>IEEE</b>	Institute of Electrical and Electronics Engineers
<b>HSC</b>	High Speed Counter
<b>ISA</b>	Instrument Society of America

## Capítulo I

### 1. Descripción del proyecto de investigación

En este capítulo se detallan los orígenes de la central Hidroeléctrica Agoyán junto a una breve reseña de sus obras anexas, los componentes del desarenador, la importancia del proyecto junto a su alcance y los objetivos.

#### 1.1 Antecedentes

Desde el año 1983, la central hidroeléctrica Agoyán entró en operación siendo una de las primeras generadoras en el país, constituida por Casa de máquinas y la Represa Agoyán; ambos bloques están conectados físicamente por un túnel de carga encargado de transportar el agua desde la represa hasta las dos unidades generadoras ubicadas a 120 metros bajo la superficie de casa de máquinas.

Hidroagoyán fue diseñada para aportar con el Sistema Nacional Interconectado una potencia de 156 MW que en la actualidad según datos obtenidos del Centro Nacional de Control de la Energía - CENACES corresponde al 7.06% de generación hidroeléctrica bruta del país. (CONELEC, 2011)

El total de la potencia generada depende del recurso hídrico del río Pastaza, el mismo que es embalsado en la represa Agoyán. Este afluente está formado por dos ríos: el Chambo que proviene de la provincia del Chimborazo y el Patate que se origina en la provincia de Cotopaxi y recorre parte de esta y de Tungurahua. Esta proporciona un volumen de regulación diario promedio de  $760\,000\text{ m}^3$  entre el nivel mínimo de operación en la cota de 1645 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m) y el máximo a 1651 m.s.n.m. (Domínguez & Logroño, 2010)

Las principales obras anexas de la represa son:

- Dos desagües de fondo de 9 m de ancho para limpieza de sedimentos y vaciado del embalse.
- Un estanque desarenador seminatural de 150 m de largo por 90 m de ancho.
- Un desagüe de fondo del desarenador y estructura de la toma.
- Tres vertederos de exceso de 15 m de largo por 12 m de ancho.
- Un desagüe de cuerpos flotantes.
- Pórtico de mantenimiento.
- Túnel de carga cuya toma está ubicada en el cuerpo de la presa, tiene una longitud de 2378 m y 6 m de diámetro interno con capacidad de conducir un caudal de 120 m<sup>3</sup>/s.
- Chimenea de equilibrio subterránea para amortiguar sobrepresiones.

### Figura 1

*Ubicación del bloque 13 en la represa Agoyán*



La represa se encuentra dividida en bloques en los cuales se ubican los vertederos de excesos, desagües de fondo, la compuerta de la toma, y para este caso, en el bloque 13 se encuentran ubicadas las compuertas del desarenador. Este bloque está constituido por dos pilas de hormigón en las cuales, en su parte superior, está instalado un puente metálico sobre el cual

está montando un malacate de izaje (constituido por un motor eléctrico en conjunto con un sistema de cajas reductoras) para el accionamiento de la compuerta plana.

## 1.2 Componentes del desarenador de la represa de la central hidroeléctrica Agoyán

### 1.2.1 Embalse

El embalse cuyo volumen total es de  $1\,850\,000\text{ m}^3$  de fluidos, adicionalmente tiene una longitud aproximada de  $2\,000\text{ m}$  con un ancho que varía desde su punto más estrecho con  $100\text{ m}$  y extendiendo este valor en el punto más largo con  $300\text{ m}$ .

Entre sus principales características constructivas aguas arriba del embalse se cuenta con un canal de desvío y limpieza que direcciona el cauce del río Pastaza hacia la represa. Un muro ataguía mostrado en la

Figura 2 (1) que divide el área de la represa con la de embalse y es constituido como una pequeña presa de hormigón con una altura máxima de  $35\text{ m}$  y que se extiende hasta la cota de  $1645\text{ m.s.n.m.}$

### Figura 2

*Represa y embalse de Hidroagoyán: (1) muro ataguía*



### 1.2.2 Desarenador

Un desarenador tiene como finalidad la separación y eliminación de partículas sólidas como la arcilla, arenas finas o gruesas y cualquier tipo de desecho que puede acumularse en el transporte de fluidos. (López, 2013)

La importancia de la separación de residuos antes del ingreso del fluido a la toma de carga radica en evitar el transporte de sedimentos en la conducción del agua y por ende desgaste desmedido de los equipos involucrados aguas abajo.

#### Figura 3

*Desarenador de la Central Hidroeléctrica Agoyán*



Hidroagoyán cuenta con un desarenador del tipo semi-natural, es decir, que para ejercer sus funciones se aprovechó parte de la disposición natural del área que divide el embalse de la represa. Este se encuentra ubicado en el bloque 13 y tiene una longitud de 16 metros, dispone de un vano de 4 metros de ancho por 5 de altura y está provisto por una compuerta radial de operación y una compuerta plana para mantenimiento, la capacidad de descarga es de  $300 \text{ m}^3/\text{s}$ . (Gavilanez, 2011)



El desarenador de la represa de la Central Hidroeléctrica Agoyán fue diseñado para ejercer como un segundo filtro de los sedimentos que acarrea el río Pastaza, el primero es la represa, en la que idealmente se depositan los desechos de mayor tamaño que transporta dicho río. Entre el embalse y la represa se encuentra un muro de hormigón llamado ataguía el cual dispone de unos orificios que permiten el paso del líquido con menos sedimentos desde la represa hacia el embalse como se muestra en la Figura 3. A pesar de existir dos filtros la cantidad de basura transportada por el Pastaza es considerable, razón por la cual existe el desarenador de la represa cuya función es devolver al cauce natural del río la mayor cantidad de sedimentos evitando que estos pasen a la toma carga.

### 1.2.3 Desagüe de fondo del desarenador

Se denomina así a la abertura generada por la apertura de la compuerta radial del desarenador cuando la compuerta plana se encuentra abierta, está dedicado a la evacuación de sedimentos que se acumulan en el estanque desarenador.

**Figura 4**

*Estanque del desarenador*



El estanque del desarenador es el encargado de almacenar el fluido del río Pastaza con la menor cantidad de sedimentos, ya que como se observa en la Figura 4 se encuentra separado de la represa por el muro ataguía. Además el desarenador cuenta con un muro con rejillas que se utilizan como segundo filtro, es decir, que la basura que logró ingresar al desarenador será filtrada por segunda ocasión por la rejilla antes de ingresar a la toma de carga.

#### 1.2.4 Toma de carga

Es la encargada de captar los  $120 \text{ m}^3/\text{s}$  con los que opera la Central Hidroeléctrica Agoyán entre el nivel máximo (1651 m.s.n.m.) y el nivel mínimo (1645 m.s.n.m.). (Gavilanez, 2011)

#### Figura 5

*Toma de carga.*



*Nota.* El gráfico presenta la tubería que transporta el fluido represado desde la toma de carga hasta las unidades de generación. Tomado de (Gavilanez, 2011).

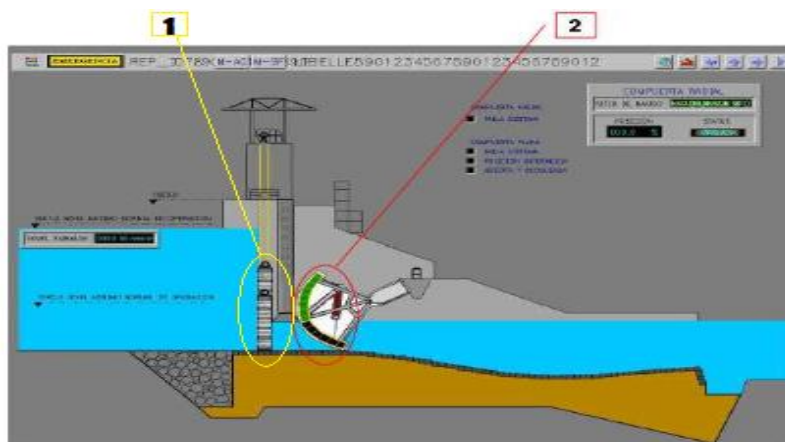
#### 1.3 Justificación e importancia

Una de las principales características de los afluentes de la represa es la gran cantidad de desechos que acarrearán, los mismos que pasan a formar parte de los sedimentos de esta, entendiéndose por sedimento como el conjunto de partículas sólidas que quedan depositadas en el fondo de un recipiente (en este caso el embalse) que contiene líquido.

Como se mencionó anteriormente, los sedimentos que llegan hasta la represa de Agoyán provienen de tres provincias, razón por la cual la cantidad de desechos que esta almacena representa uno de los mayores problemas que enfrenta la unidad de negocio para generar energía eléctrica de manera eficiente. Gran parte de estos desechos son acumulados en el desarenador el cual cumple la función de “colador” para evitar que existan problemas con la basura aguas debajo de la toma de carga (de darse la condición en la que se filtre exceso de basura pueden verse seriamente comprometidas las unidades de generación de Hidroagoyán existiendo la posibilidad de parar la central hasta efectuar las acciones correspondientes) reteniéndolos hasta el momento de su evacuación al cauce natural del río.

**Figura 6**

*Compuerta plana (1) y compuerta radial del desarenador (2)*



Según información publicada en la página de la central Hidroeléctrica Agoyán, la represa cuenta con desagües de fondo diseñados específicamente para la protección de ésta. Dichos desagües están compuestos por dos compuertas: una radial utilizada en condiciones normales permitiendo que gran parte de los sedimentos de la represa sean evacuados al cauce normal del

rio Pastaza y que de esta manera no ingresen por la toma de carga ya que esto puede ocasionar graves fallos en las unidades de generación por atascamientos o rupturas en sus componentes; y, una compuerta plana que permite realizar operaciones de mantenimiento y/o reparaciones en la compuerta radial.

Normalmente la compuerta radial realiza el sellado del desagüe de fondo de los vertederos o del desarenador, manteniendo la compuerta plana abierta. Esta compuerta es cerrada para realizar acciones de mantenimiento de la compuerta radial, cerrado el flujo aguas arriba y permitiendo las operaciones pertinentes. El movimiento de la compuerta plana se efectúa por medio de malacates ubicados en el puente metálico y accionados mediante un tablero local ubicado en el mismo nivel que basa su funcionamiento en relés de estado sólido y elementos mecánicos que se encuentran operativos desde 1987. Mediante el control de la compuerta plana se garantiza que las acciones de mantenimiento sean completamente seguras para el personal de las tres áreas encargadas: eléctrica, mecánica, civil y operación.

### **Figura 7**

*(1) bloque 13 y (2) oficina de operación*



El sistema de control de apertura y cierre de la compuerta plana actualmente utilizado es el mismo que la constructora entregó operativo en el año 1987, debido al paso del tiempo este tipo de control poco flexible y limitado se ve en la necesidad de ser reemplazado por elementos actuales que permitan mejorar la eficiencia y seguridad de esta operación, otorgando a los operadores opciones de monitoreo, control y posicionamiento de la compuerta en tiempo de real de tal manera que se pueda ejercer acciones sobre este control desde el bloque 13 como desde la oficina del operador de la represa ubicada a más de 150 metros de distancia del bloque 13 como se aprecia en la Figura 7.

El control de la compuerta plana del desarenador es muy importante para preservar el estado de los componentes mecánicos y estructuras aguas abajo de la toma de carga de las dos centrales hidroeléctricas: Agoyán y San Francisco las cuales son abastecidas por el líquido represado en Agoyán, por esta razón, es necesario modernizar este sistema por una solución automatizada de ingeniería que brinde a trabajadores, operadores y personal de gerencia la posibilidad de manipular e interactuar con el control con dispositivos actuales.

Otro de los inconvenientes del actual sistema de control es la imposibilidad de integración a otros sistemas actuales ya implementados en la central hidroeléctrica Agoyán tal como el sistema SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition – Supervisión Control y Adquisición de Datos) asociado al control de las compuertas y clapetas de vertederos, dicho sistema se encuentra instalado en la oficina de operación de la represa y le permite realizar acciones de apertura y cierre controlados de compuertas y clapetas mostrando en tiempo real el avance de la operación y el comportamiento de las variables inmersas en el proceso. La solución propuesta en este proyecto permitirá la integración de la operación de la compuerta plana del

desarenador al sistema SCADA mencionado anteriormente de tal manera que se extienda su utilización y el operador disponga de las facilidades mencionadas anteriormente, logrando centralizar las acciones de control y monitoreo en un solo punto.

Cabe aclarar que además de tener el control centralizado se instalará elementos de mando in situ que permitirán al personal de mantenimiento realizar las acciones de control desde el tablero local ubicado en el bloque 13.

#### **1.4 Alcance del proyecto**

El proyecto de titulación propone diseñar e implementar una solución moderna y automatizada del tablero de control de la compuerta plana del desarenador con elementos de control e instrumentación modernos, esta solución integrará un enlace de comunicación que permita establecer el control y monitoreo del estado de la compuerta plana (que actualmente no existe) al sistema SCADA de la oficina del operador ubicada a más de 150 *m* de distancia permitiendo, además, centralizar el mando de esta. También se incluye una interfaz HMI que permite al operador interactuar con este proceso desde su oficina.

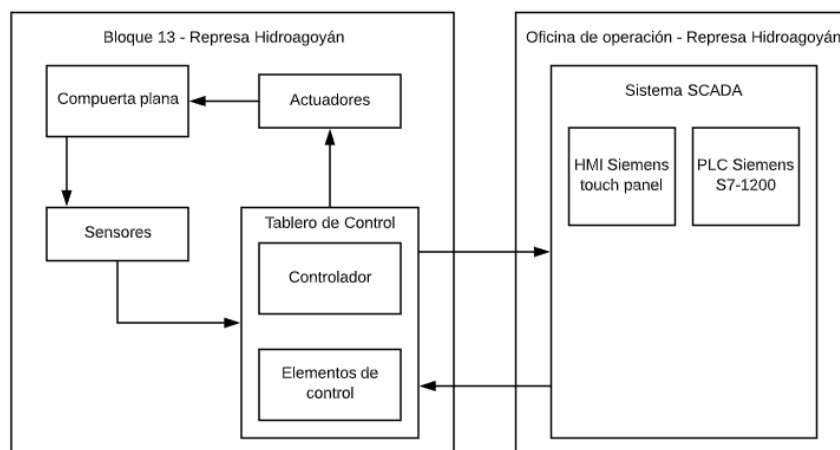
El protocolo utilizado obedece al estándar IEEE 802.11h mediante una red Wireless entre el bloque trece y la oficina de operación. El tablero principal de control se adhiere a la red de control de la represa Hidroagoyán ya existente.

Esta solución otorgará tanto al operador de la represa (desde su oficina), como al personal que lo requiera (desde el tablero de control ubicado en los puentes metálicos sobre el bloque 13) la posibilidad de apertura o cierre de la compuerta plana de manera automática mediante un controlador que trabajará en conjunto con un variador de frecuencia ahora llamado

convertidor de baja tensión (CBT) en base al fabricante; y sus respectivos elementos de mando y control que permitan realizar esta acción.

**Figura 8**

*Diagrama de bloques inicial*



En el diagrama de la

Figura 8 se muestra de manera general las partes involucradas en la solución propuesta inicialmente; está compuesta por dos partes: por el lado izquierdo tenemos al bloque 13 que es el espacio físico que incluye la compuerta plana del desarenador y, por el lado derecho, la oficina de operación con el sistema SCADA que actualmente opera para clapetas y compuertas de vertederos, entre otras acciones.

## 1.5 Objetivos

### 1.5.1 Objetivo general

Diseñar e implementar el sistema de operación automática de la compuerta plana del desarenador de la represa de la central hidroeléctrica Agoyán.

### 1.5.2 Objetivos específicos

- Realizar el estudio de la lógica y filosofía de control del sistema original de apertura y cierre de la compuerta plana del desarenador.
- Mejorar la confiabilidad del sistema de operación automática mediante la utilización de instrumentación electrónica actual.
- Garantizar la seguridad e integridad de los trabajadores mediante la implementación de equipos modernos que cumplan con normativa nacional e internacional.
- Facilitar la operación de la compuerta plana para trabajadores, operadores y en general para todo el personal calificado para llevar a cabo esta acción
- Brindar mayor facilidad en las acciones de mantenimiento llevadas a cabo en el desarenador de la represa Hidroagoyán.
- Mejorar la seguridad mediante la implementación del monitoreo remoto del estado de la compuerta plana.
- Desarrollar el algoritmo de operación de la compuerta plana en base al controlador seleccionado.
- Realizar el manual de operación del nuevo sistema automático de operación de la compuerta plana del desarenador.
- Realizar los planos eléctricos, de control y potencia acorde al nuevo sistema que sirvan como guía para los trabajadores de la Hidroeléctrica Agoyán
- Evaluar el desempeño del nuevo sistema automático de operación de la compuerta plana en base al anterior sistema.



## Capítulo II

### 2. Estudio del sistema original de control de la compuerta plana

Este capítulo detalla el estado en el que se encontraron los componentes eléctricos y mecánicos del control original de la compuerta plana del desarenador, así como la acometida eléctrica, actuadores, instrumentos de medición e instrumentos de control. Se realizó un análisis de la filosofía de control original así como un diagnóstico de su sistema de control y por último se menciona la propuesta de modernización.

#### 2.1 Descripción del sistema electromecánico de la compuerta plana del desarenador

Hasta antes de la entrega de este proyecto el sistema de apertura y cierre de la compuerta plana del desarenador estaba constituido por elementos electromecánicos y una lógica de programación basa en un sistema cableado de relés inflexible que fue entregado por la empresa constructora en el año 1983; este sistema no permitía un monitoreo completo de la compuerta desde la oficina de operación. A continuación se detallan los componentes que formaban parte del sistema original:

##### 2.1.1 Componentes mecánicos

Estos componentes son los encargados de realizar el trabajo mecánico de las operaciones relacionadas a la compuerta plana. A continuación se describen las características principales de cada uno de estos:

**Figura 9**

*Componentes mecánicos: (1) compuerta plana y (2) sistema de izaje*



A continuación se detallan las características técnicas de cada uno de los elementos mostrados en la Figura 9.

### 2.1.1.1 Compuerta plana

**Tabla 1**

*Características de la compuerta plana del desarenador*

Parámetro	Valor
Altura	5.35 m
Profundidad	0.66 m
Ancho	4.79 m
Peso aproximado	14.3 toneladas
Nivel máximo	1651 m.s.n.m.
Nivel en el umbral	1622 m.s.n.m.
Estanquidad	A los cuatro lados

Consiste en una estructura soldada de acero en espesores variables, de 10 mm hasta 25 mm, en dimensiones de 5350 mm x 4790 mm x 663 mm. Dispone de un sellado aguas abajo que

es el sellado principal y un sellado auxiliar destinado a mantener limpia de sedimentos a la recata.

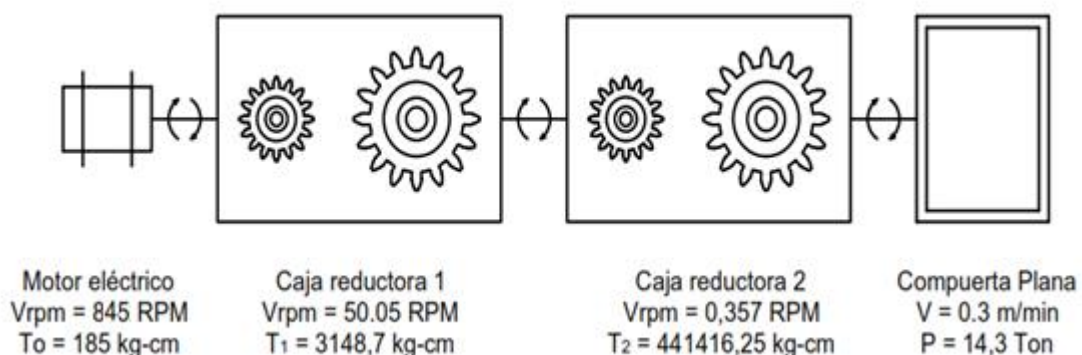
Para los movimientos de izaje y descenso, la compuerta dispone de un par de cáncamos, cada uno de los cuales dispone de una polea. Adicionalmente dispone como elemento de guiado un par de ruedas y zapatas guías por los costados. (Pescarmona, Proyecto Hidroeléctrico Agoyán, 1983)

### 2.1.1.2 Sistema de izaje

El malacate mecánico está ubicado en la elevación de 1664,516 m.s.n.m. compuesto por un bastidor que sirve de sostén a los mecanismos componentes del malacate y una cadena cinemática compuesta de la siguiente manera: motor eléctrico, freno electromagnético, reductor 1/17, reductor 1/140,19 del que, hacia ambos lados, salen los tambores de 605 mm de diámetro, los cuales se acoplan a la compuerta por un sistema de cables y poleas que le permiten ejercer un tiro nominal de 21 toneladas. (Pescarmona, Proyecto Hidroeléctrico Agoyán, 1983)

**Figura 10**

*Sistemas de cajas reductoras*

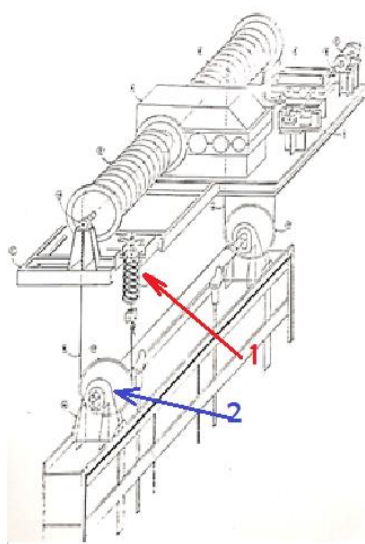


La Tabla 1 indica que el peso aproximado de la compuerta plana es de 14.3 toneladas, por lo tanto y basados en la Figura 10 se verifica que el sistema de cajas reductoras es capaz de izar dicha compuerta.

Además el sistema de izaje consta de un dispositivo electromecánico para la detección de fallas por cable tenso o cable flojo como se muestra en la Figura 11. El punto 1 corresponde al conjunto compensador con limitador de esfuerzos que se compone por un resorte y dos fines de carrera mostrados en la Figura 12, estos elementos están conectados al cable de acero que va guiado por su respectiva polea marcada por el punto 2 y que funcionan a manera de suspensión la cual se puede expandir a tal punto de activar el fin de carrera inferior generando la alarma de cable tenso, y por otro lado, al momento de contraerse activa la alarma de cable flojo.

### Figura 11

*Perspectiva esquemática del sistema de izaje*



*Nota.* El gráfico muestra los componentes del sistema electromecánico de detección de falla por cable tenso o cable flojo. Tomado de: (Consult, 1987)

En la Figura 12 se indican los fines de carrera del dispositivo electromecánico para la detección del cable flojo y cable tenso que están ubicados de tal manera que se accionan cuando una de las dos condiciones se presenta.

**Figura 12**

*Dispositivo para fallas de izaje*



En resumen, las características generales del sistema de izaje son mostradas en la siguiente tabla:

**Tabla 2**

*Características del sistema de izaje*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Alimentación	460 VAC – 60 Hz
Tiro nominal	21 toneladas
Velocidad de izaje	0.30 m/min
Altura de izaje	31 + 3 metros
Peso aproximado	5.38 toneladas

### 2.1.2 Componentes eléctricos

**Figura 13**

*Componentes eléctricos del sistema de control original de la compuerta plana*



Las partes mostradas en la Figura 13 representan los componentes eléctricos y electrónicos del sistema de control original de la compuerta plana del desarenador. A continuación se enumera cada uno de estos:

1. Tablero local para la bomba de lubricación
2. Tablero local para el freno electromagnético
3. Tablero de control principal
4. Freno electromagnético
5. Bomba de lubricación
6. Transmisor de posición
7. Motor principal de izaje

Las características y particularidades de cada uno de estos elementos son descritas en los siguientes numerales:

### 2.1.2.1 Tablero local para la bomba de lubricación

**Figura 14**

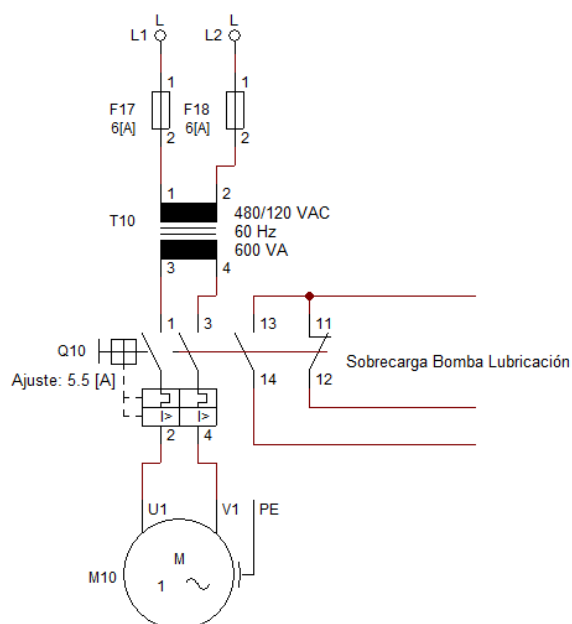
*Tablero de la bomba de lubricación*



Este tablero contiene un transformador de 480/120 VAC a 60 Hz y 600 VA junto con sus fusibles de protección. Del lado del secundario del transformador posee un disyuntor diferencial Q10 ajustado a 5.5 [A] que protege al motor de la bomba de lubricación M10.

**Figura 15**

*Diagrama eléctrico del tablero de control de la bomba de lubricación*



### 2.1.2.2 Tablero local del freno electromagnético

**Figura 16**

*Tablero local del freno electromagnético*



El tablero del freno electromagnético está compuesto por un transformador de 480/24 VAC junto con su etapa rectificación, filtrado y sus elementos de protección como muestra la Figura 16.

### 2.1.2.3 Tablero de control principal

El tablero de control original de la compuerta plana del desarenador se ubica en la cota de 1667 m.s.n.m. y permite realizar las acciones de: apertura, cierre y parada de la compuerta mediante el uso de pulsadores, también posee un interruptor de tipo llave para realizar un bypass de la medición de los sensores de presión (que permite funcionar a la compuerta en caso de avería de los sensores), posee luces indicadoras para las posiciones de: abrir, abriendo, cerrar, cerrando, compuerta parada, compuerta bloqueada, compuerta intermedia, traba colocada, falla por sobrecarga y falla en el sistema de izaje.

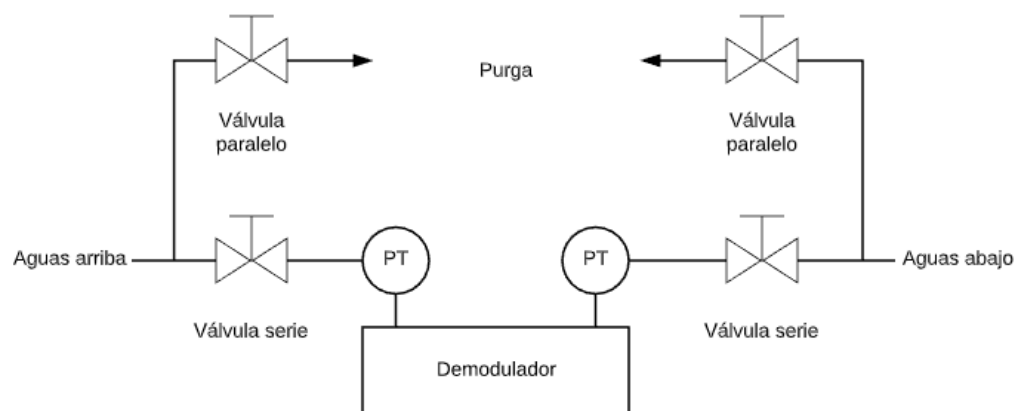


**Figura 17**

*Tablero de control de la compuerta plana del desarenador original*



Además posee un demodulador de equilibrio de presiones (1) el cual se encarga de comparar las señales eléctricas emitidas por los sensores de presión aguas arriba y aguas abajo ubicados en la cota 1628,65 m.s.n.m. para posteriormente activar un contacto NO cuando ambas presiones sean iguales. Los sensores están ubicados en la parte final de los conductos de toma de la carga aguas abajo, para facilitar su inspección y cambio si fuera necesario. Estos conductos poseen en el extremo próximo a los sensores dos válvulas esféricas, una en serie y otra en paralelo. La válvula ubicada en paralelo es de menor tamaño y sirve para purgar el conducto de toma de presión y dar salida a los sedimentos que puedan existir.

**Figura 18***Válvulas de los sensores de presión*

La válvula dispuesta en serie con el conducto va a ser utilizada cuando deba hacerse una inspección del sensor, pues cerrando esta válvula queda aislado el sensor y puede retirarse para inspección o reemplazo.

Estos sensores traducen la presión actuante sobre sí, en una señal eléctrica, estas señales son conducidas hasta el equipo demodulador ubicado en el tablero de control al nivel de 1664,516 m.s.n.m. donde las señales son comparadas. Una vez que la señal de presión aguas abajo iguale a la presión aguas arriba el equipo demodulador cierra un contacto que permite la operación del malacate de izaje.

El indicador de digital de posición de la compuerta (2) que recibe una señal de 4-20 mA y la convierte en un valor de 0 a 34 metros. Este último corresponde a una modificación reciente realizada por el personal electrónico de Hidroagoyán.

Además, en la Figura 17 se muestra los componentes eléctricos y electrónicos originales que forman en control tales como: relés, fusibles, transformadores, borneras, contactores, entre otros.

#### 2.1.2.4 Freno electromagnético Probamper FL-5

Este tipo de freno electromagnético funciona con corriente continua mediante su tablero local. Su construcción física está basada en un conjunto de zapatas, resortes, electroimanes, entre otros. Su funcionamiento es el siguiente: cuando se alimentan los electroimanes de freno, éstos se atraen actuando contra el resorte provocando que las zapatas suelten el volante. Cada freno posee dos electroimanes conectados en serie con sus respectivas bobinas de aislamiento y encapsuladas en resina epoxy, asegurando su larga duración, excelente disipación térmica y estanquidad.

Los detalles de ingeniería de dimensionamiento, montaje y cualquier otro particular respecto a este tema se encuentran en el documento bibliográfico: Catálogo de elementos comerciales; la intención de este proyecto no es profundizar en este tema, sino más bien en su control, razón por la cual se detalla la siguiente tabla:

**Tabla 3**

*Funcionamiento del freno electromagnético PROBAMPER FL – 5*

<b>Contactor</b>	<b>Valor</b>
Activado	Suelta el tambor, la compuerta se puede mover
Desactivado	Las zapatas se aplican al tambor, la compuerta no se puede mover

### 2.1.2.5 Bomba de lubricación

La bomba de lubricación sirve para mantener en óptimas condiciones el sistema mecánico de izaje, es decir, las dos cajas reductoras de izaje utilizadas para aumentar el torque del sistema. A continuación se muestran sus características eléctricas:

**Tabla 4**

*Características eléctricas de la bomba de lubricación*

Parámetro	Valor
Tipo	Motor de rotor bobinado en cortocircuito
Potencia	0.33 CV – 0.2427 [Kw]
Voltaje de alimentación	120 [V]
Factor de potencia	0.85
Corriente nominal	5.8 [A]
Frecuencia	60 [Hz]

### 2.1.2.6 Transmisor de posición

**Figura 19**

Transmisor de posición original Hartmann y Braun



Este transmisor está compuesto por un conjunto de engranajes y levas que activan contactos normalmente abiertos en función del número de revoluciones que ha girado el eje del transmisor que se encuentra acoplado mediante un matrimonio mecánico a un eje de medida del sistema de izaje. Este dispositivo es el que capta las señales de: compuerta abierta y cerrada.

Los transmisores de posición de este tipo presentan inconvenientes en su precisión debido al gran margen de error con respecto a las opciones que existen en la actualidad como son los encoders.

### 2.1.2.7 Motor principal de izaje

El estudio de ingeniería de la empresa constructora de la Central Hidroeléctrica Agoyán dimensionó los valores nominales adecuados para el motor de izaje que se presentan en la siguiente tabla:

**Tabla 5**

*Características del motor eléctrico trifásico para izaje*

Parámetro	Valor
Tipo	Motor de rotor bobinado en cortocircuito
Marca	Siemens
Potencia	2 CV – 1.62 [kW]
Voltaje de alimentación	460V – trifásico
Rotación nominal	852 [RPM]
Factor de potencia	0.85
Corriente nominal	2.4 [A]
Frecuencia	60 [Hz]

### 2.1.2.8 Fines de carrera de estado de la compuerta

Se dispone de tres fines de carrera que funcionan en conjunto con el transmisor de posición y sirven para determinar el estado de reposo de la compuerta plana del desarenador. Estos son:

- Fin de carrera de traba colocada: Estos se activan cuando la compuerta plana va a permanecer en reposo, razón por la cual se coloca la traba metálica para servir de soporte a la misma.
- Fin de carrera de compuerta bloqueada: adicionalmente a los fines de carrera de traba colocada existe la validación de compuerta bloqueada que permite desconectar el circuito de potencia una vez que la compuerta ha llegado a asentarse por completo en las trabas, activando de esta manera su estado de reposo.

### 2.1.2.9 Sensores de presión

El sistema original funciona mediante la activación del contacto correspondiente al bypass de los sensores de presión ya que estos se encontraban averiados.

#### **Figura 20**

*Sensores de presión originales*

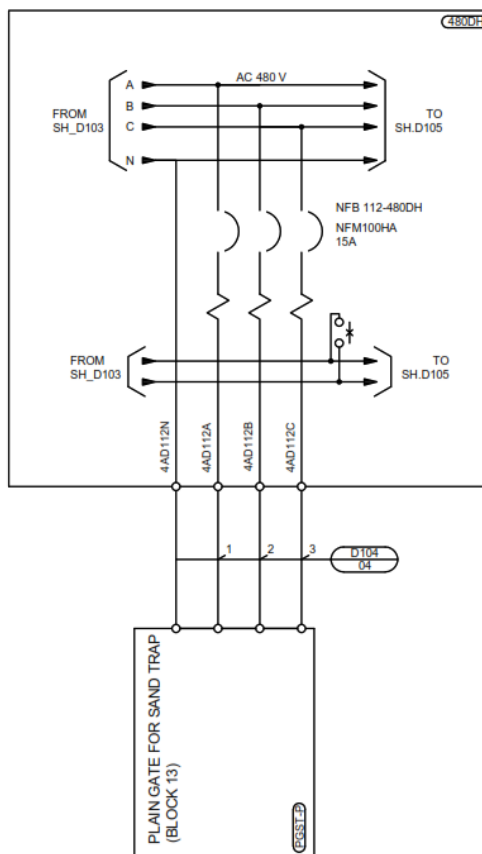


### 2.1.3 Acometida Eléctrica

El bloque 13 de la represa Agoyán dispone de alimentación trifásica 480VAC diseñada originalmente por Mitsubishi Electric Corporation. Dicho diseño cuenta con los elementos de protección adecuados y se detalla a continuación:

**Figura 21**

*Diagrama de la acometida eléctrica de la compuerta plana del desarenador*



*Nota.* El gráfico es un extracto del plano JEZ64637 diseñado por Mitsubishi Electric Corporation; en este se muestra que la protección general de esta acometida es un disyuntor de 15 amperios. El plano original se encuentra en los archivos de CELEC EP Hidroagoyán. (Mitsubishi Electric, 1984)

## 2.1.4 Control eléctrico

El control de la compuerta plana está ubicado sobre el malacate de izaje y es del tipo electromagnético convencional (sistema cableado inflexible) proyectado para trabajar sobre un motor asíncrono con rotor en cortocircuito denominado también como jaula de ardilla.

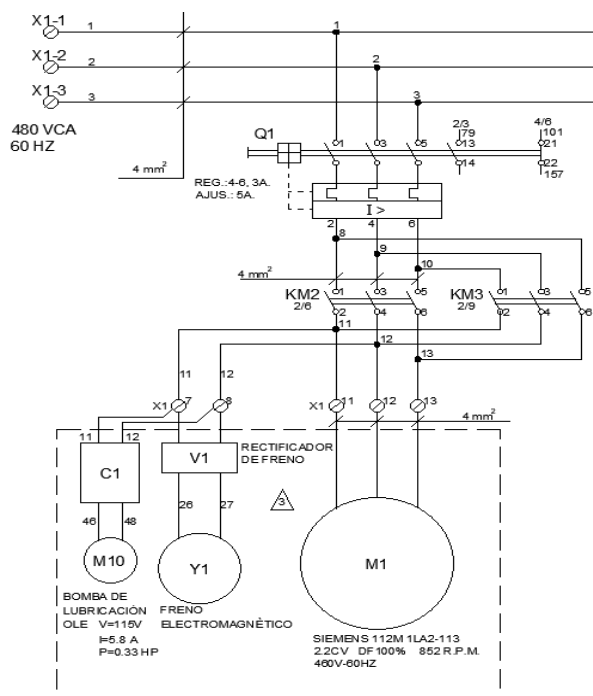
### 2.1.4.1 Circuito de potencia

Se ha dispuesto de un guardamotor en este circuito encargado de proteger al motor, dos contactores ubicados en el circuito del estator permiten invertir el sentido de movimiento del motor; el arranque de este se realiza de forma directa.

El freno electromagnético es alimentado por un rectificador, el que a la vez está conectado a los bornes de alimentación del motor.

**Figura 22**

*Circuito de potencia original*





#### **2.1.4.2 Circuito de comando**

Para alimentar este circuito se utiliza un transformador de 480/127 VCA – 60 Hz que está protegido con fusibles en el primario y secundario con puesta a tierra. Este circuito permite el cambio de giro del motor mediante el accionamiento de los contactores de abrir o cerrar mediante sus respectivos pulsadores.

Mediante un contacto auxiliar del guardamotor de protección del motor se ha validado el caso en el existan fallas al momento de abrir o cerrar la compuerta el cual desconectará dichos contactores.

Adicionalmente se ha provisto de iluminación al interior del panel que funciona automáticamente cuando la puerta interior del panel es abierta permitiendo que el fin de carrera excite la lámpara.

#### **2.1.4.3 Circuito de señalización y medición de posición de la compuerta**

La alimentación de este es de 48 VCC y está provisto de la siguiente señalización:

- Compuerta abierta y bloqueada
- Abierta
- Cerrada
- Intermedia
- Abre
- Cierra
- Para

También dispone de un equipo transmisor de posición de compuerta de 4 – 20 mA y por un indicador digital de posición ubicado en el tablero de comando local.

## **2.2 Análisis de la filosofía de control de la operación de la compuerta plana del desarenador original.**

La operación de la compuerta plana solo es posible ejecutarla por medio de los pulsadores de abrir o cerrar ubicados en el tablero de comando local ubicado en el nivel 1664,516 m.s.n.m.

Con el propósito de realizar el equilibrio de presiones sobre la compuerta plana, se debe llenar el recinto que queda entre las compuertas plana y radial hasta el nivel que tiene el embalse. Para tal efecto se dispone de una válvula de accionamiento manual ubicada en el nivel 1653,20 mediante un volante que permite el ingreso de agua a través de uno de los dos tubos de aireación de la pantalla de hormigón, el otro tubo sirve para la salida de aire.

Las maniobras de abrir o cerrar son autorretenidas, es decir, que si se realiza una de estas acciones la otra no podrá ejecutarse. Si se desea detener las compuertas en posiciones intermedias se deberá utilizar el pulsador de parar. Para limitar dichas maniobras se ha dispuesto de fines de carrera que limitan los máximos desplazamientos de la compuerta.

El indicador de compuerta abierta y bloqueada refleja el estado en el que la compuerta está en reposo en la parte superior con las trabas colocadas y el circuito de potencia desenergizado

Cuando la compuerta está abierta sin colocar las trabas y con el circuito de potencia funcionando se enciende el indicador de compuerta cerrada

El indicador de compuerta cerrada se activa cuando la compuerta se encuentra en la parte inferior asentada en el fondo del desarenador sellando las caras aguas arriba y aguas abajo.

Si la compuerta es detenida por el operador en cualquier posición antes de accionar los fines de carrera limitadores de desplazamiento se encenderá el indicador de compuerta intermedia.

Por último, mientras la compuerta se encuentre realizando la operación de abrir, cerrar o parar se iluminará su correspondiente indicador.

### **2.2.1 Posición de la compuerta**

Normalmente la compuerta está ubicada en la posición de reposo y descansando sobre sus trabas a una elevación de 1653,68 m.s.n.m.

### **2.2.2 Preparación**

Previo al inicio de la operación, se debe revisar la hoja de la compuerta, las guías y el malacate. Este último contiene elementos que deben ser engrasados previamente, también se deben revisar el nivel de aceite en las cajas reductoras para, en caso de ser necesario, agregar el mismo tipo de aceite.

### **2.2.3 Puesta en marcha**

Una vez revisadas todas las condiciones mecánicas como ajuste y ubicaciones correspondientes se puede accionar el equipo de control. Además se deben revisar todas las conexiones eléctricas que están previstas en los esquemas funcionales e interconexiones, las cuales deberán estar perfectamente ajustadas.

Cumplidas estas condiciones se podrá probar el equipo con tensión, la cual deberá coincidir con las requeridas a cada caso, luego se podrá comandar el equipo desde el tablero de control.

#### 2.2.4 Operación abrir

Ubicado en la cota de 1653,20 m.s.n.m. se procede a abrir la válvula de tipo volante en forma manual para producir el llenado del recinto entre compuerta radial y plana.

Los sensores del equipo detector de presiones equilibradas envían una señal eléctrica proporcional a las presiones detectadas comparándose las mismas en un sistema demodulador-comparador, ubicado en el tablero de control sobre el malacate de izaje, el cual cierra un “fin de carrera indicador de nivel”, 1 S161, cuando la diferencia de presiones sea igual a cero. Si el operador intenta abrir la compuerta antes que se cumpla esta condición el sistema no obedecerá la orden.

Mientras la compuerta se encuentre cerrada, reposando sobre el umbral, la luz indicadora de compuerta cerrada, H3, se encontrará encendida.

Para iniciar la operación de abrir se debe accionar su pulsador siempre y cuando no se encuentren actuando los siguientes elementos:

- Guardamotor de protección del motor
- Pulsador de parar
- Pulsador de cerrar
- Fin de carrera de límite superior
- Fin de carrera limitador de esfuerzo
- Fin de carrera traba colocada

El sistema continúa con la operación de apertura de la compuerta hasta alcanzar el “fin de carrera de límite superior” que desactiva el relé del “contactor abrir” y detiene al motor, simultáneamente activa la luz indicadora que refleja el estado de compuerta abierta.

Si durante la apertura de la compuerta se produce una sobrecarga del motor originada por un tiro anormal, el motor se detiene e inmediatamente se encienden las luces indicadoras de sobrecarga del motor. Por otro lado, si en la operación de la apertura de la compuerta se requiere parar, basta con presionar dicho pulsador.

#### **2.2.5 Operación de cerrar**

Teniendo abierta la compuerta plana del desarenador, se deben retirar las trabas al nivel de 1653 m.s.n.m. con lo que se desactivan sus correspondientes fines de carrera de trabas colocadas.

Antes de presionar el “pulsador de cerrar” de debe verificar que no se encuentren actuando los siguientes elementos eléctricos:

- Guardamotor de protección del motor
- Pulsador de parar
- Fin de carrera de límite inferior
- Fin de carrera de cable flojo

Si todo está en orden se energizará el “contactor de bajar” autorreteniendo la orden de cerrar y produciéndose el arranque del motor y el descenso de la compuerta, cuando la compuerta sale de la posición inferior el “fin de carrera de límite superior” apaga la luz indicadora de compuerta abierta y enciende la luz indicadora de compuerta intermedia.

El momento que la compuerta llega a accionar el fin de carrera de límite inferior se desconecta el relé de cerrar produciéndose el paro del motor; a la par se apaga la luz indicadora de compuerta intermedia y se enciende la correspondiente luz indicadora de compuerta cerrada.

Si durante el movimiento de bajada de la compuerta, se produce una sobrecarga del motor o la actuación de los fines de carrera de cable flojo, el motor se detiene y se encienden las luces indicadoras correspondiente a la falla que se haya originado.

Para parar la acción de cierre de la compuerta, basta con presionar el “pulsador de parar”.

### 2.3 Diagnóstico del sistema de control de la compuerta plana del desarenador

Con el propósito de modernizar el actual sistema, el primer paso fue inspeccionar el estado físico de cada uno de los componentes y sistemas mediante la supervisión del personal técnico de las áreas eléctrica y mecánica de tal manera que se clasificó los elementos en dos apartados: buen estado y mal estado, los elementos en mal estado serán aquellos que serán reemplazados.

**Tabla 6**

*Estado de los elementos que conforman el sist. de control de la compuerta plana*

<b>Elemento</b>	<b>Buen estado</b>	<b>Mal Estado</b>
Finales de carrera		X
Motor de izaje	X	
Bomba de lubricación	X	
Freno electromagnético	X	
Tablero de control principal		X
Tablero local de la bomba		X
Tablero local del freno	X	

<b>Elemento</b>	<b>Buen estado</b>	<b>Mal Estado</b>
Transmisor de posición		X
Sensores de presión		X
Tubería de conductores		X
Conductores		X
Indicador de posición		X
Sistema de izaje	X	
Acometida	X	

En lo que respecta a las cajas reductoras no existen novedades debido a su correcto mantenimiento por el área mecánica la cual determinó que pueden seguir operando con normalidad.

En general todos los elementos de control del sistema eléctrico serán reemplazados junto a sus conductores y mangueras de acuerdo con la disponibilidad de materiales en bodega.

#### **2.4 Propuesta de modernización**

La propuesta de modernización es el resultado del análisis y revisión de los equipos y elementos que forman este sistema y mediante el respectivo acuerdo entre las partes involucradas: operación, ingeniería, mantenimiento eléctrico/electrónico y mecánico de CELEC-EP Unidad de Negocio Hidroagoyán se realizó una encuesta con el propósito de ampliar las capacidades y características de la automatización de la compuerta plana del desarenador que permitió recopilar información, puntos de vista, sugerencias y cambios que se pueden integrar a este proyecto.

Esta encuesta fue aplicada a las tres áreas que se relacionan directamente con este proceso:

- Área de mantenimiento eléctrico
- Área de mantenimiento mecánico y,
- Área de operación

De cada área se seleccionó a tres personas dando un total de nueve personas encuestadas de las cuales una es supervisor y dos técnicos en cada una de estas.

El informe de análisis de la encuesta aprobado por jefe de mantenimiento eléctrico y por el tutor empresarial del presente proyecto de titulación; dicho documento se encuentra adjunto en el **ANEXO 8.1**.

El informe fue analizado por el departamento de mantenimiento eléctrico/electrónico y se aprobaron los siguientes ítems:

- Paro de emergencia
- Parámetros del motor en la HMI
- Información para gestión de mantenimiento

El apartado 2.2 describe el funcionamiento original del sistema de apertura y cierre de la compuerta plana, en este diseño no se consideró un paro de emergencia para esta operación, razón por la cual, la mayoría de las personas encuestados sugirieron que se lo añadiera.

Por otro lado, el personal de operación sugirió la opción de colocar en el HMI los parámetros eléctricos del motor tales como: corrientes, voltajes, torque, consumo de energía y potencia que también serán utilizados para planificar acciones de mantenimiento en el bloque 13.



#### **2.4.1 Modernización del tablero de control principal**

Se propone diseñar un tablero completamente nuevo para el sistema de control de la compuerta plana incorporando equipos y dispositivos con prestaciones tecnológicas actuales. El uso de un controlador lógico programable (PLC por sus siglas en inglés) reemplazará el sistema inflexible cableado permitiendo una cantidad notable de mejoras en el control y seguridad. Además se plantea el uso de un convertidor de baja potencia (comúnmente conocido como variador de frecuencia) que trabajará a la par con el PLC para comandar al motor de izaje; el uso del convertidor abre un abanico de opciones de modernización ya que permite conocer en tiempo real el estado del motor mediante la lectura de sus parámetros como: corrientes, voltajes, consumo, etc.

El tablero propuesto tiene la capacidad de reemplazar al tablero local de la bomba de lubricación ya que dispondrá de una menor cantidad de elementos que permiten realizar más acciones de control.

#### **2.4.2 Modernización del sistema de instrumentación**

La propuesta incluye el cambio de los instrumentos de medición involucrados en este proceso los cuales son:

El transmisor de posición por un encoder electrónico que aumentará considerablemente la precisión en la medición de la variable desplazamiento de la compuerta.

Los sensores de presión que actualmente no funcionan por unos adecuados para realizar esta medición de tal manera que se alargue la vida útil de los elementos mecánicos utilizados en el proceso de control de la compuerta plana y, los fines de carrera que se encuentran afectados por el paso del tiempo y las condiciones climáticas por unos más robustos.

### **2.4.3 Propuesta de un sistema de comunicación**

Además se plantea un diseño de red de comunicación que permita obtener una alta disponibilidad de monitoreo y control del estado de las variables del proceso en tiempo real mediante el uso de protocolos industriales entre los elementos de control involucrados. Este sistema será capaz de enlazarse con el sistema SCADA de la oficina de operación de tal manera que se incluyan las variables de este proceso en dicho sistema y se brinden las facilidades de monitoreo, control y adquisición al personal de operación.

### **2.4.4 Mejoras a obtener con la modernización del sistema**

Con estos cambios se mejorará sustancialmente la seguridad del personal involucrado en las acciones de operación y mantenimiento, además permitirá nuevas ventajas y opciones de control y monitoreo para los operadores de la central.

El nuevo diseño permitirá:

- Habilitar el funcionamiento de lectura de los sensores de presión del desarenador
- Implementar códigos de programación flexibles que permitan aumentar las acciones de control
- Añadir nuevos mecanismos de mando: local y a distancia mediante el panel táctil del sistema SCADA en la oficina de operación
- Monitorear en tiempo real el estado de las variables de proceso: desplazamiento de la compuerta, estados y valores de presión
- Aumentar la seguridad del personal mediante la validación de los equipos de medición y control de tal manera que se reduzca la probabilidad de riesgo en la operación del sistema.

- Posición de la compuerta en metros a lo largo de todo su recorrido.
- Alarmas de cable tenso y cable flojo (falla en el sistema de izaje).
- Alarma de fallo en el motor.
- Parámetros eléctricos del motor
- Falla de alimentación
- Falla en bomba de lubricación y freno electromagnético

## Capítulo III

### **3. Diseño de la automatización de la operación de la compuerta plana del desarenador de la represa de la central hidroeléctrica Agoyán**

El presente capítulo se enfoca en detallar de manera precisa la metodología utilizada en el diseño de la automatización de la operación de la compuerta plana del desarenador y su monitorización por medio de la interfaz humano – máquina (HMI por sus siglas en inglés) ubicada en la oficina de operación. Previamente se realizó el levantamiento de la información técnica de: los planos eléctricos, el tablero de control antiguo, el desarrollo del diagrama de bloques del proceso, diseño de planos del nuevo tablero de control, diseño de nuevos planos eléctricos, electrónicos y de potencia, plano de comunicaciones y la lógica de programación del controlador.

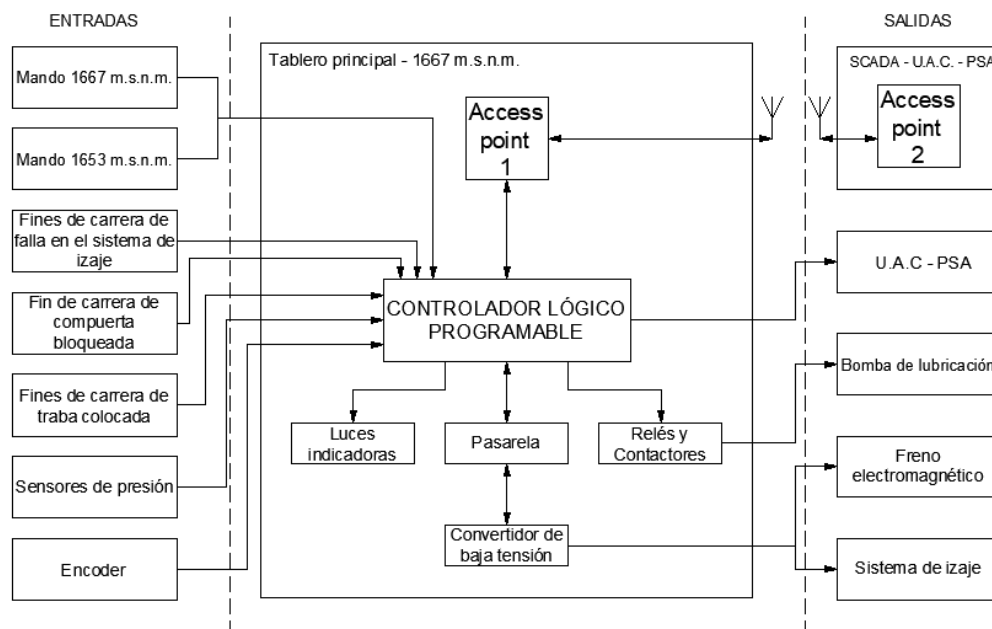
#### **3.1 Diagrama de bloques del proceso**

Mediante esta metodología se busca representar de manera gráfica con el uso de bloques, el modo de operación del sistema automático de la compuerta plana del desarenador expresando la relación entre las entradas y salidas de los elementos que componen el sistema.

El siguiente gráfico explica mediante el uso de bloques el comportamiento de los elementos del sistema tales como: botones de mando, fines de carrera, sensores de presión, conder, actuadores, y los sistemas de adquisición asociados.

Figura 23

Diagrama de bloques del proceso



Por el lazo izquierdo tenemos las entradas en las cuales se tiene: los botones del mando en la puerta del tablero principal a 1667 m.s.n.m. trabajando en paralelo con las entradas del tablero a 1653 m.s.n.m. (las cuales quedan definidas en el programa y están listas para una futura implementación), los fines de carrera correspondientes al sistema electromecánico de detección de fallas de izaje, los fines de carrera de compuerta bloqueada y traba colocada, los sensores de presión y el encoder.

En el tablero de control principal destacan los elementos:

- PLC1: es el elemento de control principal formado por un PLC Siemens S7-1200 1214C dc/dc/dc junto a un módulo de 16 entradas y 16 salidas a relé SM 1223 RLY y un módulo de entradas analógicas SM1231 para los sensores de presión.

- TR1: corresponde a una pasarela de Modbus TCP/IP a Modbus RTU en RS-485 la cual permite comunicar al PLC y al convertidor de baja tensión.
- CBT1: es el convertidor de baja tensión Siemens Sinamics G120C USS/MB encargado de gobernar al motor de izaje.
- AP1: es un Access point Siemens SCALANCE W761-1 el cual permite incluir una antena Siemens ANT792-6MN para establecer el enlace de comunicación WLAN entre el tablero de control principal a 1667 m.s.n.m. y el sistema SCADA en la oficina de operación.
- Relés y contactores: sustituyen los tableros locales de la bomba y el freno electromagnético
- Luces indicadoras: para mostrar el estado de la compuerta al personal que opere este sistema desde el tablero principal a 1667 m.s.n.m.

En el lado derecho tenemos las salidas:

- Sistema SCADA UAC-PSA en la oficina de operación: Este sistema posee otra antena ANT7962-6MN en conjunto con un AP2 de iguales características que el AP1; este recibe los datos de los procesos integrados al sistema SCADA y los muestra en un panel Siemens TP1200 confort en el cual se incluirá la Interfaz Humano – Máquina correspondiente a la compuerta plana del desarenador.
- UAC – PSA de la oficina de operación: Es el sistema original denominado Unidad de Adquisición y Control que dispone la oficina de operación, en este se recibe las señales de: compuerta abierta, cerrada, bloqueada, parada, falla en el sistema de izaje y falla por sobrecarga del motor.

- Bomba de lubricación: del tablero principal sale directamente el voltaje necesario para activar la bomba de lubricación mediante el uso de un relé auxiliar, un contactor y un transformador 480/120 VAC de 550 VA.
- Freno electromagnético: mediante el uso de un relé auxiliar con un contactor permiten activar el tablero local de este actuador.
- Sistema de izaje: entendiéndose que el motor de izaje es su componente activo y que es activado por el PLC1 trabajando en conjunto con CBT1.

### **3.2 Descripción de los elementos**

El punto de partida para el desarrollo del presente proyecto son los planos eléctricos originales, estos describen de manera gráfica y ordenada las conexiones de los elementos con su respectiva ubicación en los circuitos de mando y potencia, de tal manera que brindan una mejor comprensión del modo de operación de los sensores, actuadores y elementos de mando, además permiten analizar y repotenciar el sistema actual con nuevas características.

A continuación se realizó el levantamiento técnico de la información del sistema de apertura y cierre de la compuerta plana del desarenador en la represa Agoyán en el cual se evaluaron los componentes eléctricos existentes por parte del personal eléctrico/electrónico de Hidroagoyán y se concluyó que se incorporarán nuevos equipos eléctricos para el desarrollo del proyecto.

#### **3.2.1 Actuadores**

La compuerta plana del desarenador cuenta con tres actuadores que fueron evaluados por los departamentos correspondientes como indica la Tabla 6 y que son objeto de mantenimientos mensuales, trimestrales, semestrales y anuales, es decir, se encuentran en un estado adecuado para seguir operado.

### 3.2.2 Elementos de control

El desarrollo del presente proyecto de titulación está basado en un estudio previo por parte de la empresa en la cual ya se determinaron los componentes a utilizar para la modernización de los sistemas de control existentes, para el caso de la compuerta plana del desarenador se asignaron los siguientes elementos de eléctricos de control:

- Tablero eléctrico ACROCEL IP65
- PLC de la marca Siemens modelo S7-1200 1214C DC/DC/DC
- Convertidor de baja tensión Sinamics G120C USS/MB
- Contactor Telemecanique LC1 D25 10
- Relé auxiliar ABB CR-P024DC2
- Pulsadores STECK S-LPL42
- Luces indicadoras Telemecanique ZBV-6

Todos los elementos citados anteriormente se encontraban en el stock de bodega de la central hidroeléctrica Agoyán.

#### 3.2.2.1 Tablero eléctrico

**Tabla 7**

*Características del tablero eléctrico*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Altura	1100 [mm]
Ancho	550 [mm]
Profundidad	350 [mm]
Grado de protección	IP 65
Espesor de lámina	2 [mm]



El tablero eléctrico obedece a las sugerencias extraídas de la encuesta realizada al personal que se relaciona directamente con este proceso.

### 3.2.2.2 PLC Siemens 1214C S7-1200 DC/DC/DC

Para la selección de este controlador se tomó en cuenta la cantidad de entradas (analógicas y digitales) y salidas que se obtuvieron de la etapa de levantamiento de información de la que se obtuvo:

- 21 entradas digitales
- 2 canales de entradas analógicas de 4 – 20 mA
- 15 salidas digitales
- 1 salida analógica

El detalle de las entradas y salidas del proceso se encuentra en el ANEXO 8.2 - Tabla de asignación de variables.

En base a estos requerimientos y teniendo en cuenta el stock de bodega de la empresa se seleccionó el PLC Siemens S7-1200 1214C DC/DC/DC con dos módulos adicionales que se explican más adelante.

**Tabla 8**

*Características técnicas del controlador S7-1200 1214C DC/DC/DC*

Parámetro	Valor
Serie	6ES7214-1AG40-0XB0
Alimentación	24 [VDC]
Entradas digitales	14
Entradas analógicas	2 (0 a 10 [V])

Parámetro	Valor
Resolución	10 bits
Salidas digitales	10
Interfaz de comunicación	Ethernet

Mediante la Tabla 8 se puede contrastar que únicamente el PLC no es suficiente para solventar la cantidad de entradas y salidas detalladas al inicio de este apartado, razón por la cual se verifica la necesidad de módulos de ampliación.

Este diseño optó por utilizar dos componentes adicionales: el primero es un módulo de entradas analógicas SM1231 AI – 2314HD30-0XB0 compatible con el tipo de sensores de presión a utilizar; y el segundo es un módulo de salidas a relé SM 1223 RLY utilizado para la comunicación de las señales entregadas al sistema UAC de la oficina de operación y para accionar las luces indicadoras con voltaje de alimentación 110VAC.

### Tabla 9

*Características técnicas del módulo de entradas analógicas SM 1231 AI*

Parámetro	Valor
Serie	6ES7231-4HD30-0XB0
Alimentación	24 [VDC]
Entradas analógicas	4
Rango de entrada	$\pm 10, \pm 5, \pm 2.5$ $4 - 20 [mA]$ Configurable
Resolución	12 bits

**Tabla 10***Características técnicas del módulo SM 1223 RLY*

Parámetro	Valor
Serie	6ES7223-1PL32-0XB0
Alimentación	20.4-28.8 [VDC]
Entradas digitales	16
Salidas digitales	16
Voltaje de salida	5 a 30 [VDC]
	5 a 250 [VAC]
	Configurable
Corriente de salida	2 [A] máximo

**Figura 24***PLC Siemens S7-1200 1214C DC/DC/DC*

*Nota.* El gráfico muestra el controlador Siemens S7-1200 1214C DC/DC/DC el cual gobernará las acciones de control del sistema automático de operación de la compuerta plana del desarenador. Tomado de *Hoja de datos S7-1200 1214C DC/DC/DC* (p.1), por Siemens, 2015.

**Figura 25**

*Módulo SM 1231 AI (izq.) y módulo SM 1223 RLY (der.)*



*Nota.* Módulos adicionales para solventar las necesidades del proyecto. Tomado de *Hoja de datos SM 1231 AI* (p.1), por Siemens, 2016 y de *Hoja de datos SM 1223 RLY* (p.1), por Siemens, 2016.

El controlador junto a sus dos módulos será el encargado de gobernar las acciones de control en el proceso de automatización de la operación de la compuerta plana del desarenador con una versión de Firmware V4.0.0.

Este PLC trabaja de la mano con un entorno de programación amigable con el usuario llamado TIA Portal en su versión 14; este permite desarrollar algoritmos en distintos tipos de lenguajes de programación que obedecen a la norma IEC 61131. (Villacrés, 2017)

Por razones de seguridad y por sugerencia del personal técnico de la empresa la salida de 24 VDC del convertidor de baja tensión alimentará a todos los elementos que requieren de este voltaje, debido a que existe la posibilidad de cortes impredecibles de energía que afecten al

proceso y mediante esta conexión se ganarán algunos segundos de autonomía por parte del controlador.

Adicionalmente, el convertidor de baja tensión G120C dispone de una salida analógica la misma que será escrita mediante comunicación Modbus por el controlador, para indicar el valor en metros de la posición de la compuerta plana del desarenador.

### 3.2.2.3 Convertidor de baja tensión Sinamics G120C USS/MB

El dimensionamiento del convertidor de baja tensión se lo realizó en base a los parámetros del motor Siemens de la Tabla 5. Teniendo en cuenta el stock de bodega de la empresa se escogió el dispositivo que más se ajusta a dichos parámetros siendo el modelo Sinamics G120C USS/MB con las siguientes características:

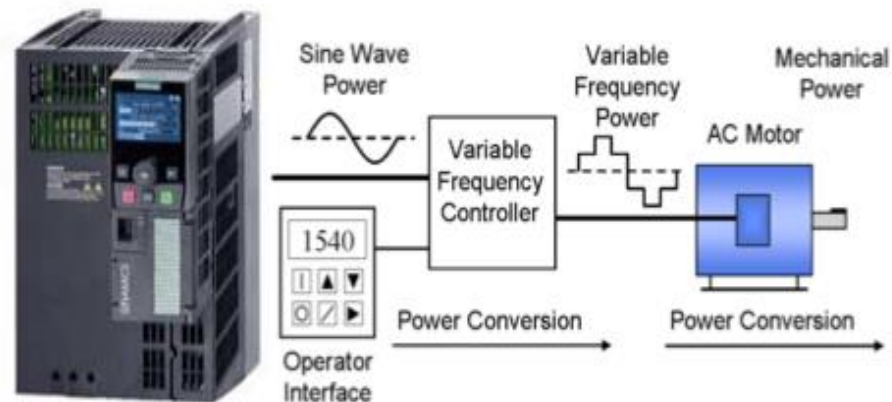
**Tabla 11**

*Características técnicas del convertidor de baja tensión Sinamics G120C USS/MB*

Parámetro	Valor
Serie	6SL3210-1KE21-3UB1
Alimentación	380-480 [VAC]
Corriente nominal	12.5 [A]
Corriente máxima	15.5 [A]
Potencia	5.5 [Kw]
Frecuencia entrada	47 – 63 [Hz]
Frecuencia de salida	0-550 [Hz]
Comunicación	USS/Modbus RS-485
Versión	4.7

**Figura 26**

*Diagrama de bloques del convertidor de baja tensión*



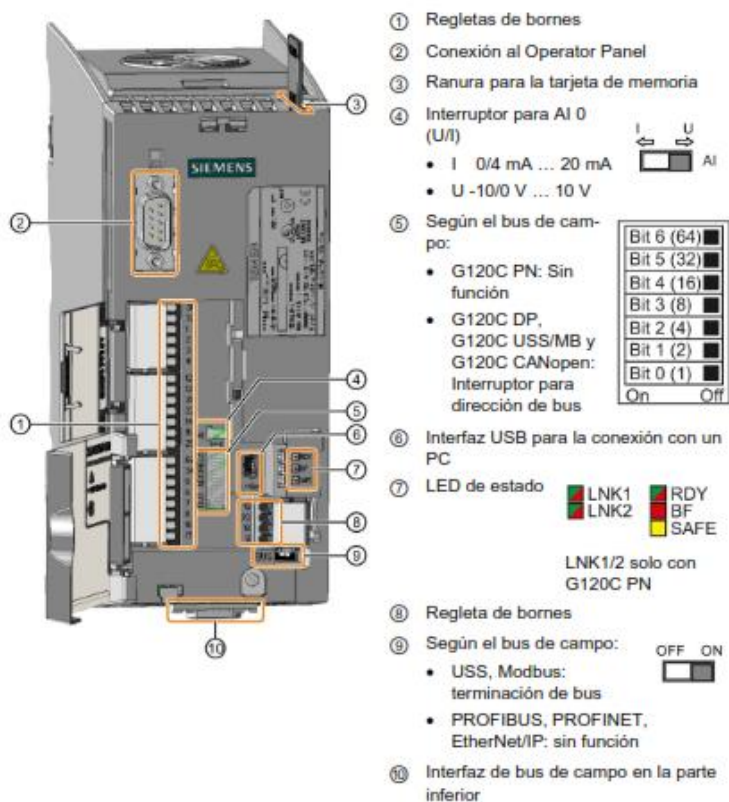
*Nota.* La imagen muestra el diagrama de bloques que resume el funcionamiento del convertidor de baja tensión. Tomado de *Desarrollo e Implementación de una Interfaz en el Software Labview NI, que Permita el Accionamiento, Monitoreo y la Puesta en Marcha de los Variadores G120C a través del Protocolo de Comunicación Modbus RTU* (p.46), por K. Goya, 2015.

El convertidor de baja tensión sirve para controlar y monitorear la velocidad de rotación y los parámetros propios de un motor de corriente alterna como: corriente, torque, consumo, rampa de aceleración, rampa de deceleración, potencia, energía consumida, entre otros; mediante la adecuada configuración de estos parámetros y en base al diagrama de bloques de la

Figura **26** se puede resumir su funcionamiento.

Figura 27

## Interfaces del convertidor de baja tensión G120C USS/MB



*Nota.* La gráfica muestra la distribución de las interfaces que conforman el convertidor de baja tensión. Tomado de: *Convertidores de baja tensión SINAMICS G120C* (p.11), por Siemens, 2015.

Adicionalmente este dispositivo cuenta con un panel de operador BOP-2 (Basic Operator Panel) diseñado para mejorar las prestaciones de los convertidores de baja tensión de la gama G120C mediante una interfaz RS-232.

**Figura 28**

Panel de operador del convertidor de baja potencia BOP-2



*Nota.* El BOP-2 permite monitorear el estado del convertidor de baja potencia y del motor conectado. Tomado de *Basic Operator Panel 2* (p.3), por Siemens, 2016.

De la

Figura **28** destacan los siguientes puntos:

1. Pestillo de liberación
2. Pantalla LCD
3. Rebaje tornillo montaje puerta
4. Interfaz con el convertidor
5. Placa de características del producto

Mediante el uso de la pantalla LCD en conjunto con los botones el panel básico del operador permite al usuario realizar acciones de control, configuración de parámetros, monitoreo, diagnóstico, entre otras tareas; en el presente caso el BOP-2 será únicamente utilizado para contrastar el estado del convertidor. (Siemens, Basic Operator Panel 2, 2016).



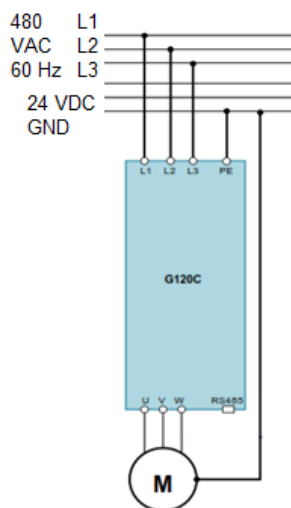
El uso de los convertidores se ve justificado en acciones de control industriales que requieran monitoreo de los parámetros del motor, así como también del ahorro de energía que estos proporcionan mediante el uso de rampas de arranque que eliminan las corrientes pico de arranque en los motores.

Entre las principales ventajas del uso de convertidores de baja tensión tenemos:

- Arranques y paradas más suaves
- Control de la aceleración
- Variación de la velocidad de operación
- Permitir el posicionamiento con alta precisión
- Control del torque del motor mediante la corriente.

**Figura 29**

*Conexión eléctrica del convertidor G120C USS/MB*



Las conexiones eléctricas que se muestran en la

Figura 29 deben realizarse en el siguiente orden: primero la conexión del motor hacia el convertidor en los terminales U, V y W, en segundo lugar se debe conectar el convertidor a la red de 480 VAC en los terminales L1, L2 y L3.

Uno de los puntos más importantes en la instalación de un convertidor es la puesta a tierra, razón por la cual debe ser conectada del lado del motor mediante el terminal PE y por el lado de la red ya que si no se efectúa una puesta a tierra válida existe la posibilidad de situaciones de peligro con consecuencias letales.

Basado en el manual del convertidor G120C deben esperarse al menos 5 minutos después de la desconexión de la alimentación de la red 480 VAC para que el equipo pueda descargarse y sea segura su manipulación.

#### 3.2.2.4 Contactor Telemecanique LC1 D2510

**Tabla 12**

*Características técnicas del contactor LC1 D2510*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Corriente máx.	40 [A]
Voltaje de la bobina	120 [VAC]
Número de contactos	3
Contacos aux.	1 <i>NO</i>

En la solución propuesta se utilizan dos contactores LC1 D2510 para activar y desactivar la bomba de lubricación y el freno electromagnético. El uso de estos elementos en conjunto con sus protecciones permite reemplazar los antiguos tableros locales.

**Figura 30**

contactor telemecanique LC1-D2510



*Nota. El gráfico muestra el contactor utilizado para controlar la bomba de lubricación y el freno electromagnético. Tomado de Datasheet - LC1-D2510 (p.3), por Telemecanique, 2004.*

### 3.2.2.5 Relé auxiliar ABB CR-P024DC2

**Tabla 13**

*Características técnicas del relé auxiliar ABB CR-P024DC2*

Parámetro	Valor
Corriente máx.	16 [A]
Voltaje de la bobina	24 [VDC]
Número de contactos	2

**Figura 31**

Relé auxiliar ABB CR-P024DC2



*Nota. El gráfico muestra el relé auxiliar junto a socket de conexión para riel DIN. Tomado de Pcb relays, optocouplers and accessories (p.6), por ABB, 2017.*

Mediante el trabajo conjunto del relé auxiliar accionado por las salidas a 24 VDC del PLC se puede accionar el contactor que posee bobinas de 120 VAC para activar la bomba de lubricación y el freno electromagnético mediante la lógica de control programada en el PLC.

### 3.2.2.6 Pulsadores STECK S-LPL42

Los pulsadores utilizados corresponden a la marca STECK serie S-LPL42 adecuados para tableros de control industriales y de tipo modular que permiten colocar hasta dos contactos en sus bornes.

#### Figura 32

*Contactos STECK S-LPL42*



*Nota.* Los contactos cumplen con la norma IEC 60947.5.1 y permiten una corriente de hasta 6 [A]. Tomado de *Catálogo de productos* (p.5), por STECK, 2018.

El tablero de control principal consta de cuatro pulsadores de este tipo los cuales sirven para: abrir compuerta, parar compuerta, cerrar compuerta y acusar fallo. Adicionalmente se colocan estos mismos contactos a dos selectores de tres posiciones los cuales permiten alternar el mando entre: mando local, mando a distancia o mando desactivado para realizar acciones de mantenimiento.

### 3.2.2.7 Luces indicadoras Telemecanique ZBV-6

Las luces piloto utilizadas corresponden a la marca Telemecanique serie ZBV-6 cuyo voltaje de alimentación es de 120 VAC.

#### Figura 33

*Luz indicadora Telemecanique ZBV-6*



Se utilizaron luces para representar los estados de la compuerta: abierta, abriendo, cerrada, cerrando, parada y bloqueada. Además para indicar el estado de equilibrio de presiones y cuando exista algún tipo de falla.

### 3.2.3 Elementos de protección

Son dispositivos encargados de salvaguardar la integridad de los trabajadores y de los equipos involucrados en el proceso de control y potencia. A continuación se detallan los elementos de protección utilizados:

#### 3.2.3.1 Relé de monitoreo SIRIUS 3UG4615

Este tipo de relés sirven para monitorear magnitudes eléctricas que reflejan la operatividad de una instalación. Se usan para detectar fallas repentinas como también para degradaciones progresivas que pueden recomendar un mantenimiento.

**Tabla 14***Características técnicas del relé de monitoreo 3UG4615*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Serie	3UG4615-2CR20
Alimentación	160-690 [VAC]
Tiempo ajustable de retardo	0.1 a 20 [seg.]
Precisión de ajuste	0.2 %
Corriente del relé de salida	3 [A] para 400 [VAC] 1 [A] para 24 [VDC]

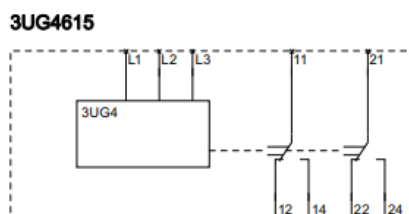
Dispone de salidas a relé que permiten la desconexión directa de las partes de la instalación afectadas, así como también pueden utilizarse para activar alarmas, por ejemplo una luz indicadora.

Además poseen tiempos de retardo ajustables para reaccionar de manera flexible ante fallas de corta duración como caídas de tensión o cambios en la carga. A continuación se citan algunas de sus funciones:

- Detectar la secuencia de fases
- Pérdida de fase o neutro
- Desbalance de fases
- Rebase por exceso o por defecto de los límites de tensión
- Rebase por exceso o por defecto de los límites de corriente
- Rebase por exceso o por defecto de los límites de  $\cos \phi$ , entre otros.

**Figura 34**

*Diagrama de conexión del relé de monitoreo 3UG4615*



*Nota.* El gráfico muestra el esquema de conexión general del relé de monitoreo. Tomado de *Aparatos de vigilancia y de mando* (p.21), por Siemens, 2013.

Este dispositivo está incluido en el sistema con el propósito de detectar una falla en la alimentación del circuito de potencia, de tal manera que una de sus salidas a relé se conecta al controlador como se muestra en el respectivo plano eléctrico con el propósito de comunicar al sistema de control de una falla de alimentación y este pueda salvaguardar la información y emitir una alarma hacia la oficina de operación.

La configuración, montaje y demás parámetros de este dispositivo se encuentra en su manual de operaciones referenciado en el apartado bibliográfico como: (Siemens, *Aparatos de vigilancia y de mando*, 2013).

### **3.2.3.2 Disyuntor Siemens 3RV2021-4BA10**

Para determinar el valor de ajuste de este elemento se comprueba la corriente máxima del convertidor de baja tensión ya que los tres polos del disyuntor se conectan directamente con este dispositivo. En base a la

Tabla **11** que indica que la corriente máxima es de 15.5 [A] se ajusta el valor a 15 [A] asegurar la protección del convertidor de baja tensión CBT1.

**Tabla 15**

*Características técnicas del disyuntor 3RV2021-4BA10*

Parámetro	Valor
Número de polos	3
Corriente de ruptura	Ajustable de 13-20 [A]
Voltaje trifásico máximo	690 [VAC]
Frecuencia	50-60 [Hz]
Corriente máxima	20 [A]

**Figura 35**

*Disyuntor trifásico Siemens 3RV2021-4BA10*



*Nota.* El gráfico muestra el disyuntor general del tablero de control principal ajustado a un valor de 15 [A]. Tomado de *Hoja de datos 3RV2021-4AB10* (p.2), por Siemens, 2016.



### 3.2.3.3 Disyuntor ABB S202C2

**Tabla 16**

*Características técnicas del disyuntor ABB S202C2*

Parámetro	Valor
Número de polos	2
Corriente de ruptura	2 [A]
Voltaje soportado	480Y/277 [VAC]

**Figura 36**

*Disyuntor ABB S202C2*



*Nota.* La imagen muestra el disyuntor ABB S202C2 utilizado como protección del circuito de fuerza para la activación del freno electromagnético. Tomado de *Miniature circuit breakers* (p.3), por ABB, 2010.

### 3.2.3.4 Fusibles y portafusibles

Los fusibles serán utilizados como medida de protección seccional para los circuitos de: control, comunicación y para las fases del transformador de 480/220 VAC utilizado para iluminación y calefacción del tablero.

**Tabla 17**

*Características técnicas de los portafusibles CAMSCO*

Parámetro	Valor
Serie	RT18-32A
Voltaje soportado	Hasta 500 [VAC]
Corriente soportada	Hasta 32 [A]
Tipo de fusible	RT14-20

**Figura 37**

*Portafusibles y fusibles CAMSCO*



*Nota.* La gráfica muestra los porta fusibles y el tipo de fusibles que pueden almacenar. Tomado de *RT18-32A Fuse Base* (p.3), por CAMSCO, 2020.

### **3.2.4 Elementos de comunicación**

En este apartado se describen las características técnicas de los elementos utilizados para establecer los enlaces de comunicación entre los elementos de control.

#### **3.2.4.1 Pasarela USR-TCP232-410S**

Este es un dispositivo de tipo servidor serial que es sirve para establecer una comunicación bidireccional transparente desde un dispositivo con interfaz serial a uno con interfaz ethernet.

Para este caso es utilizado para comunicar al PLC con el convertidor ya que disponen de interfaces de comunicación diferentes.

**Tabla 18**

*Características técnicas de la pasarela USR-TCP232-410S*

Parámetro	Valor
Voltaje de alimentación	5-36 [VDC]
Interfaces de comunicación	1 Ethernet 1 RS-232 1 RS-485
Protocolos de comunicación	Modbus TCP/IP Modbus RTU

El uso de este dispositivo de comunicación transparente permite establecer la comunicación Modbus entre el PLC y el convertidor de baja potencia sirviendo como conversor de Modbus TCP/IP a Modbus RTU respectivamente.

**Figura 38**

*Pasarela USR – TCP232-410S*



### 3.2.4.2 Access point Scalance w761-1

Este dispositivo posee una interfaz ethernet que permite conectar una antena mediante su interfaz R1 A1 para transmitir datos en una red WLAN desde el tablero principal de operación en la cota de 1667 m.s.n.m. hasta la oficina de operación.

**Tabla 19**

*Características técnicas del access point SCALANCE W761-1*

Parámetro	Valor
Voltaje de alimentación	19.2...28.8 [VDC]
Interfases de comunicación	1 Ethernet 1 R1 A1
Velocidad de transmisión	Ethernet: 10/100 [Mbps] Wireless: 1 ... 150 [Mbps]
Frecuencia de empleo	2.4 y 5 [GHz]

**Figura 39**

*Access point SCALANCE W761-1*



*Nota.* El gráfico muestra el Access point W761-1 que conecta el sistema de comunicación de medio alámbrico mediante ethernet con el sistema inalámbrico mediante una antena. Tomado de *Industrial Wireless LAN SCALANCE W760-W720* (p-2), por Siemens, 2015.

### 3.2.4.3 Antena Siemens ANT792-6MN

Esta antena trabaja en conjunto con el Access point w761-1 y permite establecer el enlace de comunicación al sistema SCADA ubicado en la oficina de operación

**Tabla 20**

*Características técnicas de la antena ANT792-6MN*

Parámetro	Valor
Tipo de red	Wlan
Frecuencia de empleo	2.4 ... 2.5 [Ghz]
Ganancia	6 [dB]
Característica de radiación	Onmidireccional
Impedancia	50 [Ohm]

**Figura 40**

*Antena ANT792-6MN*



*Nota.* El gráfico muestra la antena ANT792-6MN que se conecta al Access point Scalance W761-1. Tomado de *Hoja de datos ANT792-6MN* (p.3), por Siemens, 2020.

### 3.2.4.4 Switch Siemens CSM 1277

Este dispositivo permite enlazar los componentes de la red: controlador, convertidor de baja tensión, Access point y la pasarela mediante ethernet industrial. Su construcción es robusta capaces de soportar impulsos electromagnéticos que pueden ser producidas por rayos, o por la conexión de grandes cargas inductivas.

**Tabla 21**

*Características técnicas del switch CSM 1277*

Parámetro	Valor
Voltaje de alimentación	24 [VDC]
Número puertos ethernet	4
Tasa de transferencia	100 [Mbit/s]
Corriente de consumo	0.07 [A]

**Figura 41**

*Switch de comunicación Siemens Sinamics CSM 1277*



*Nota.* El gráfico muestra el switch de comunicación ethernet para interconectar los dispositivos de red. Tomado de *Instrucciones de servicio S7-1200 Compact Switch Module CSM 1277* (p.8), por Siemens, 2010).

### 3.2.5 Elementos de instrumentación

El sistema de instrumentación está conformado por los elementos transductores que permitirán el monitoreo y medición de las variables inmersas en el entorno de la compuerta plana del desarenador. Estos son:

#### 3.2.5.1 Encoder incremental SICK DFS60B-S4PA10000

Este dispositivo es utilizado para la medición de la posición de la compuerta plana en reemplazo al transmisor de posición original.

**Tabla 22**

*Características técnicas del encoder incremental SICK DFS60B-S4PA10000*

Parámetro	Valor
Interfaz de comunicación	Incremental
Número de canales de señal	6 canales
Voltaje de alimentación	4.5 a 32 [VDC]
Voltaje de salida	TTL/HTL
Corriente de servicio	40 [mA]
Pulsos por revolución	Hasta 10000 pulsos configurables

**Figura 42**

*Encoder incremental SICK DFS60B-S4PA1000*

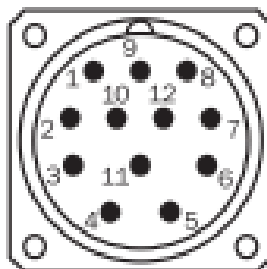


*Nota.* El gráfico muestra el encoder incremental sick DFS60B-S4PA10000 que será acoplado al eje de medición del sistema de izaje. Tomado de *Hoja de datos DFS60B-S4PA10000* (p.16), por SICK, 2020.

Este dispositivo posee un conector M23 de 12 pines como se muestra:

### Figura 43

*Conector m23 del encoder SICK DFS60B-S4PA10000*



*Nota.* La figura muestra la vista frontal del conector M23 utilizado para conectarse al encoder. Tomado de *Hoja de datos DFS60B-S4PA10000* (p.21), por SICK, 2020.

Los pines del conector M23 utilizados para la conexión del encoder incremental son los siguientes:

### Tabla 23

*Conexión del encoder DFS60B-S4PA10000*

# de pin	Valor
5	Canal A
8	Canal B
10	GND
12	+ 24 VDC



### 3.2.5.2 Sensores de presión Siemens Sitrans P220

Para el dimensionamiento de los sensores de presión se utilizó la fórmula que determina la presión hidrostática ejercida por la columna de líquido en el embalse:

$$P = \delta * g * h$$

Donde:

P: Presión hidrostática

$\delta$ : Densidad de fluido

g: aceleración de la gravedad

h: altura de la superficie del fluido

Para determinar la altura se tiene en cuenta que la cota de ubicación de los sensores de presión es de 1628 m.s.n.m. y el nivel máximo del embalse es 1651 m.s.n.m., entonces:  $h = 23m$ .

Este cálculo toma en consideración que la densidad de fluido  $1000 \text{ kg/m}^3$  y la aceleración de la gravedad es de  $9.8 \text{ m/s}^2$ . Resolviendo la ecuación tenemos que  $P = 225400 \text{ [Pa]}$  o  $2.254 \text{ [Bar]}$ .

Teniendo en cuenta el stock de la empresa se seleccionó el sensor de presión Siemens Sitrans P220 7MF1567-3BE00-1GA1 que presenta las siguientes características:

**Tabla 24**

*Características técnicas del sensor de presión Siemens SITRANS P220*

Parámetro	Valor
Serie	7MF1567-3BE00-1GA1
Voltaje de alimentación	7 – 33 [VDC]

Parámetro	Valor
Corriente de salida	4 – 20 [mA]
Rango de medida	0 – 4 [bar]
Precisión	0.01 [bar]
Grado de protección	IP 67

**Figura 44**

*Sensor de presión Siemens SITRANS P220*



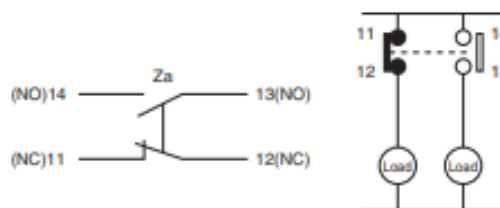
*Nota.* La gráfica muestra el sensor de presión utilizado para determinar la presión aguas arriba y aguas debajo de la compuerta plana del desarenador. Tomado de *Transmisor de presión SITRANS P220 (7MF1567)* (p.7), por Siemens, 2011.

### 3.2.5.3 Fines de carrera Omron WLCA2-LS

Los fines de carrera Omron WLCA2-LS están pensados para utilizarse en la intemperie debido a sus características constructivas de carácter robusto. Poseen dos contactos: un normalmente abierto y otro normalmente cerrado como se muestra a continuación:

**Figura 45**

*Diagrama de conexión eléctrica del WLCA2-LS*



*Nota.* La gráfica muestra el diagrama de conexión de los contactos de los fines de carrera.

Tomado de *Two-circuit Limit Switch* (p.41), por OMRON, 2017.

**Figura 46**

*Fin De Carrera OMRON WLCA2-LS*



*Nota.* El gráfico muestra la apariencia física de los fines de carrera utilizados en el control de la compuerta plana del desarenador. Tomado de *Two-circuit Limit Switch* (p.41), por OMRON, 2017.

Estos dispositivos están compuestos por una caja de fundición de aluminio donde se aloja un juego de contactos inversores (1 NO y 1 NC) de salto activado por un conjunto de cabezal y

palanca. Además poseen juntas de goma sintética en los ejes, cabezales y tapas de tal manera que los hacen resistentes a polvo y goteos de agua y aceite.

Estos elementos corresponden a los fines de carrera S14 - S24 (fines de carrera de traba colocada), S35 (fin de carrera de compuerta bloqueada), S331 - S332 (fines de carrera de cable tenso) y S321-S322 (fin de carrera de cable flojo).

#### 3.2.5.4 Indicador de posición Endress+Hauser RIA45

El indicador digital de posición posee una entrada analógica de 4 a 20 mA por la cual ingresa el valor de la posición de la compuerta plana del desarenador y se muestra en su display.

#### Figura 47

*Indicador de posición digital ENDRESS+HAUSER RIA45*



*Nota.* El gráfico muestra al indicador de posición utilizado para mostrar la posición de la compuerta en metros en la puerta del tablero de control principal. Tomado de *Functional Safety Manual RIA45* (p.52), por Endress+Hauser, 2009.

#### 3.2.6 Elementos auxiliares

Es este apartado se describen las características eléctricas de los elementos auxiliares utilizados en el desarrollo del proyecto, estos son adecuados en el tablero de control con el

propósito de reemplazar los tableros de la bomba de lubricación y del freno electromagnético. A continuación se detallan:

### 3.2.6.1 Transformador 480/120 VAC

Este transformador es utilizado para suministrar de energía eléctrica a la comba de lubricación y a las luces indicadoras ubicadas en la puerta del tablero de control principal. Fue seleccionado en base a los requerimientos mostrados en la Tabla 4. A continuación se muestran sus características:

**Tabla 25**

*Características del transformador*

Parámetro	Valor
Voltaje primario	480 [VAC]
Voltaje secundario	120 [VAC]
Potencia	550 [VA]
Frecuencia	60 [Hz]

Con este transformador aseguramos el suministro de voltaje y corrientes para la bomba de lubricación.

### 3.3 Dimensionamiento de las protecciones y seccionadores

Los fusibles utilizados para las protecciones también tienen como propósito seccionar los distintos circuitos que forman el sistema de operación automática de la compuerta plana del desarenador de tal manera que se simplifiquen las tareas de diagnóstico de fallas para el personal.

### 3.3.1 Dimensionamiento de los fusibles para el sistema de control

El sistema de control está formado por el controlador y sus módulos, fines de carrera, pulsadores y los dispositivos de medición.

**Tabla 26**

*Consumo de los elementos del sistema de control*

ELEMENTO	CONSUMO NOMINAL[A]
PLC S7-1200 1214C DC/DC/DC	0.5 [A]
Módulo SM1223 DC/RLY	2 [A]
Módulo SM 1231	0.45 [A]
Indicador de posición RIA45	0.021 [A]
Fines de Carrera Omron WLCA2-LS (2)	0.2 [A]
Encoder Incremental SICK S4PA10000	0.04 [A]
Sensores de presión SITRANS P220	0.02 [A]

En base a la Tabla 26 y teniendo en cuenta que todas las cargas son resistivas se considera adecuado utilizar un fusible de propósito general categoría “G” de al menos 2 [A].

### 3.3.2 Dimensionamiento de los fusibles para el sistema de comunicación

**Tabla 27**

*Consumo de los elementos del sistema de comunicación*

ELEMENTO	CONSUMO NOMINAL[A]
Pasarela USB-TCP232-410s	0.09 [A]
Access point Scalance w761-1	0.15 [A]
Antena ATN792-6MN	0.15 [A]
Switch CSM 1277	0.07 [A]

En base a la Tabla 27 y teniendo en cuenta que todas las cargas son resistivas se considera adecuado utilizar un fusible de propósito general categoría “G” de al menos 0.15 [A]

### **3.3.3 Dimensionamiento de los fusibles para el transformador 480/120 [VAC]**

Teniendo en cuenta la Tabla 25 se considera adecuado utilizar un fusible de propósito general categoría “G” de al menos 6 [A].

### **3.3.4 Dimensionamiento de los fusibles para el sistema de iluminación y luces indicadoras**

Las luces indicadores tienen un consumo irrelevante, sin embargo el sistema de iluminación del tablero consume 0.4 [A], por esta razón se considera adecuado un fusible de propósito general categoría “G” de al menos 0.5 [A]

### **3.3.5 Dimensionamiento de los fusibles para el freno electromagnético**

En base al registro de mediciones realizado por el personal de mantenimiento electrónico se observa que el consumo del freno es de 1.3 [A] razón por la cual se considera adecuado colocar un par de fusibles de propósito general categoría “G” de al menos 2 [A].

### **3.3.6 Dimensionamiento de los fusibles para la bomba de lubricación**

Teniendo en cuenta que esta carga corresponde a una carga inductiva y en base a la Tabla 4 en la que se menciona que la corriente nominal es de 5.8 [A] se considera adecuado utilizar un fusible tipo “GL” o “GF” de al menos 6 [A].

## **3.4 Diseño del sistema de instrumentación**

El sistema de instrumentación está conformado por dos elementos detallados en la sección 0. En este apartado se indica la conexión y configuración del controlador para poder leer e interpretar las señales provenientes de estos instrumentos.

### 3.4.1 Encoder Incremental SICK DFS60B-S4PA1000

Este encoder incremental utiliza dos canales a su salida para representar dos señales desfasadas entre sí  $90^\circ$  de tipo cuadrada, los cuales según el fabricante son denominados canal A y canal B. El primero sirve para determinar la velocidad de rotación del eje, mientras que el canal B permite discriminar el sentido de rotación; por esta razón, en esta aplicación se utilizarán únicamente estos dos canales de los seis que dispone.

Adicionalmente, este elemento cuenta con un dispositivo extra que permite configurarlo según los requerimientos de la aplicación; en este se pueden configurar parámetros como: voltaje de salida, número de impulsos por revolución y número de canales a utilizar.

En este caso se utilizará la siguiente configuración:

**Tabla 28**

*Configuración del encoder SICK DFS60B-S4PA10000*

Parámetro	Valor
Número de canales de señal	2 canales
Voltaje de alimentación	24 VDC
Voltaje de salida	HTL
Pulsos por revolución	10000

Para determinar la precisión en metros de este dispositivo se parte del siguiente cálculo que tiene como base la información mostrada en los planos y manuales del fabricante:

Velocidad de la compuerta:  $v_{compuerta} = 0.3 \text{ m/min}$

Velocidad del eje de la caja reductora número dos  $v_{cajareductora2} = 0.357 \text{ RPM}$



Mediante estas dos velocidades se puede concluir que cada 0.357 revoluciones del eje de medición de la caja reductora 2, la compuerta plana recorre 0.3 metros.

La  $v_{cajareductora2}$  será la velocidad de giro del eje del encoder debido a que sobre ésta se acopla dicho elemento; en base a esto podemos determinar que:

$$1 \text{ revolución} = 10\,000 \text{ pulsos}$$

$$0.357 \text{ revolución} = x$$

Cada 3570 pulsos equivalen a 0.3 metros de desplazamiento de la compuerta por lo que cada mil pulsos equivalen a aproximadamente 8.5 centímetros de desplazamiento que nos aseguran una precisión excelente para esta aplicación.

#### **Figura 48**

*Programador del encoder incremental SICK DFS60B-S4PA1000*

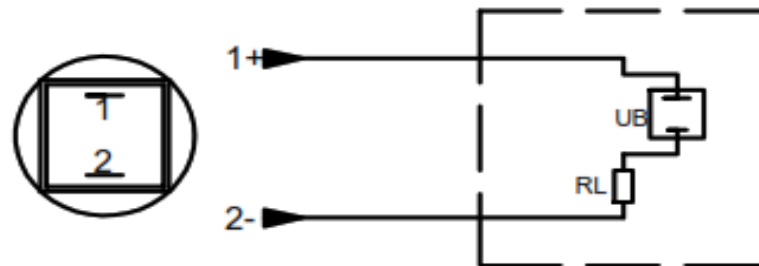


#### **3.4.2 Sensores de presión SITRANS P220**

Este sensor de presión se comporta como una fuente de corriente continua que varía en función de la presión a la cual es sometido su transductor; en base al manual de funcionamiento de dispositivo la conexión de sus pines sería la siguiente:

**Figura 49**

*Esquema de conexión eléctrica del sensor de presión SITRANS P220*



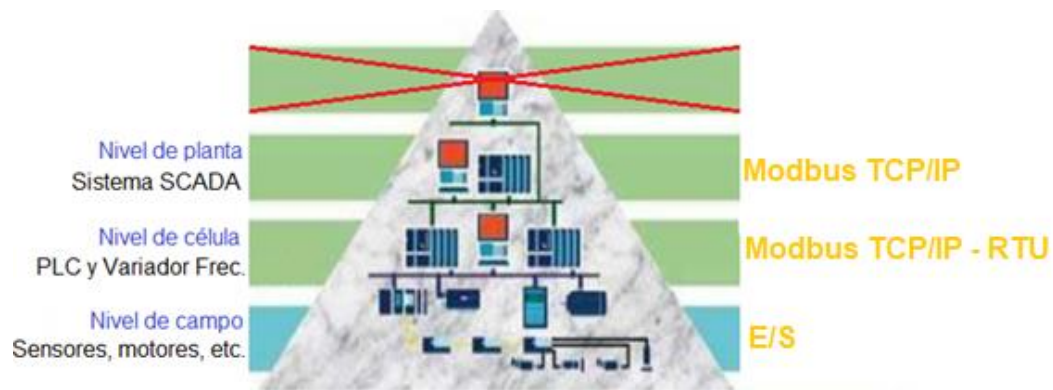
*Nota.* La gráfica muestra el diagrama de conexionado eléctrico para los sensores de presión.

Tomado de Transmisor de presión SITRANS P220 (7MF1567) (p.33), por Siemens, 2011.

En esta aplicación se utilizan dos de estos sensores: uno para la medición de la presión aguas arriba y el otro aguas debajo de la compuerta plana del desarenador en la represa Agoyán; estos sensores se encuentran conectados al módulo de entradas analógicas del controlador Siemens S7-1200 1214C a los canales 0 y 1 respectivamente

### 3.5 Diseño del sistema de comunicación

El sistema de comunicación está limitado por las interfaces disponibles entre los equipos utilizados para la automatización de este proceso. La interfaz que determina el protocolo de comunicación es la del CBT ya que solo permite comunicación Modbus RTU, mediante el uso de este protocolo en sus variantes TCP/IP y RTU se establecieron los enlaces de comunicación de acuerdo con la siguiente figura:

**Figura 50***Pirámide de las comunicaciones*

La Figura 50 muestra los protocolos de comunicación empleados para establecer los enlaces de comunicación entre los distintos niveles de la pirámide de automatización. En el nivel superior: nivel de planta, se encuentra el actual sistema SCADA ubicado en la oficina de operación de la Represa de la Central Hidroeléctrica Agoyán formado por un PLC de cabecera Siemens s7-1200 y un panel táctil TP1200 confort. (Orozco, 2015)

El nivel de célula está formado por los elementos que se encuentran en el tablero de control principal ubicado en la cota de 1667 m.s.n.m. siendo los más relevantes para este caso el PLC, el convertidor de baja tensión, la pasarela USB-TCP232-410s, el Access point W761-1, la antena ANT792-6MN y el switch.

En la base de la pirámide tenemos los dispositivos de medida o instrumentación como fines de carrera, sensores de presión, encoder y los elementos de mando como motores, actuadores, entre otros que son conectados al controlador haciendo uso de las entradas y salidas de este. Estos elementos son quienes están en contacto directo con el proceso productivo de tal manera

que los actuadores ejecutan las instrucciones del controlador mientras los instrumentos de medida obtienen el valor de las variables del proceso. (Zambrano & Caballero, 2018)

Los tres niveles se comunican entre sí mediante distintas soluciones de comunicación basadas en el protocolo Modbus que son principalmente determinadas por las interfaces de los equipos a utilizarse. Para llevar a cabo la comunicación entre niveles, se debe tener en cuenta que existen distintos medios físicos de transmisión; para solventar este inconveniente se hace uso de una pasarela.

### **3.5.1 Descripción general del protocolo Modbus**

El autor Andrés Ruiz menciona que en el protocolo Modbus el esclavo trata de manera independiente cada solicitud del maestro y que esta no tiene relación con las anteriores y por lo tanto es considerada como una nueva solicitud de comunicación, trabajar de esta manera permite que la transferencia de datos sea sumamente resistente a interferencias de ruido.

En el ámbito de la programación este protocolo trabaja con una comunicación orientada a la conexión, es decir, se establece un canal de comunicaciones entre el maestro y el esclavo mediante el uso de un identificador unívoco

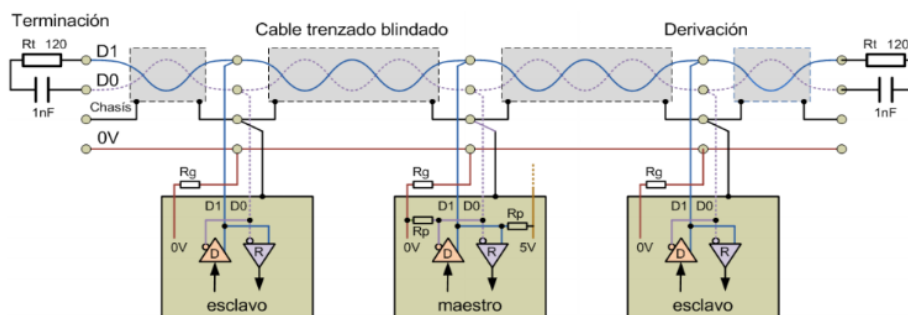
Modbus no compromete el tipo de datos a utilizarse en la transmisión de información, lo que supone cierta flexibilidad en el intercambio de información. En el bus de comunicaciones deben encontrarse conectados una estación principal (maestro) y de una o varias estaciones subordinadas (esclavos). En el intercambio de información solo la estación principal puede iniciar la comunicación y las estaciones subordinadas no pueden comunicarse directamente entre sí. Las formas de intercambio de información son:

- **Difusión (broadcast):** A partir de la estación principal se transmite un mensaje a todas las estaciones esclavas del bus que ejecutan la orden sin emitir algún tipo de respuesta.
- **Pregunta – respuesta:** El maestro transmite preguntas orientadas a una estación subordinada en específico y esta, a su vez, responde con una respuesta determinada a la estación principal.

Las redes que utilizan Modbus constan obligatoriamente de una estación principal y un máximo de 247 estaciones subordinadas con direcciones de rango que van desde 1 hasta 247. La estación maestro envía las tramas que poseen el identificador o dirección del receptor, la tarea a realizar, los datos necesarios para ejecutar la tarea y un CRC o código de redundancia cíclica para comprobar errores. (Castro & Alvarado, 2017)

**Figura 51**

*Conexión rs-485 para dispositivos de una red modbus*



*Nota.* La gráfica presenta el diagrama de conexión general para los dispositivos de una red modbus sobre RS-485, la resistencia  $R_T$  puede ser activada mediante el uso del dipswitch mostrado en la

Figura 27. Tomado de *Sistemas Industriales Distribuidos* (p.95), por A. Rosado, 2009.

### 3.5.1.1 Códigos de función Modbus

Los códigos mostrados en la Tabla 29 sirven para determinar la función Modbus que soportan todos los elementos que cumplen con este estándar.

**Tabla 29**

*Códigos de funciones modbus*

<b>Función</b>	<b>Código</b>	<b>Descripción</b>
1	01 H	Lectura de múltiples bits (bobinas) de salida o internos
2	02 H	Lectura de múltiples (bobinas) bits de entradas
3	03 H	Lectura de múltiples registros (palabras) de salida o internos
4	04 H	Lectura de múltiples registros (palabras) de entrada
5	05 H	Escritura de una bobina (bit)
6	06 H	Escritura de un registro (palabra)
15	0F H	Escritura de múltiples bits (bobinas)
16	10H	Escritura de múltiples registros (palabras)

*Nota.* Los códigos mostrados en la tabla sirven para configurar los bloques de comunicación modbus en TIA portal. Tomado de *Implementación de una Red Modbus TCP Wireless con Integración de Tecnología Siemens y Schneider para Prácticas Estudiantiles del Laboratorio de Automatización Industrial* (p.158), por Castro & Alvarado, 2017.

### 3.5.1.2 Modelo Modbus cliente – servidor

Según Marín, el protocolo Modbus permite la interconexión de dispositivos con un “puente” o “pasarela” de enlace para establecer la conexión entre una red TCP/IP con una subred de línea serie como en este caso que se tiene dos tipos de interfaces

Figura 52

Modelo cliente servidor



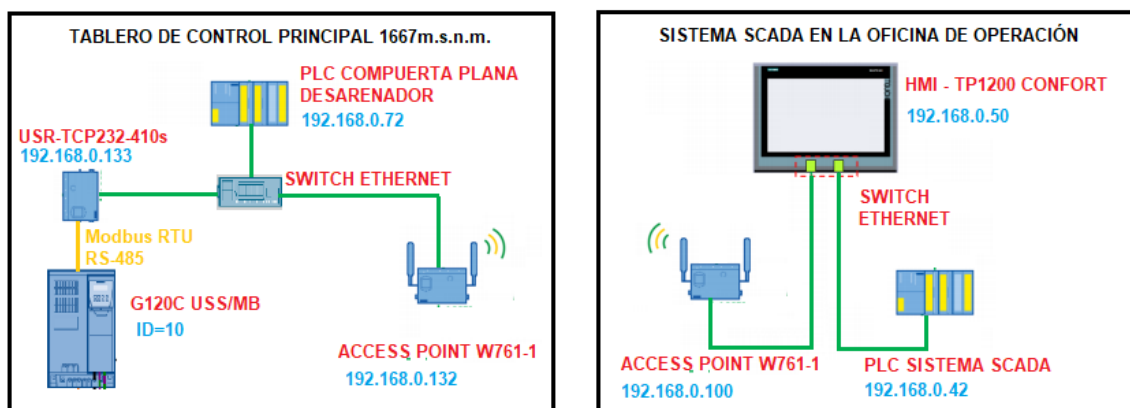
*Nota.* La gráfica muestra el diagrama de bloques de una comunicación modbus. Tomado de *Control de PLCs Siemens s7-1200 mediante el protocolo Modbus a través del programa Labview para realización de prácticas de comunicación industrial* (p.254), por A. Marín, 2010.

- **Modbus petición:** es el mensaje con el que se inicia la transmisión y es enviado desde el cliente hacia la red.
- **Modbus confirmación:** es la respuesta de recibido en el lado del cliente de la red
- **Modbus Indicación:** es el mensaje de petición recibido en el lado del servidor
- **Modbus Respuesta:** se define como el mensaje de respuesta que envía el servidor

### 3.5.2 Arquitectura de la red de comunicación

Figura 53

Arquitectura de la red de comunicación



En La Figura 53 se muestran las dos redes inmersas en el presente proyecto, sin embargo la única red diseñada es la del tablero de control principal y esta será enlazada a la red del sistema SCADA.

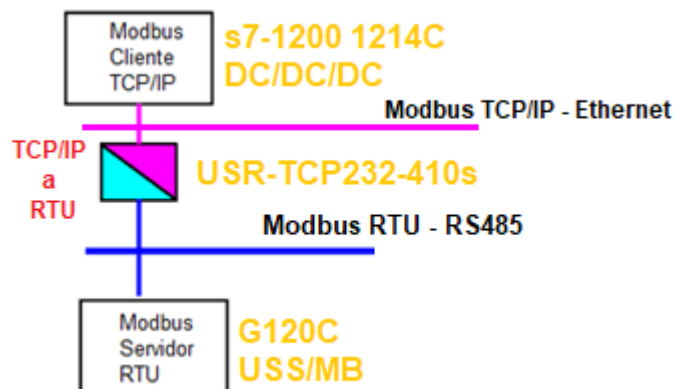
### 3.5.3 Diseño de la red LAN

La red LAN integra los equipos del tablero de control principal y en esta se maneja el protocolo de comunicación Modbus sobre dos tipos de cableado como se muestra en la Figura 53. Este diseño se apega a las interfaces de comunicación disponibles en los dispositivos: controlador, convertidor de baja tensión, pasarela y el Access point.

#### 3.5.3.1 Configuración de la comunicación PLC - CBT

**Figura 54**

*Diagrama de bloques de la comunicación PLC – CBT*



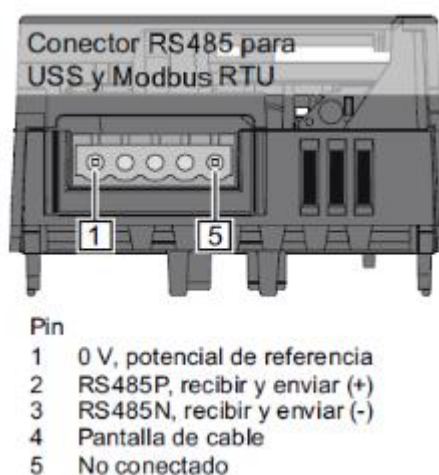
La comunicación entre el PLC y el CBT no era posible de manera directa debido a la incompatibilidad de sus interfaces, por un lado una interfaz ethernet para el primer elemento y por el otro una interfaz RS-485 correspondiente al convertidor. Por esta razón se incluyó la pasarela USR-TCP232-410s que realiza una conversión transparente de la interfaz ethernet a RS-485 y es compatible con el protocolo Modbus al cual obedece el CBT.



Por otro lado los protocolos utilizados son los siguientes: Modbus sobre TCP/IP por medio de un cable ethernet entre el PLC y la pasarela; y, Modbus RTU sobre RS-485 entre la pasarela y el CBT1 como muestra la Figura 54.

**Figura 55**

*Conector RS-485 para modbus RTU del CBT*

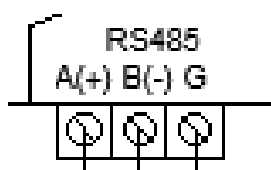


*Nota.* El gráfico muestra la interfaz de comunicación Modbus RTU sobre el medio RS485 utilizado para comunicar el convertidor de baja tensión con el PLC mediante el uso de la pasarela. Tomado de *Convertidores de baja tensión SINAMICS G120C* (p.325), por Siemens, 2015

Por otro lado la interfaz Modbus RTU de la pasarela es la siguiente:

**Figura 56**

*Conector RS-485 para modbus RTU de la pasarela*



### 3.5.3.2 Configuración del PLC para la red LAN

Para establecer la comunicación Modbus el PLC debe configurarse con los siguientes parámetros de red:

**Tabla 30**

*Configuración de los parámetros de red del PLC*

PARÁMETRO	VALOR
IP Address	192.168.0.72
Subred mask	255.255.255.0

### 3.5.3.3 Configuración de la pasarela USR-TCP232-410s

**Tabla 31**

*Configuración de los parámetros de red de la pasarela*

PARÁMETRO	VALOR
IP Address	192.168.0.133
Subred mask	255.255.255.0
Interfaz	RS-485
Baud rate	19200 bps
Parity	Even
Stop bits	1
Work mode	TCP Server-Modbus TCP
Local Port	502

La configuración de la pasarela se realiza ingresando la dirección IP asignada por default en un explorador de internet.

### 3.5.3.4 Configuración del convertidor de baja tensión G120C USS/MB

**Tabla 32**

*Configuración de los parámetros de red del CBT*

PARÁMETRO	VALOR
Baud rate p[2020]	19200 bps
ID p[2021]	10
Protocolo p[2030]	Modbus RTU
Parity p[2031]	Even
Tiempo de vigilancia p[2040]	100 ms

El parámetro p[2040] determina el tiempo de espera cuando se pierde la comunicación entre el PLC y el convertidor de tal manera que al transcurrir 100 ms desde que se perdió el enlace el CBT entra en fallo.

Adicionalmente deben configurarse los parámetros correspondientes a la salida analógica del CBT para que pueda ser modificada por el PLC mediante el enlace Modbus.

**Tabla 33**

*Configuración de los parámetros de la salida analógica del CBT*

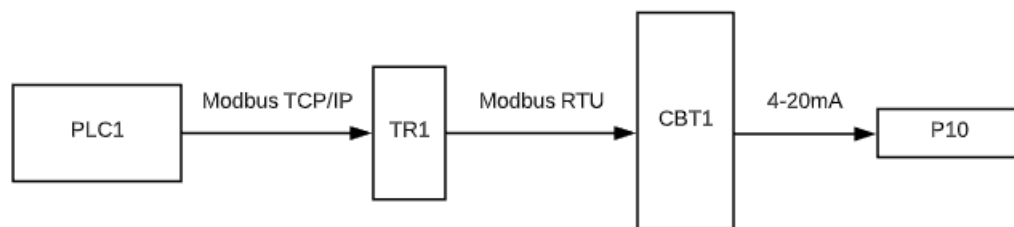
PARÁMETRO	VALOR
CU Salidas analógicas Fuente de señal p[771][0]	p791[0]
CU Salidas analógicas tipo, A00 (borne 12/13)	[2] (+4 ... 20 mA)

Mediante la configuración de la Tabla 33 se puede visualizar el desplazamiento de la compuerta en metros en el indicador de posición RIA45 colocado en la puerta del tablero de control principal.

El convertidor de baja tensión será el encargado de gobernar al indicador de posición RIA45 denominado P10 por medio de su salida analógica y esta, a su vez, será manipulada por el controlador S7-1200 1214C mediante el enlace de comunicación Modbus de la siguiente manera:

**Figura 57**

*Diagrama de bloques para el indicador de posición digital*



En la Figura 57 se explica la ruta de comunicación que siguen los datos desde el punto de partida en el PLC1 el cual recibe los datos del encoder transmisor de y los encapsula en la trama de Modbus TCP/IP para enviarlos hasta el CBT1 por medio de la pasarela TR1. A continuación, el convertidor de baja tensión traduce el valor recibido desde el PLC1 a una señal de 4-20 mA para ser interpretada por P10 como valores numéricos correspondientes a la posición en metros de la compuerta plana del desarenador.

Es necesario disponer de la tabla de registros Modbus asociada al convertidor de baja tensión para saber cuáles son los registros que nos interesan leer o escribir. Esta tabla se encuentra en el datasheet del Sinamics G120C USS/MB, sin embargo a continuación se muestra un extracto de esta tabla en la que se muestran los registros utilizados en el desarrollo del proyecto:

**Tabla 34***Registros modbus del CBT*

REGISTRO	DIRECCIÓN	TIPO
Diagnóstico	40340-40349	Lectura
Palabra de mando	40100-401001	Lec./Esc.
Palabra STATUS	40110	Lectura
Salida analógica	40523	Lec./Esc.

A cada uno de los registros mostrados en la Tabla 34 se accede mediante una instrucción MB\_CLIENT unívoca.

### 3.5.3.5 Comunicación modbus cliente (PLC-CBT)

La comunicación modbus cliente es la encargada de generar las solicitudes de comunicación entre el PLC (cliente) y el CBT (servidor) mediante el uso de la instrucción MB\_CLIENT de TIA portal. Este enlace permite controlar al convertidor mediante la escritura y lectura de los registros modbus.

### 3.5.3.6 Instrucción MB\_CLIENT

Esta instrucción es la encargada de realizar la comunicación modbus TCP/IP a través de la conexión profinet del PLC. Esta instrucción permite enlazar el cliente con el servidor mediante el envío de peticiones y la recepción de respuestas por parte del servidor. También permite controlar la desconexión del cliente modbus debido a que solo puede existir una instrucción MB\_CLIENT a la vez; por esta razón se utiliza un contador que permita controlar dicha desconexión.

**Tabla 35***Parámetros de la instrucción MB\_CLIENT*

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN
REQ	1 = La instrucción envía peticiones de comunicación
DISCONNECT	0 = Establece conexión con el servidor
MB_MODE	Selección del modo de petición (Lect/Esc)
MB_DATA_ADDR	Dirección del registro modbus
MB_DATA_LEN	Longitud de datos
MB_DATA_PTR	Búfer de almacenamiento
CONNECT	Datos de direccionamiento del servidor
MB_UnitID	ID del servidor al cual accede la instrucción

Mediante MB\_MODE se escoge la acción que realizará la instrucción: lectura (0) o escritura (1) en base a la Tabla 29.

MB\_DATA\_ADDR está relacionado con las direcciones indicadas en la Tabla 34 y MB\_DATA\_LEN indica la cantidad de registros a los cuales se pretende acceder.

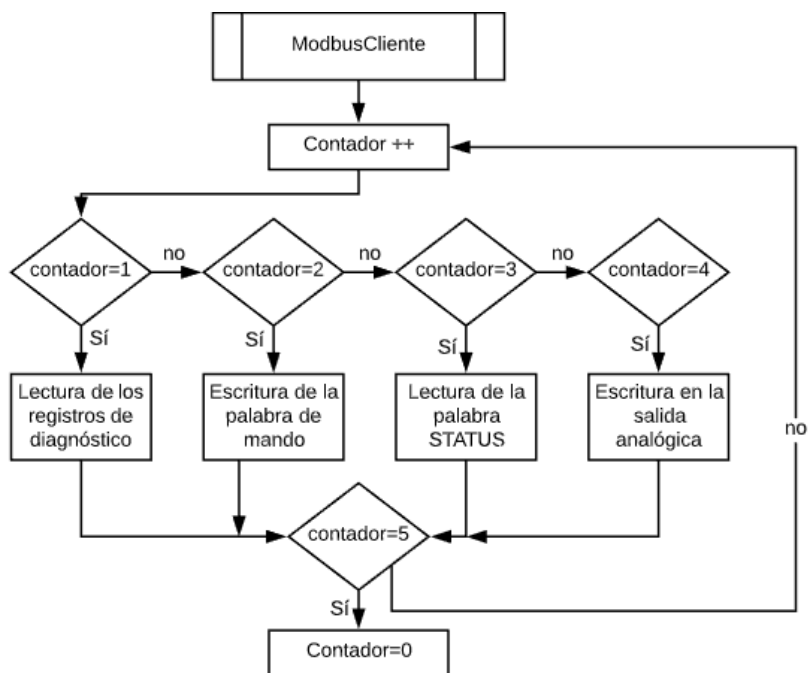
El parámetro CONNECT utiliza una estructura TCON\_IP\_v4 la cual contiene los datos de direccionamiento de la pasarela: IP y puerto.

El parámetro MB\_UnitID debe ser el mismo valor que el configurado en el parámetro p[2021] del CBT, es decir, 10. Adicionalmente, el puerto local y remoto utilizado para el enlace de la comunicación modbus es 502.

El diagrama de flujo correspondiente a la comunicación PLC-CBT es el siguiente:

Figura 58

Diagrama de flujo de la comunicación PLC-CBT



La subrutina ModbusCliente consta de un contador que alterna el funcionamiento de los cuatro bloques MB\_CLIENT explicados a continuación:

### 3.5.3.7 Bloque Modbus de lectura de los registros de diagnóstico

Este bloque es el encargado de leer las variables de diagnóstico del motor de izaje M1 tales como: set point de velocidad, velocidad actual, frecuencia de salida, voltaje de salida, voltaje DC de salida, corriente, torque, potencia y consumo.

Los parámetros de configuración de la instrucción MB\_CLIENT son:

**Tabla 36***Configuración de la instrucción MB\_CLIENTDIAGNOSTICO*

PARÁMETRO	VALOR
DATA_ADDR	40340
MODE	0
DATA_LEN	10
InterfaceID	64
ID	3
ConnectionType	11
RemoteAddress	192.168.0.133
MB_UnitID	10

De la Tabla 36 se resume que la lectura de los registros de diagnóstico inicia en 40340 hasta 40349 del servidor modbus con ID= 10 conectado a la pasarela con dirección IP: 192.168.0.133; los diez valores leídos se almacenan en un arreglo tipo Int de 10 posiciones colocado en el parámetro MB\_DATA\_PTR de la instrucción MB\_CLIENT.

### 3.5.3.8 Bloque Modbus de escritura en el CBT

Este bloque es el encargado de escribir palabra de mando correspondiente a la acción que deberá realizar el CBT en base a la tabla modbus del Sinamics G120C USS/MB. Para el efecto dispone de un arreglo de dos posiciones: [0] para la palabra de mando y [1] para la consigna de velocidad. Las palabras de mando y consigna de velocidad son:



**Tabla 37**

*Palabras de mando para el control del motor mediante el CBT*

<b>Palabra de mando</b>	<b>VALOR</b>
Activar CBT	16#047E
Girar en sentido horario (abrir)	16#047F
Girar en sentido antihorario (cerrar)	16#0C7F
Parada normal	16#043F
Parada de emergencia	16#
Acusar Fallos	16#04FE

Los valores descritos en la Tabla 37 son los que deben escribirse en la posición [0] del arreglo relacionado a la variable MB\_DATA\_PTR de la función MB\_CLIENT de esta sección. Para la posición [1] el valor es 852 RPM que corresponden a la velocidad máxima del motor de izaje.

Los parámetros de configuración de la instrucción MB\_CLIENT son:

**Tabla 38**

*Configuración de la instrucción MB\_CLIENTECRITURADATOS*

<b>PARÁMETRO</b>	<b>VALOR</b>
DATA_ADDR	40100
MODE	1
DATA_LEN	2
InterfaceID	64
ID	4
ConnectionType	11
RemoteAddress	192.168.0.133
MB_UnitID	10

De la Tabla 38 se resume que la escritura de los registros de diagnóstico inicia en 40100 hasta 40101 del servidor modbus con ID= 10 conectado a la pasarela con dirección IP: 192.168.0.133; los dos valores a escribir se almacenan en un arreglo tipo word de 2 posiciones colocado en el parámetro MB\_DATA\_PTR de la instrucción MB\_CLIENT.

### 3.5.3.9 Bloque Modbus de lectura del registro de la palabra STATUS ZSW1

Este bloque es el encargado de leer la palabra estatus del CBT, en esta se encuentran los parámetros que reflejan el estado en el cual se encuentra el variador como: estado de alimentación, fallo activo, alarma de exceso de temperatura. Sentido de rotación del motor, etc. para más información consultar la tabla de la palabra de estado en la bibliografía: (Siemens, Convertidores de baja tensión SINAMICS G120C, 2015).

Los parámetros de configuración de la instrucción MB\_CLIENT son:

**Tabla 39**

*Configuración de la instrucción MB\_CLIENTLECTURASTATUS*

PARÁMETRO	VALOR
DATA_ADDR	40110
MODE	0
DATA_LEN	1
InterfacelD	64
ID	5
ConnectionType	11
RemoteAddress	192.168.0.133
MB_UnitID	10

De la Tabla 39 se resume que la lectura de la palabra STATUS ZSW1 se encuentra en el registro 40110 del servidor modbus con ID= 10 conectado a la pasarela con dirección IP: 192.168.0.133; el valor de la palabra STATUS viene en formato hexadecimal y se almacena en una variable de tipo Word.

### 3.5.3.10 Bloque Modbus de escritura en la salida analógica del CBT

Este bloque es el encargado de escribir el valor de posición de la compuerta en la salida analógica cero del CBT correspondiente a los bornes 12 y 13 para su visualización en P10.

Los parámetros de configuración de la instrucción MB\_CLIENT son:

**Tabla 40**

*Configuración de la instrucción MB\_CLIENTESCRITURAAO*

PARÁMETRO	VALOR
DATA_ADDR	40523
MODE	1
DATA_LEN	1
InterfacelD	64
ID	2
ConnectionType	11
RemoteAddress	192.168.0.133
MB_UnitID	10

De la Tabla 40 se resume la salida analógica del CBT toma los valores almacenados en el registro Modbus 40523 de lectura y escritura del servidor con ID=10 conectado a la pasarela con dirección IP: 192.168.0.133; el valor de este registro es normalizado y escalado por el convertidor en un rango de 4 – 20 mA para poder visualizarse en el indicador de posición P10.

### 3.5.4 Diseño de la red WLAN

Se propone el uso de una red WLAN debido a la distancia entre ambos puntos y sobre todo a los siguientes factores:

- El uso de los medios físicos de transmisión como: cable ethernet o conductor para RS-485 sobre protocolo Modbus están limitados por las canales de conducción existentes ya que por estos circulan los cables de acometidas eléctricas de fuerza de todos los motores de izaje, bombas, entre otros actuadores instalados a lo largo de la corona de la represa produciendo una cantidad interferencia electromagnética considerable.
- La distancia entre el tablero de control principal y la oficina de operación es de aproximadamente 200 metros en línea recta y aproximadamente 300 metros por medio de los canales designados a la circuitería.
- En el stock de bodega no se dispone de un cable apantallado adecuado para comunicación entre ambos puntos.
- A escasos metros del bloque 13 existe el sistema del pórtico limpia rejás el cual fue modernizado y en el que se estableció una red WLAN para la comunicación con la oficina de operación.
- El stock de bodega dispone de los elementos necesarios para establecer la red WLAN entre el bloque 13 y la oficina de operación.

Para determinar el alcance de la red WLAN se midió la distancia entre el tablero de control principal y la oficina de operación entre los puntos que corresponden a las antenas.

**Figura 59**

*Distancia entre el tablero de control principal y la oficina de operación*



*Nota.* La imagen mostrada indica la línea de visión entre el bloque 13 y la oficina de operación mediante la herramienta ruler. Tomado de: Google Earth.

Mediante la herramienta ruler de Google Earth se midió la distancia en línea recta entre el bloque 13 y la oficina de operación cuyo valor es de 195.28 metros. Basados en la hoja de datos de la antena ANT792-6MN en la que se señala que la distancia de transmisión de la antena es de 200 metros se concluye que es factible su utilización.

Esta red es la encargada de establecer el enlace entre el tablero de control principal que hará de servidor Modbus y el sistema SCADA operando como cliente mediante protocolo Modbus TCP/IP.

La red WLAN está compuesta por un dispositivo servidor (el sistema SCADA) y un dispositivo cliente (el sistema de control automático de la compuerta plana del desarenador) como se indica en la Figura 53.

#### 3.5.4.1 Configuración de la red WLAN

Para establecer el enlace de comunicación es necesario configurar el Access point W761-1 como cliente, para esto ingresa al asistente de configuración mediante el ingreso de la dirección IP asignada por defecto al dispositivo en un explorador de internet y se configuran los siguientes parámetros:

**Tabla 41**

*Configuración de los parámetros del módulo SCALANCE W761-1*

PARÁMETRO	VALOR
SSID	Compuerta Plana del Desarenador
IP Address	192.168.0.132
Subred mask	255.255.255.0
Wireless mode	2.4 GHz
Estandar de comunicación	802.11n
Antena	IWLAN ANT792-6MN
Longitud del cable	5 metros

El uso del estándar IEEE 802.11n supone alcanzar velocidades de transmisión teóricas de 540 Mbit/s, además introduce el concepto MIMO (Multiple Input, Multiple Output) para aumentar la tasa de transferencia y el alcance. (Escudero, 2007).

### 3.5.4.2 Instrucción MB\_SERVER

Esta instrucción permite al controlador comportarse como un servidor Modbus TCP/IP mediante la conexión Profinet hasta el Access point, esto permite procesar peticiones de conexión de un cliente Modbus TCP/IP (en este caso el sistema SCADA de la oficina de operación) y emitir mensajes de respuesta.

**Tabla 42**

*Parámetros de la instrucción MB\_SERVER*

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN
DISCONNECT	0 = Establece una conexión pasiva
MB_HOLD_REG	Puntero hacia el registro Modbus
CONNECT	Datos de direccionamiento del servidor

Para este caso el parámetro DISCONNECT debe permanecer en falso debido a que se necesita una conexión pasiva constante entre el cliente y el servidor.

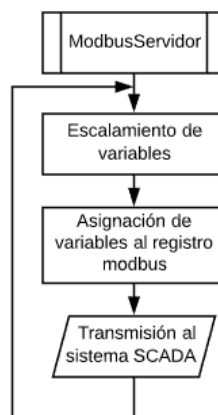
El puntero MB\_HOLD\_REG está asociado a un arreglo de tipo Word de 17 posiciones en el cual se almacenan todos los datos que se envían hacia el sistema SCADA.

El parámetro CONNECT utiliza una estructura TCON\_IP\_v4 la cual contiene los datos de direccionamiento hacia el servidor

El diagrama de flujo correspondiente a la comunicación PLC-CBT es el siguiente:

**Figura 60**

*Diagrama de flujo de la comunicación con el sistema SCADA*



La subrutina ModbusServidor es la encargada de escalar y realizar el tratamiento necesario a las variables, las asigna a una posición del arreglo de registros modbus creado y los transmite hacia el sistema SCADA en la oficina de operación.

### 3.5.5 Tablas modbus de la comunicación WLAN

Los registros asociados a la instrucción MB\_SERVER debe asociarse a una tabla Modbus tal como sucede con cualquier otro dispositivo servidor, para esto se diseñaron varias tablas apegadas a la estructura del protocolo Modbus que permiten al sistema SCADA, en este caso el cliente, leer o escribir sobre estos registros.

Además se debe configurar la instrucción MB\_SERVER de tal manera que el cliente únicamente tenga acceso a los registros asociados a su instrucción, de no realizar esta validación el sistema puede verse afectado por eventos o estados no considerados.



### 3.5.5.1 Tabla de registros modbus

**Tabla 43**

*Tabla de registros modbus para la comunicación WLAN*

<b>Variable</b>	<b>Unidad</b>	<b>Escalamiento</b>	<b>Registro final</b>	<b>Holding Reg</b>
Velocidad M1	RPM	1	DatosSCADA[0]	40001
Frecuencia M1	Hz	1/100	DatosSCADA[1]	40002
Voltaje de salida	V	1	DatosSCADA[2]	40003
Voltaje DC	V	1	DatosSCADA[3]	40004
Corriente	A	1/100	DatosSCADA[4]	40005
Torque	Nm	1/100	DatosSCADA[5]	40006
Potencia	Kw	1/100	DatosSCADA[6]	40007
Posición de la compuerta	m	1/100	DatosSCADA[7]	40008
Sensor de presión Aa	Bar	1/100	DatosSCADA[8]	40009
Sensor de presión Ab	Bar	1/100	DatosSCADA[9]	40010
Status			DatosSCADA[10]	40011
Errores			DatosSCADA[11]	40012
Luces indicadoras			DatosSCADA[12]	40013
Registro de estado de mando			DatosSCADA[13]	40014
Registro de comando			DatosSCADA[14]	40015
Registro de Bypass			DatosSCADA[15]	40016
Eventos físicos			DatosSCADA[16]	40017

El controlador de la compuerta plana del desarenador almacena en las distintas posiciones del arreglo tipo Word “DatosSCADA” los valores mostrados en la columna variable, también indica el valor de escalamiento a realizarse por el controlador del sistema SCADA de tal manera que las variables se muestren en el HMI con las unidades mostradas en la Tabla 43.

Las variables Errores, Luces Indicadoras, Registro de estado de mando, Registro de comando, Registro de Bypass y Eventos físicos poseen sus propias tablas Modbus en las que se detalla la información que contiene cada bit del registro asociado. Estas tablas se encuentran en la sección anexo 8.3.

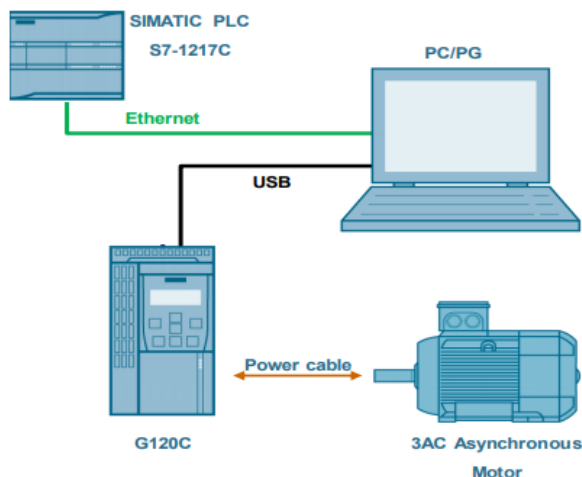
Mediante esta tabla el cliente de la comunicación Modbus está en la capacidad de direccionar adecuadamente la lectura y escritura de los registros del servidor.

### 3.6 Configuración del convertidor de baja tensión

El CBT debe configurarse de acuerdo con los parámetros de su carga, en este caso el motor de izaje cuyos parámetros se encuentran en la Tabla 5. Para configurarlo se procede de la siguiente manera:

#### Figura 61

*Diagrama de conexión para configurar el CBT*



*Nota.* La gráfica muestra las conexiones necesarias para poder configurar el Sinamics G120C USS/MB. Tomado de *Speed Control with S7-1200 via Modbus RTU* (p.17), por Siemens, 2019.

Para configurar los parámetros de la carga conectada al convertidor se procede a realizar las conexiones de la Figura 61 y se ejecuta el siguiente procedimiento:

1. Añadir el dispositivo de accionamiento Sinamics G120C USS/MB
2. En el árbol de proyecto seleccionar el dispositivo y ejecutar puesta en servicio.

3. En la ventana que se despliega ejecutar: Puesta en marcha: asistente
4. En el asistente se configuran los parámetros mostrados en la siguiente tabla:

**Tabla 44**

*Configuración de parámetros del motor en el asistente del CBT*

PARÁMETRO	VALOR
Clase de aplicación	Experto
Ajuste predefinido de la configuración de E/S:	Bus de campo USS
Norma	Motor NEMA (60 Hz, unidades SI)
Tensión de conexión de equipos	460 V
Tipo de motor	Motor asíncrono
Tipo de conexión	Triángulo
Tensión asignada del motor	460 [V]
Intensidad asignada del motor	2.4 [A]
Potencia asignada del motor	1.62 [kW]
Factor de potencia asignado del motor	0.85
Frecuencia asignada del motor	60 [Hz]
Velocidad de giro asignada del motor	852 [1/min]
Límite de intensidad	2.4
Velocidad de giro mínima	0 [1/min]
Velocidad de giro máxima	852 [1/min]
Tiempo de aceleración	2 [s]
Tiempo de deceleración	2 [s]
Deceleración parada rápida	0 [s]

5. Cargar la configuración al convertidor de baja tensión

Mediante la configuración de la Tabla 44 el convertidor de baja tensión se ajusta a los parámetros del motor de izaje.

### 3.7 Diseño del sistema de control

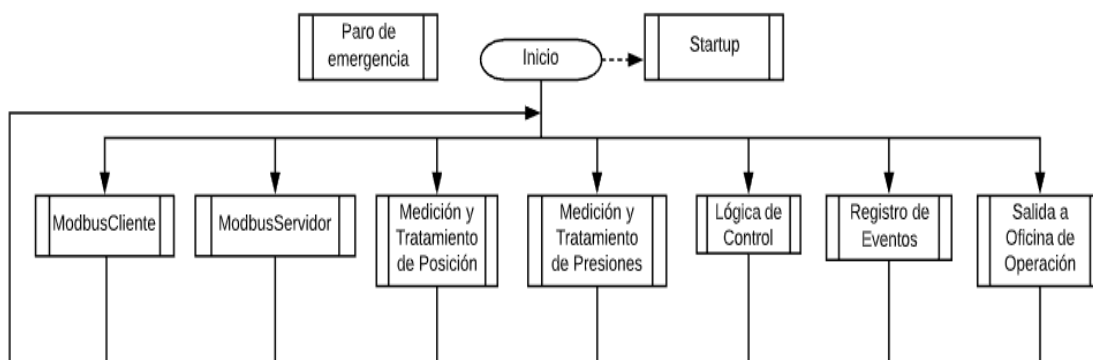
Una vez estudiados los planos originales y conociendo las especificaciones de los nuevos equipos que sustituirán a los anteriores, se procedió a realizar los nuevos planos para el sistema de automatización de la operación de la compuerta plana del desarenador que servirán para conocer de manera gráfica las conexiones eléctricas con sus respectivos detalles, la ubicación de cada equipo, su configuración y valores de ajuste de ser necesario, todo esto con el propósito de que el personal de las áreas interesadas tenga una mejor comprensión de los mismos. Estos planos eléctricos son de propiedad de CELEC EP Unidad de Negocio Hidroagoyán. De igual manera en el anexo 8.2 se encuentra la tabla de asignación de variables en la cual se detalla la dirección correspondiente a cada elemento de entrada/salida, marcas, y estados del controlador.

A continuación se detalla cada una de las subrutinas que componen el sistema de control

#### 3.7.1 Bloque de organización – Main

**Figura 62**

*Diagrama de flujo del bloque de organización MAIN*

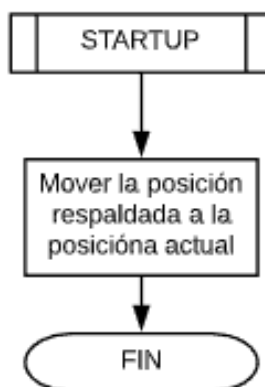


En este se colocan todos los bloques de función y funciones que deben ser ejecutadas cíclicamente por la CPU del controlador. Consta de dos bloques de organización que funcionan de manera independiente a la rutina cíclica main, los bloques de comunicación Modbus son explicados en el apartado anterior de diseño del sistema de comunicaciones, por otro lado, los bloques restantes son explicados a continuación:

### 3.7.1.1 Bloque de organización – Startup

**Figura 63**

*Diagrama de flujo del bloque de organización STARTUP*

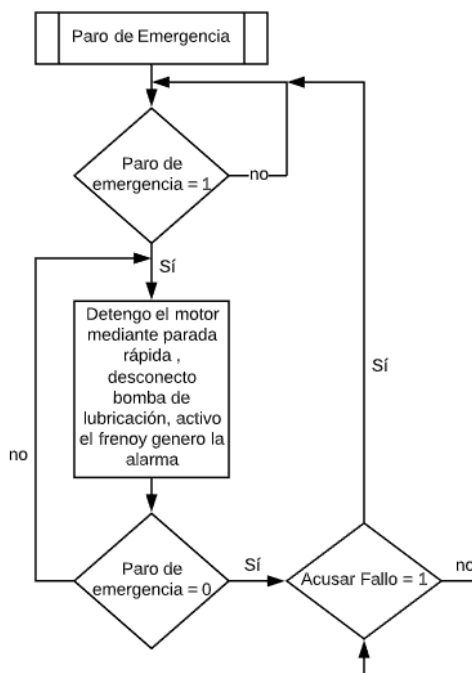


Este es el primero en ejecutarse al arrancar la CPU del controlador y se procesa una sola vez. Sirve para transferir el último valor registrado por el encoder hacia una variable de tipo global con remanencia, de tal manera que al existir una falla por alimentación no se pierda el valor de la posición de la compuerta.

### 3.7.2 Bloque de organización – Paro de emergencia

Figura 64

Diagrama de flujo del paro de emergencia



El paro de emergencia envía la palabra de mando correspondiente para detener el motor de manera instantánea, a la par detiene la bomba de lubricación y desconecta el freno electromagnético. También acciona las respectivas alarmas en el tablero de control principal y en la HMI.

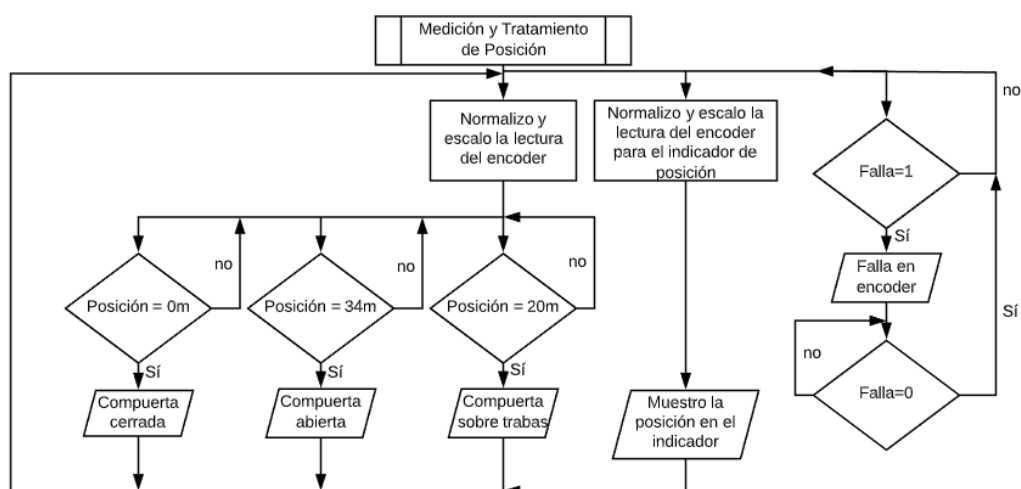
Para relacionar la entrada física que activa este bloque de organización del tipo interrupción por hardware se realiza la configuración de la entrada I1.3 para detectar la activación por flanco descendente debido al uso de un interruptor normalmente cerrado y se lo relaciona con el bloque de organización llamado Paro de emergencia.

### 3.7.3 Bloque de función – Medición y Tratamiento de Posición

En este bloque se ejecutan todas las tareas relacionadas con la variable posición medida por el encoder y se basa en la lógica del siguiente diagrama de flujo:

**Figura 65**

*Diagrama de flujo de la medición y tratamiento de posición*



Para que la CPU pueda leer los valores proporcionados por el encoder es necesario configurar un contador rápido HSC, en sus parámetros de configuración se selecciona el modo de conteo, con fase de servicio A/B debido a los dos canales a utilizarse y el sentido de conteo inicial como Incrementar contador. Por defecto el PLC asigna al HSC1 las entradas IO.0 e IO.1 como las entradas de los canales A y B respectivamente. Adicionalmente asigna el rango de localidad de memoria 1000 a 1003 para el almacenamiento de los pulsos en una variable de tipo doble entero.

Otro parámetro para configurar es el filtro de la señal de entrada de los canales 0 y 1 correspondientes a las entradas I0.0 e I0.1 respectivamente; su valor por defecto es 6.4 milisegundos y debe cambiarse a 0.1 microsegundos.

Los valores utilizados para normalizar la lectura del encoder son obtenidos mediante la relación del número de pulsos por revolución y el número de revoluciones necesarias para completar el desplazamiento de la compuerta plana.

Para el escalamiento de la posición a mostrarse en el indicador de posición RIA45 (P10) se consideró un offset de 16 que permite igualar la posición leída por el PLC con la mostrada en dicho indicador.

Este bloque además verifica que el encoder funcione correctamente mediante la validación de las entradas asociadas a él, en caso de existir averiarse el encoder el sistema se detiene hasta solucionar el problema con el instrumento.

Por último, se realiza la comparación del valor de la posición con respecto a la ubicación de la compuerta para activar las marcas de compuerta abierta, cerrada o a la altura de las trabas.

### **3.7.3.1 Bypass del encoder**

A pesar de ser mínima la posibilidad de que el encoder llegue a fallar se consideró la opción de “bypasear” la medición de posición de tal manera que el sistema de control funcione sin esta medida. La activación del bypass está a cargo del personal de operación e ingeniería de la unidad de negocio y será activada mediante la pantalla HMI de control a la cual incorpora la opción de registro de usuario.



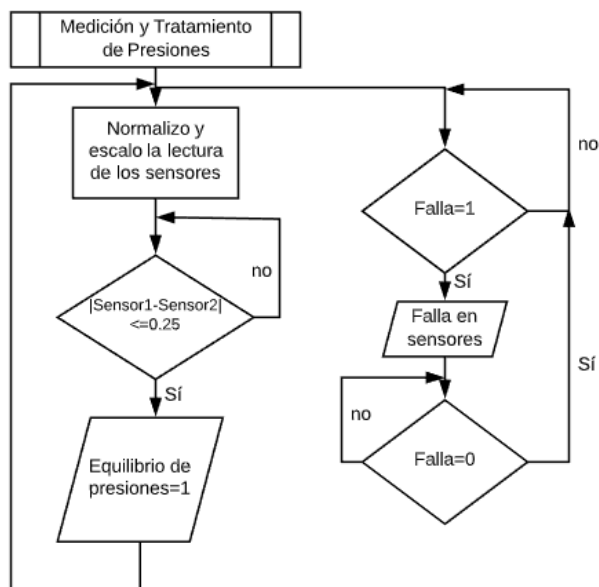
Es necesario hacer énfasis en que la decisión del aplicar esta medida está sujeta a un análisis previo del sistema y a la emergencia que requiera su uso.

### 3.7.4 Bloque de función – Medición y Tratamiento de Presiones

En este bloque se ejecutan todas las tareas relacionadas con las variables de presión obtenidas por sus respectivos instrumentos de medición conectados al módulo de entradas analógicas SM 1231 en los canales 0 y 1. Obedece al diagrama de flujo:

**Figura 66**

*Diagrama de flujo de la medición y tratamiento de presiones*



Para determinar que existe el equilibrio de presiones necesario para poder abrir la compuerta plana de desarenador se verifica que la medición en ambos sensores difiera por un rango máximo de 0 a 0.25 bares.

El sistema cuenta con la detección por falla en los sensores de presión que se activa cuando uno de estos lee valores no asignados a su rango de medida.

Para que el controlador pueda leer la medición de los sensores de presión es necesario configurar las entradas analógicas del módulo SM1231 en base a las características de los sensores mostrados en la Tabla 24.

Para acceder al menú de configuración se debe ingresar a las propiedades del módulo de entradas analógicas SM1231. En este se configuró el canal 0 y canal 1 con los siguientes parámetros: el tipo de medición: Intensidad; el rango de intensidad: 4 ... 20 mA; los otros parámetros son los seteados por defecto.

Además, es importante aclarar que el canal cero asigna por defecto la dirección de memoria IW112 y el canal 1 IW114 ambas asignadas un tipo de dato entero.

#### **3.7.4.1 Bypass de los sensores de presión**

A pesar de ser mínima la posibilidad de que los sensores de presión lleguen a fallar se consideró la opción de “bypasear” la medición de presión de tal manera que el sistema de control funcione sin esta medida. La activación del bypass está a cargo del personal de operación e ingeniería de la unidad de negocio y será activada mediante la pantalla HMI de control a la cual incorpora la opción de registro de usuario.

Es necesario hacer énfasis en que la decisión del aplicar esta medida está sujeta a un análisis previo del sistema y a la emergencia que requiera su uso.

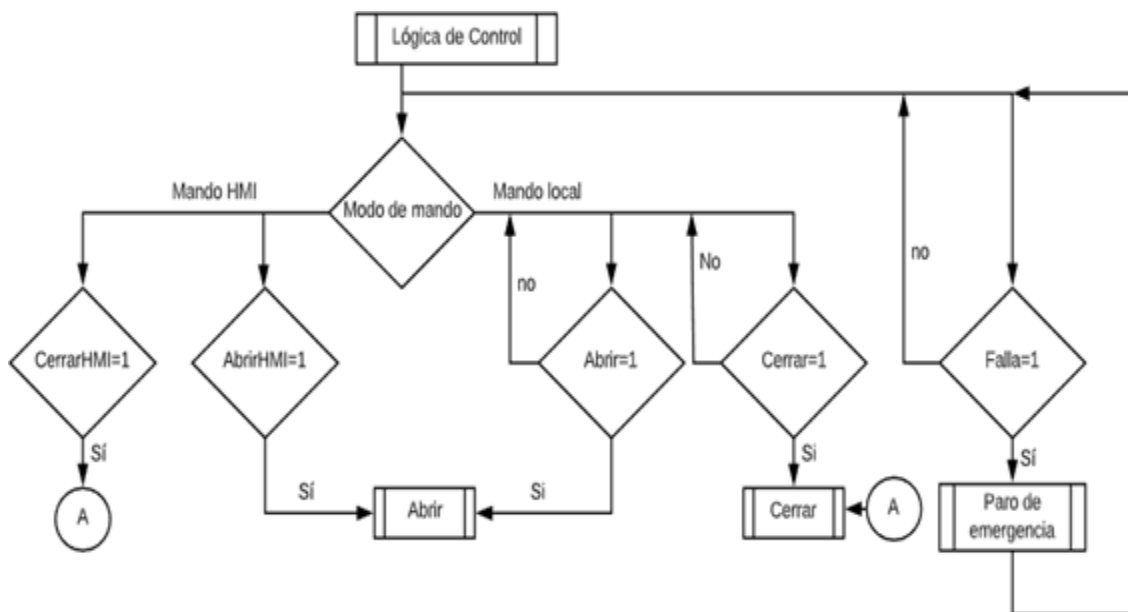
### 3.7.5 Bloque de función – Lógica de Control

En este bloque se indica la filosofía de control detallada en el apartado Análisis de la filosofía de control de la operación de la compuerta plana del desarenador Sin embargo, se tomaron en cuenta las nuevas capacidades del sistema:

- Selectores de modo de mando: Mando local (tablero de control principal a 1667 m.s.n.m.) o mando desde la HMI.
- El código del programa de control permite una implementación física a futuro de un tablero de control a la altura de las trabas en la cota de 1653 m.s.n.m.

**Figura 67**

*Diagrama de flujo de la lógica de control*



En subrutina de la lógica de control existen dos subrutinas que corresponden a las acciones de abrir y cerrar compuerta que funcionan en base a los siguientes diagramas de flujo:

Figura 68

Diagrama de flujo de la subrutina abrir

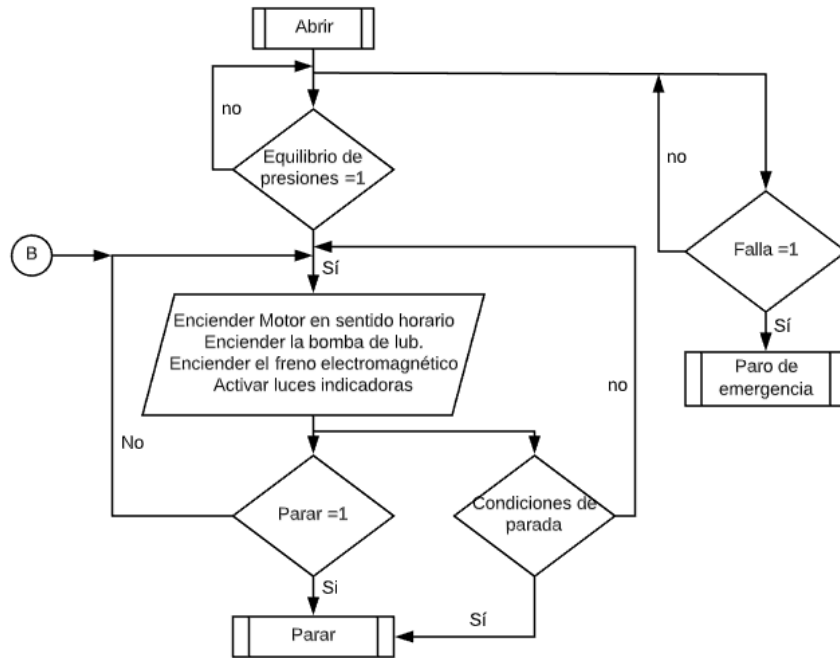
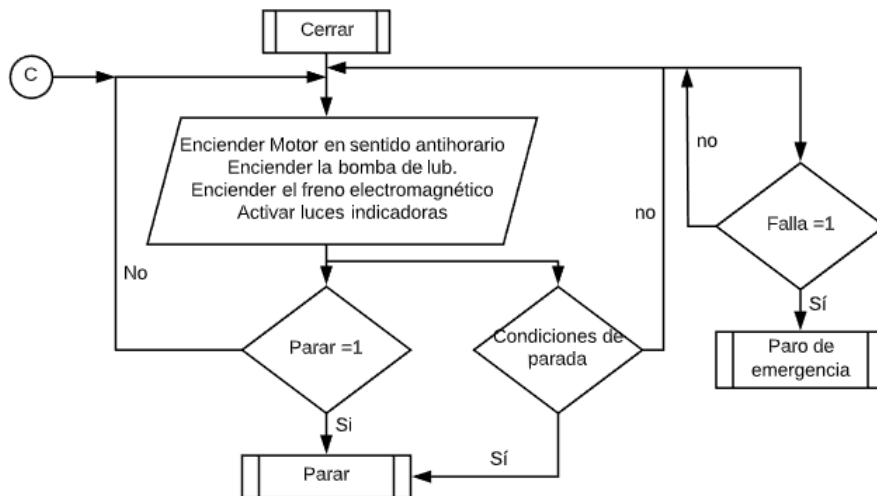


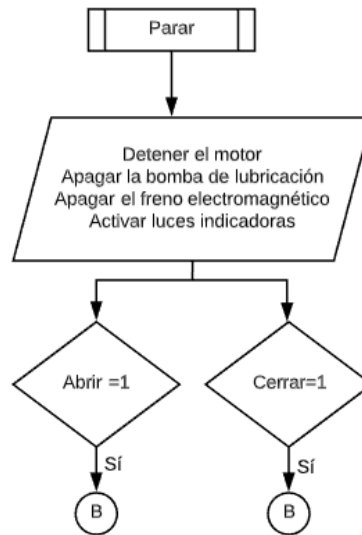
Figura 69

Diagrama de flujo de la subrutina cerrar



**Figura 70**

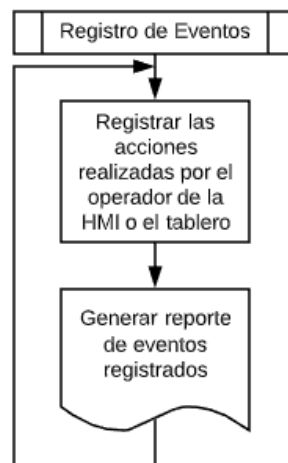
*Diagrama de flujo de la subrutina parar*



### 3.7.6 Función – Registro de Eventos

**Figura 71**

*Diagrama de flujo de la subrutina de registro de eventos*

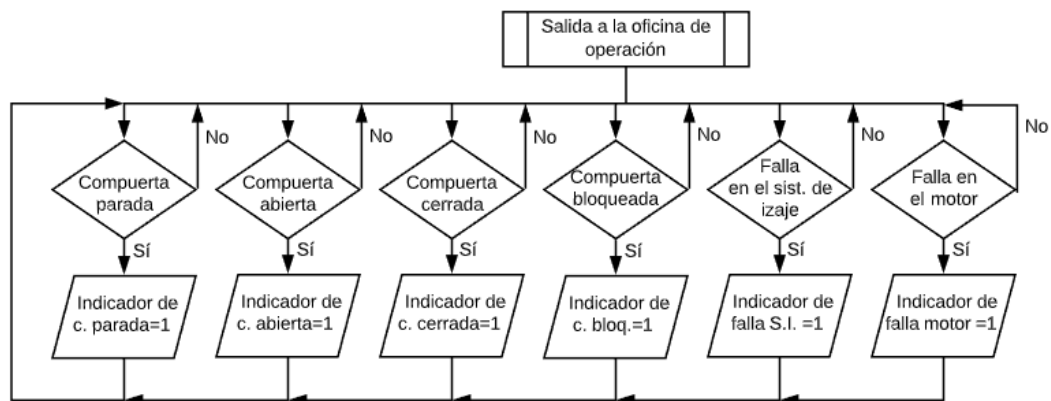


En este bloque se registran los eventos que el personal de operación realiza en el tablero de control principal y en el HMI para almacenarlos en un registro llamado Eventos que es transmitido mediante comunicación Modbus hacia el sistema SCADA de la oficina de operación. Los eventos que este bloque registra son: activación de pulsadores y posición de los selectores de modo mando.

### 3.7.7 Función – Salida a la Oficina de Operación

**Figura 72**

*Diagrama de flujo de la subrutina salida a la oficina de operación*



En este bloque de función se activan y desactivan las salidas a relé del módulo SM 1223 asignadas al sistema UAC de la oficina de operación. Estas salidas se activan a la par de las salidas asignadas a las luces indicadores del tablero de control principal.

### 3.8 Diseño de la Interfaz Humano Máquina

Estas interfaces sirven como medio de comunicación bidireccional entre el humano y el proceso o máquina, permitiendo visualizar el estado de las variables de proceso ejecutar acciones de control y monitoreo desde estas.

Como se mencionó anteriormente, también permiten enviar información al PLC para que este pueda tomar decisiones sobre el proceso que controla. Este intercambio de información puede estar orientado al ingreso de datos de ajuste, visualizar mensajes, alarmas, monitoreo en tiempo real de mediciones, etc. (Villacrés, 2017)

Estos dispositivos están directamente ligados a los sistemas SCADA debido a que brindan características de monitoreo y supervisión y pueden ser colocadas, como en este caso, en lugares estratégicos donde se centraliza la información como lo es la oficina de operación.

### **3.8.1 Normativas utilizadas para el diseño de HMIs**

Las normativas, guías o convenciones para el diseño de las interfaces humano – máquina sirven para garantizar resultados más eficaces, eficientes y seguros en el control de un proceso con la finalidad de reducir considerablemente los riesgos laborales por fallas humanas. (Villacrés, 2017)

En CELEC EP Unidad de Negocio Hydroagoyán la norma utilizada en el diseño de HMI es la Norma ISA 101, razón por la cual a continuación será detallada.

### **3.8.2 Norma ISA 101**

También conocida como ANSI/ISA-101.01-2015 está definida como un conjunto de acuerdos para el desarrollo de interfaces Humano – Máquinas dentro del ámbito de la automatización industrial con el fin de omitir el flujo innecesario de información para el operador para que de esta manera se aumente la eficiencia y se reduzca la sobrecarga de datos. Adicionalmente, provee al usuario las herramientas para diagnóstico, detección y respuesta ante situaciones anormales de proceso. (Villacrés, 2017)

Entre los aspectos que toma en cuenta la norma ISA 101 para el diseño de pantallas HMI tenemos:

- Selección de color y fondos
- Jerarquía de menús y pantallas emergentes
- Forma, agrupación y tamaño de los objetos
- Administración de usuarios, entre otras.

Todo HMI debe cumplir con los siguientes criterios esenciales:

- Ser de fácil comprensión y entendimiento para los operadores
- Evitar que se produzcan errores en la operación por parte de cualquier tipo de usuario
- Aumentar la productividad del operador
- Reducir el estrés generado por saturación de información innecesaria
- Reducir pérdidas significativas para la empresa por factores de recursos y tiempo.

#### **3.8.2.1 Normalización del uso de colores**

Para diferenciar una condición o estado importante no se debe utilizar únicamente un color de distinción ya que existen otras opciones que deben usarse en conjunto como: texto, tamaño, forma y posición y en el estricto caso de que sea necesario se puede usar la intermitencia.

Se debe utilizar principalmente los colores brillantes para llamar la atención sobre situaciones anormales de funcionamiento, de esta manera cuando el proceso se encuentre en una situación normal de funcionamiento la pantalla no debe mostrar colores saturados o brillantes como el color rojo o verde.



El color rojo y el amarillo se utilizan únicamente para representar condiciones relacionadas con las alarmas. A continuación se muestra los colores con su respectiva función en una Interface Humano – Máquina que obedece a la norma ISA 101:

**Figura 73**

*Descripción de colores en pantallas HMI*

Color	RGB Values	Sample	Defined Uses
Gray	213, 213, 213		Overall graphic background
White	255, 255, 255		Highlighting of some small items, e.g., PV Quality indications
Light Gray	243, 243, 243		ON indication for equipment
Gray	136, 136, 136		Off indication for equipment
Dark Gray	74, 74, 74		Some text, minor process lines
Black	0, 0, 0		Text and labels, major process lines, process vessel outlines. Dark Gray (64, 64, 64) can also be a good choice.
Dark Blue	0, 0, 215		Process values, controller modes and outputs, similar special purposes. Trend line for a single trended value.
Dark Green	0, 128, 0		Controller setpoints and other operator inputs, trend trace of setpoints
Light Green	153, 255, 102		Possible "faint green" for some specific highlighting
Light Blue	187, 224, 227		Desired operating ranges or conditions
Cyan	0, 255, 255		Vessel level strips, trend lines
Brown	204, 102, 0		Trend lines, position feedback indication
Pale Red (Pink)	255, 153, 204		Possible "faint red" for some specific indications
Red	255, 0, 0		Top level, priority one alarm
Yellow	255, 255, 0		Priority two alarm
Orange	255, 102, 0		Priority three alarm
Magenta	255, 0, 255		Priority four alarm for diagnostics
Dark Magenta	204, 0, 102		Trend lines

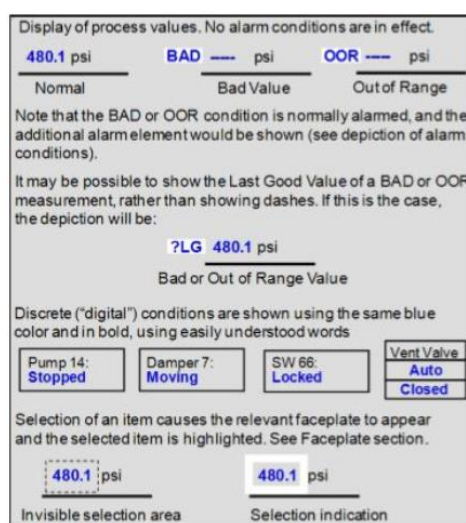
*Nota.* La gráfica muestra los colores permitidos usar en una interfaz HMI según la norma ISA-101.01 – 2015. Tomado de *Diseño e instalación de un sistema de control, supervisión y monitoreo para la compuerta de restitución tipo vagón de la central hidroeléctrica san francisco mediante el uso de un plc de una interfaz humano-máquina* (p.219), por M. Villacrés, 2017.

### 3.8.2.2 Representación de valores dinámicos en procesos

Los valores dinámicos generados en tiempo real de un proceso deben mostrarse de manera distinta al texto estático como se indica en la siguiente figura:

**Figura 74**

*Representación de valores en HMI*



*Nota.* La gráfica muestra consideraciones que se deben tomar para representar valores en el HMI según la normas ISA-101.01-2015. Tomado de *Diseño e instalación de un sistema de control, supervisión y monitoreo para la compuerta de restitución tipo vagón de la central hidroeléctrica san francisco mediante el uso de un plc de una interfaz humano-máquina* (p.221), por M. Villacrés, 2017.

De la Figura 74 se destacan las siguientes características:

- Los valores dinámicos están colocados en un color azul oscuro con negrilla de tal manera que resaltan adecuadamente con el texto estático en negro y el fondo gris

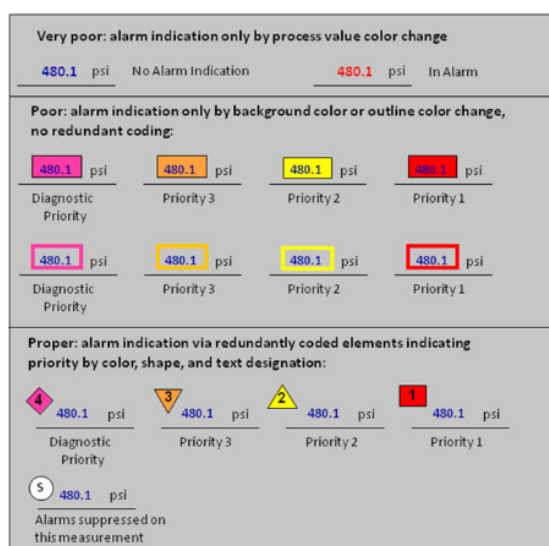
- Los ceros como valor inicial no se muestran (se indican como “---“), a excepción del caso en que existan valores decimales (Ej.: 0.50)
- Los valores se muestran dependiendo la precisión que necesita el personal de operación en función del proceso industrial
- Las unidades de medida son mostradas en texto negro sin negrilla cerca del valor medido

### 3.8.2.3 Representación de alarmas

Las alarmas deben ser representadas y codificadas según su prioridad, en este contexto se debe tener en cuenta: color, forma y texto. Los colores establecidos para las alarmas en la Figura 73 deben utilizarse únicamente para este fin.

**Figura 75**

*Representación de alarmas en la HMI*



*Nota.* La gráfica muestra la manera adecuada en la que deben representarse las alarmas según la norma ISA-101.01-2015. Tomado de *Diseño e instalación de un sistema de control*,

*supervisión y monitoreo para la compuerta de restitución tipo vagón de la central hidroeléctrica san francisco mediante el uso de un plc de una interfaz humano-máquina (p.224), por M. Villacrés, 2017.*

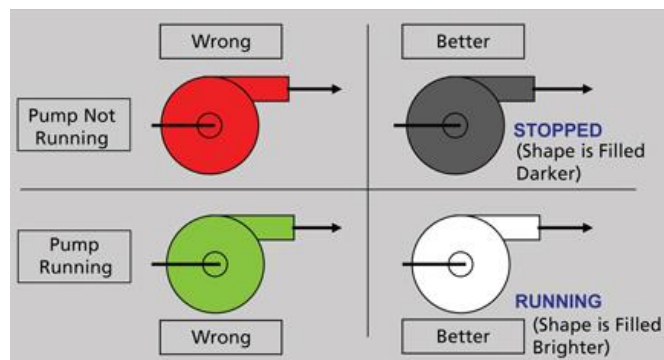
Cuando un objeto o un valor numérico entra en estado de alarma, aparece junto a él un indicador intermitente mientras la alarma prevalece; una vez que esta condición sea atendida desaparece. Esto debido a que para la visión periférica del operador es más sencillo detectar una intermitencia que únicamente el cambio de color.

### 3.8.2.4 Representación de los cambios de estado en una animación

Mediante el juego del brillo de un objeto se puede representar su estado de encendido/apagado acompañado de una palabra de su valor en el proceso. Para esto se sigue la siguiente recomendación: Los elementos que sean más brillantes que el fondo de la HMI se consideran encendidos, aquellos componentes más oscuros se valoran como apagados como se muestra a continuación:

**Figura 76**

*Representación de colores en HMI*



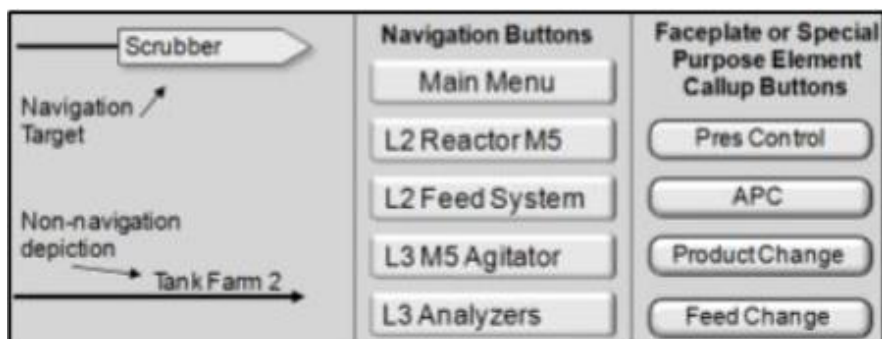
*Nota.* La gráfica muestra las recomendaciones para representar el cambio de estado de un objeto según la norma ISA-101.01-2015. Tomado de *Diseño e instalación de un sistema de control, supervisión y monitoreo para la compuerta de restitución tipo vagón de la central hidroeléctrica san francisco mediante el uso de un plc de una interfaz humano-máquina* (p.228), por M. Villacrés, 2017.

### 3.8.2.5 Representación de botones de mando y navegación

Toda pantalla HMI posee botones de navegación y en muchas ocasiones botones de comando. Los botones de navegación sirven para desplazarse y acceder a las otras pantallas a las cuales el operador tendría acceso. Estos botones deben ser simples y coherentes con el diseño y no deben parecerse entre sí, es decir, los botones de navegación no son iguales a los de comando.

**Figura 77**

*Objetos y botones de navegación*



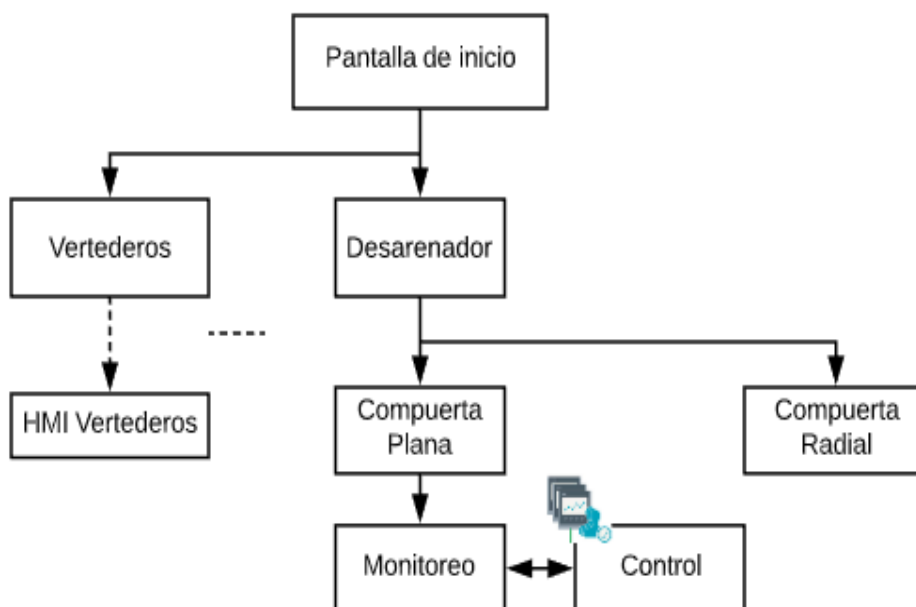
*Nota.* La gráfica muestra la diferencia entre los botones de acción y navegación como recomienda la norma ISA-101.01-2015. Tomado de *Diseño e instalación de un sistema de control, supervisión y monitoreo para la compuerta de restitución tipo vagón de la central*

*hidroeléctrica san francisco mediante el uso de un plc de una interfaz humano-máquina (p.230), por M. Villacrés, 2017.*

### 3.8.3 Arquitectura de las pantallas HMI

**Figura 78**

*Arquitectura de las pantallas HMI*

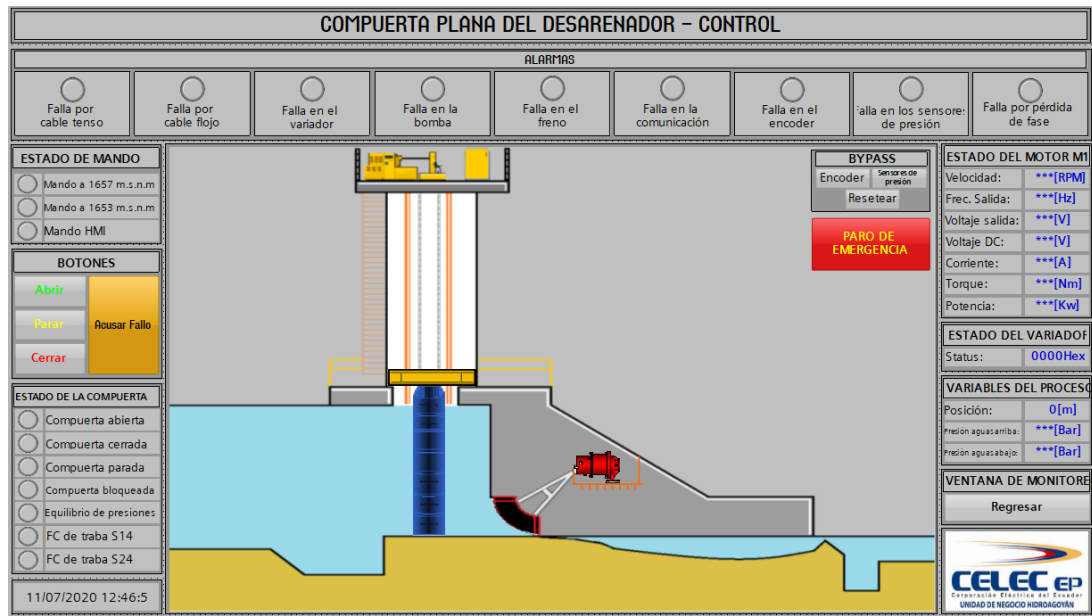


El diagrama de bloques de la Figura 78 indica el mapa de distribución de las pantallas HMI inmersas en el sistema SCADA de la represa de Hidroagoyán. De esta podemos destacar que existen 4 niveles de acceso previos al ingreso a las pantallas diseñadas de operación y monitoreo de la compuerta plana del desarenador.

### 3.8.4 Diseño de la pantalla de control

Figura 79

*Diseño de la pantalla de control*

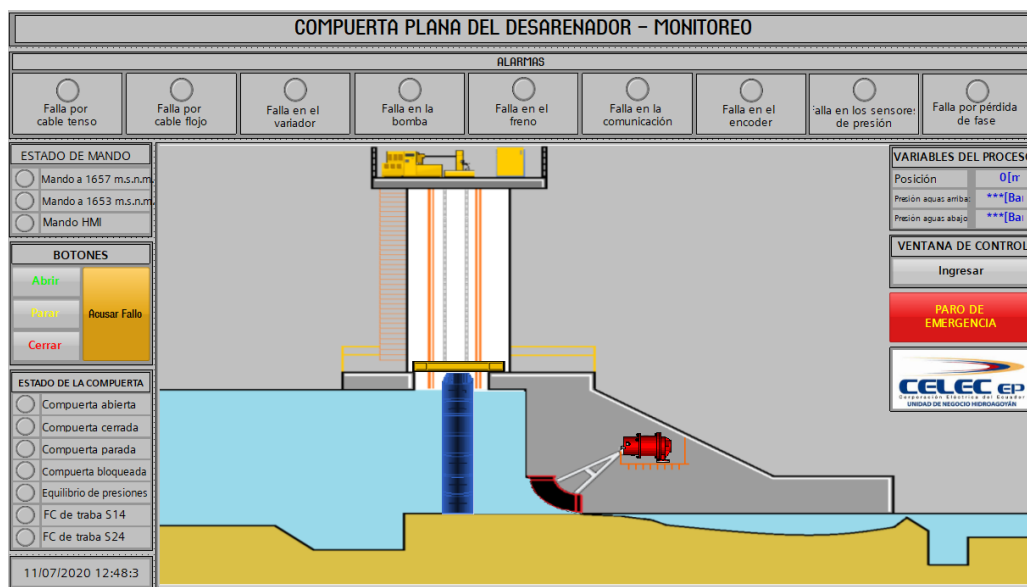


La pantalla de control es la ventana principal del proceso ya que en esta se tendrá la mayor cantidad de información y variables de proceso. En esta se colocará los parámetros del motor, el valor de los instrumentos de medición, el estado de la compuerta (abierta, cerrada, bloqueada, etc.) los botones de control y los indicadores de alarmas y estados de mando. Para ingresar a esta pantalla es necesario colocar el usuario y contraseña debido a implicación que tiene su manipulación.

### 3.8.5 Diseño de la pantalla de monitoreo

Figura 80

*Diseño de la pantalla de monitoreo*



Esta pantalla está diseñada para el monitoreo de la compuerta plana y en esta se muestra menos información que en la pantalla de control de tal manera que la atención del operador se dirija hacia los puntos de interés como alarmas y estado de la compuerta.

Ambas pantallas disponen de elementos de animados que ayudan a mejorar la percepción del usuario sobre el desarrollo del proceso. Su diseño está basado en la normativa mencionada con anterioridad.



## Capítulo IV

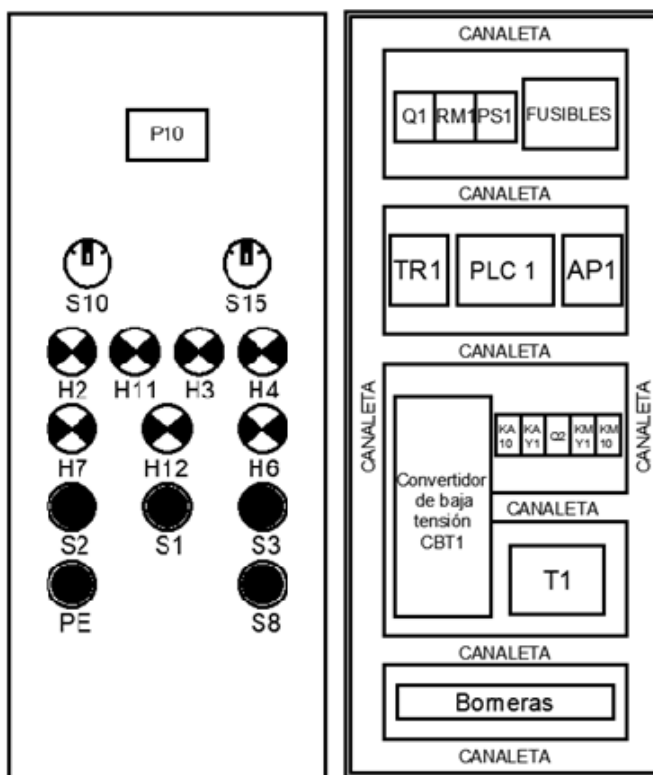
### 4. Implementación y montaje

En este capítulo se detalla el procedimiento de la construcción del tablero principal de control con su respectiva base, el desmontaje del tablero antiguo y sus elementos asociados como cableado, fines de carrera, transmisor de presión y transmisor de posición; y el montaje de los nuevos elementos que forman el sistema de control automático de la compuerta plana del desarenador.

#### 4.1 Implementación del tablero de control principal

**Figura 81**

*Distribución de los elementos en: izq.: puerta y der.: doble fondo del tablero*



Se consideró la manera más eficiente de colocar los elementos en la lámina metálica de sujeción de elementos (doble fondo del tablero) y en su puerta de tal forma que exista un orden y espaciado adecuado entre los elementos, así como el aprovechamiento total del espacio.

En la parte derecha de la Figura 81 se muestra la distribución final de los elementos en el doble fondo del tablero; se puede apreciar que de manera descendente los elementos se ubicaron respetando el siguiente orden: elementos de protección, elementos de control y comunicación, elementos para la transición de control a fuerza y borneras.

Por otro lado en el lado izquierda de la Figura 81 se indica la distribución de los pulsadores, selectores, luces indicadoras y el indicador de posición en la puerta del tablero; estos componentes siguen el siguiente orden descendente: indicador de posición, selectores, luces indicadoras y pulsadores.

#### **4.1.1 Implementación de los elementos eléctricos, cableado y etiquetado**

Los elementos utilizados fueron anclados al doble fondo siguiendo las recomendaciones de montaje mencionadas en cada uno de sus respectivos manuales, después se procedió a realizar las conexiones eléctricas basándose en sus respectivos planos.

El cableado se realizó respetando la condición de máximo dos cables por borne y mediante el uso de terminales adecuados para cada elemento teniendo en cuenta el tipo de borne. El etiquetado de los cables se realizó en base a las numeraciones colocadas en los planos eléctricos y a la nomenclatura utilizada por la empresa.

**Figura 82**

*Tablero de control principal terminado*



En la figura se muestra el tablero de principal de control terminado en base al diseño mostrado en la Figura 81.

#### **4.2 Montaje del tablero de control principal**

Para realizar el montaje del tablero de control principal se procedió a retirar el antiguo tablero y a realizar el mantenimiento de la base de sujeción del tablero. Adicionalmente se añadió un soporte extra que permite impermeabilizar los ductos de conducción que conectan la loza con el tablero.

Para desmontar el antiguo tablero se implementaron las debidas medidas de seguridad como la desconexión del suministro de energía eléctrica del bloque 13 y coordinación con las áreas mecánicas y de operación.

Además se desmontaron los antiguos ductos de conducción de cables, cableado de control, fines de carrera y sensores de presión para colocar los nuevos elementos.

Para el tablero de montaje se utilizó el polipasto de izaje que dispone el bloque 13 para elevar el tablero desde la corona de la represa hasta su ubicación final.

### **Figura 83**

*Montaje del tablero de control principal*



#### **4.3 Montaje del encoder SICK S4PA10000**

Se retiró el antiguo transmisor de posición y se aprovechó el buen estado del matrimonio de sujeción y la coincidencia de este en sus dimensiones con el encoder para reutilizarlo y conectarlo al eje de medición del sistema de cajas reductoras.

**Figura 84**

*Montaje del encoder SICK S4PA10000*



#### **4.4 Montaje de los fines de carrera Omron WLCA2-LS**

Se colocaron cuatro fines de carrera en el sistema de detección de fallas de izaje, dos para la detección de traba colocada y uno para verificar el estado de compuerta bloqueada.

**Figura 85**

*Montaje de los fines de carrera*



#### 4.5 Montaje de los sensores de presión SITRANS P220

Se hizo el descenso hasta la cota de 1628 m.s.n.m. y se procedió a reemplazar los sensores de presión haciendo uso de las válvulas de mantenimiento mostradas en la Figura 18. Se aprovechó el buen estado de los conductores existentes.

#### Figura 86

*Montaje de los sensores de presión SITRANS P220*



## Capítulo V

### 5. Pruebas y resultados

En este apartado se detallan las pruebas de funcionamiento y conectividad realizadas entre los dispositivos de control instalados, así como los resultados obtenidos.

#### 5.1 Pruebas en el sistema de comunicación

Esta prueba consiste en evaluar la conectividad entre los dispositivos que forman parte de la red LAN, para eso se utilizaron distintos medios de diagnóstico explicados a continuación:

##### 5.1.1 Prueba de comunicación del CBT

**Tabla 45**

*Resultado de la prueba de comunicación con el CBT – operación normal*

Parámetros de inicio		Modo de mando: Local		
Acción	Compuerta	Tablero	HMI	Proceso
Operación normal	Abierta	H2 = ON	Compuerta abierta	Compuerta abierta
	Cerrada	H3 = ON	Compuerta cerrada	Compuerta cerrada
	Abriendo	H2 oscila a 1 Hz	Compuerta abriendo	Abre la compuerta
	Cerrando	H3 oscila a 1 Hz	Compuerta cerrando	Cierra la compuerta

**Tabla 46**

*Resultado de la prueba de comunicación con el CBT – condición de falla*

Parámetros de inicio			Modo de mando: Local	
Acción	Compuerta	Tablero	Resultados HMI	Proceso
Desconexión del cable RS- 485	Abierta	H7 = ON	Activación de la alarma de falla en la comunicación	Compuerta abierta
	Cerrada	H7 = ON	Activación de la alarma de falla en la comunicación	Compuerta cerrada
	Abriendo	H7 = ON	Activación de la alarma de falla en la comunicación	Parada rápida de la compuerta
	Cerrando	H7 = ON	Activación de la alarma de falla en la comunicación	Parada rápida de la compuerta

La instrucción MB\_CLIENT dispone de una bandera llamada “Connected” que se activa cuando la comunicación CLIENTE-SERVIDOR es establecida. Mediante el uso de esta variable se monitorea constantemente que exista enlace entre ambos dispositivos, para verificar su funcionamiento se simuló la falla desconectado uno de los cables de comunicación como se muestra en la

Tabla 46.

### 5.1.2 Prueba de comunicación con de la pasarela USR-TCP232-410s

Para verificar la conexión con la pasarela se hace uso del símbolo de sistema con el comando “ping 192.168.0.133” el cual permite comprobar el estado de la conexión enviando solicitudes de comunicación hacia el dispositivo de red destino.



El sistema también puede detectar un fallo en la pasarela, sin embargo esta detección es realizada de manera indirecta, teniendo en cuenta que la pasarela es un dispositivo “transparente” si llegara a existir un error en este dispositivo el sistema lo detectaría como falla de comunicación con el CBT y la tabla de prueba de comunicación obedece a la

Tabla 46.

### 5.1.3 Prueba de comunicación con el módulo SCALANCE W761-1

Al ser un dispositivo de red la prueba de comunicación se la realiza usando el símbolo de sistema con el comando “ping 192.168.0.132”. El sistema está blindado contra una posible falla de comunicación con este módulo que es el encargado de enviar los datos al sistema SCADA, sin embargo, esta validación está pensada para funcionar únicamente cuando se requiere operar la compuerta desde la HMI. Si el selector de modo de mando se encuentra en modo local la validación de falla de comunicación con el sistema SCADA es desactivada.

Tabla 47

*Resultado de la prueba de comunicación con el W761-1 – operación normal*

Parámetros de inicio		Modo de mando: A distancia		
Acción	Compuerta	Tablero	HMI	Proceso
Operación normal	Abierta	H2 = ON	Compuerta abierta	Compuerta abierta
	Cerrada	H3 = ON	Compuerta cerrada	Compuerta cerrada
	Abriendo	H2 oscilando a 1 Hz	Compuerta abriendo	Abre la compuerta

Cerrando      H3 oscilando a 1 Hz      Compuerta cerrando      Cierra la compuerta

**Tabla 48**

*Resultado de la prueba de comunicación con el W761-1 – condición de falla*

Parámetros de inicio		Modo de mando: A distancia		
Acción	Compuerta	Tablero	HMI	Proceso
Desconexión del cable ethernet	Abierta	H7 = ON	Sin conexión	Compuerta abierta
	Cerrada	H7 = ON	Sin conexión	Compuerta cerrada
	Abriendo	H7 = ON	Sin conexión	Parada rápida de la compuerta
	Cerrando	H7 = ON	Sin conexión	Parada rápida de la compuerta

## 5.2 Pruebas en el sistema de instrumentación

Las pruebas a las que se sometió el sistema de instrumentación tienen como finalidad determinar el comportamiento de la compuerta en diversos escenarios como son: funcionamiento normal y simulación de falla de los equipos de medición.

### 5.2.1 Pruebas en el encoder SICK S4PA10000

Se le aplicó las dos pruebas a este instrumento las mismas que comprueban un comportamiento seguro del sistema automático de operación de la compuerta plana del desarenador, a continuación se muestran los resultados obtenidos:

**Tabla 49***Resultado de la prueba del encoder en operación normal*

Parámetros de inicio		Modo de mando: Local/Distancia		
Acción	Compuerta	Tablero	Resultados	
			HMI	Medición
Operación normal	Abierta	H2 = ON	Compuerta Abierta	34 [m]
	Cerrada	H3 = ON	Compuerta cerrada	0 [m]
	Abriendo	H2 oscila a 1 Hz	Compuerta abriendo	variable
	Cerrando	H3 oscila a 1 Hz	Compuerta cerrando	variable

**Tabla 50***Resultado de la prueba del encoder simulando condición de falla*

Parámetros de inicio		Modo de mando: Local/Distancia		
Acción	Compuerta	Tablero	Resultados	
			HMI	Proceso
Desconexión del instrumento	Abierta	H7 = ON	Falla en el encoder	Compuerta abierta
	Cerrada	H7 = ON	Falla en el encoder	Compuerta cerrada
	Abriendo	H7 = ON	Falla en el encoder	Parada rápida de la compuerta
	Cerrando	H7 = ON	Falla en el encoder	Parada rápida de la compuerta

Adicionalmente se realizó una prueba para verificar que las marcas asociadas a las posiciones de abrir, cerrar y sobre las trabas son activadas en la medición adecuada:

**Tabla 51**

*Resultado de la prueba del encoder prueba de marcas*

Parámetros de inicio			Modo de mando: Local/Distancia		
Marca	Compuerta	Tablero	Resultados		
			HMI	Proceso	Medición
MS22	Abierta	H2 = ON	Compuerta Abierta	Compuerta abierta	34 [m]
MS23	Cerrada	H3 = ON	Compuerta cerrada	Compuerta cerrada	0 [m]
Mtraba	Sobre las trabas	-	Compuerta intermedia	Compuerta sobre las trabas	20 [m]

### 5.2.2 Pruebas en los sensores de presión SITRANS P220

De igual manera, se realizó pruebas en modo de operación normal y simulando la condición de falla:

**Tabla 52**

*Resultado de la prueba de los sensores de presión en operación normal*

Parámetros de inicio		Modo de mando: Local/Distancia			
Acción	Compuerta	Tablero	Resultados		
			HMI	SPAa	SPAb
Operación normal	Abierta	H2 = ON	Aa: 1.9 [Bar] Ab: 1.9 [Bar]	1.9 [Bar]	1.9 [Bar]
	Cerrada	H3 = ON	Aa: 1.9 [Bar] Ab: 0 [Bar]	1.9 [Bar]	0 [Bar]
	ABRIENDO	H6 = ON H2 = ON-1Hz	Aa: 1.9 [Bar] Ab: 1.9 [Bar]	1.9 [Bar]	1.9 [Bar]
	CERRANDO	H6 = OFF H3 = ON-1Hz	Aa: 1.9 [Bar] Ab: var. [Bar]	1.9 [Bar]	variable

Tabla 53

*Resultado de la prueba de los sensores de presión simulando condición de falla*

Parámetros de inicio		Modo de mando: Local/Distancia				
Acción	Compuerta	Tablero	Resultados			Proceso
			HMI	SPAa	SPAb	
Desconexión del instrumento	Abierta	H2 = ON	Aa: error Ab: error	error	error	Compuerta abierta
	Cerrada	H3 = ON	Aa: error Ab: error	error	error	Compuerta cerrada
	ABRIENDO	H6=ON H2=ON-1Hz	Aa: error Ab: error	error	error	Parada rápida de la compuerta
	CERRANDO	H6=ON H3=ON-1Hz	Aa: error Ab: error	error	error	Parada rápida de la compuerta

Tabla 54

*Resultado de la prueba de equilibrio de presiones*

Parámetros de inicio		Modo de mando: Local/Distancia			
Acción	Compuerta	Tablero	Resultados		
			HMI	SPAa	SPAb
Apertura de la válvula de equilibrio de presiones	Abierta	H6 = ON H2 = ON	Compuerta abierta Equilibrio de presiones	SPAa = SPAb	SPAb = SPAa
	Cerrada	H6 = ON H3 = OFF	Compuerta cerrada Presión Ab aumenta	SPAa = cte	SPAb incrementa hasta igualar a SPAa
	ABRIENDO	H6=ON H2=ON-1Hz	Compuerta abriendo Equilibrio de presiones	SPAa = SPAb	SPAb = SPAa
	CERRANDO	H6=OFF H3=ON-1Hz	Compuerta cerrando Presión Ab disminuye	SPAa = cte	SPAb disminuye hasta un valor mínimo

### 5.3 Pruebas en el sistema de control

#### 5.3.1 Prueba del selector de modo de mando

Se realizó la prueba de la alternancia entre los modos de mando local y a distancia conmutando el selector entre ambas posiciones, los resultados fueron los siguientes:

**Tabla 55**

*Resultado de la prueba de conmutación del selector de modo de mando*

Parámetros de inicio		Modo de mando inicial: Mando conmutado			
Acción	Compuerta	Resultados			
		Tablero	HMI AC	HMI DC	Proceso
Conmutación de mando local a distancia	Abierta	H2 = ON	Mando local	Mando a distancia	Compuerta abierta
	Cerrada	H3 = ON	Mando local	Mando a distancia	Compuerta cerrada
	ABRIENDO	H2 = ON - 1Hz	Mando local	Mando a distancia	Parada rápida de la compuerta
	CERRANDO	H3 = ON - 1Hz	Mando local	Mando a distancia	Parada rápida de la compuerta
Conmutación de mando a distancia a mando local	Abierta	H2 = ON	Mando a distancia	Mando local	Compuerta abierta
	Cerrada	H3 = ON	Mando a distancia	Mando local	Compuerta cerrada
	ABRIENDO	H2 = ON - 1Hz	Mando a distancia	Mando local	Parada rápida de la compuerta
	CERRANDO	H3 = ON - 1Hz	Mando a distancia	Mando local	Parada rápida de la compuerta

### 5.3.2 Operación abrir

**Tabla 56**

*Resultado de la prueba de la apertura de la compuerta*

Estado de la compuerta	Condiciones								Acción
	E.P.	F	S.T.	S14	S24	S35	MS22	MS23	
Cerrada o parada	Si	No	No	No	No	No	No	Si	Abrir compuerta
	No	No	Si	Si	Si	Si	No	No	
	No	x	x	x	x	x	x	Si	Ninguna
	X	Si	x	x	x	x	x	x	
	x	No	No	Si	Si	x	No	X	
X	No	x	x	x	x	Si	No		

### 5.3.3 Operación cerrar

**Tabla 57**

*Resultado de la prueba del cierre de la compuerta*

Estado de la compuerta	Condiciones								Acción
	E.P.	F	S.T.	S14	S24	S35	MS22	MS23	
Abierta o parada	x	No	Si	No	No	No	Si	No	Cerrar compuerta
	x	No	Si	No	No	Si	No	No	
	x	No	No	x	x	x	No	No	Ninguna
	x	Si	x	x	x	x	x	x	
	x	No	x	x	x	x	x	Si	
	x	No	Si	Si	Si	Si	No	No	

### 5.3.4 Prueba del paro de emergencia

**Tabla 58**

*Resultado de la prueba del paro de emergencia*

Fallas	Eventos					Observaciones
	Motor	Bomba	Freno	H7	HMI	
Paro de emergencia	OFF	OFF	OFF	ON-1Hz	Alerta de emergencia	Parada rápida
Comunicación	OFF	OFF	OFF	ON	Indicador activado	Parada rápida
Convertidor	OFF	OFF	OFF	ON	Indicador activado	Parada rápida
Cable tenso	OFF	OFF	OFF	ON	Indicador activado	Parada rápida
Cable flojo	OFF	OFF	OFF	ON	Indicador activado	Parada rápida
Bomba de lubricación	OFF	OFF	OFF	ON	Indicador activado	Parada rápida
Freno electromag.	OFF	OFF	OFF	ON	Indicador activado	Parada rápida
Encoder	OFF	OFF	OFF	ON	Indicador activado	Parada rápida
Sensores de presión	OFF	OFF	OFF	ON	Indicador activado	Parada rápida
Alimentación	OFF	OFF	OFF	ON	Indicador activado	Parada rápida

### 5.3.5 Prueba del indicador de posición vs HMI

**Tabla 59**

*Resultado del indicador de posición vs HMI*

Posición P10 [m]	Posición HMI		Observación
	[m]	[m]	
0.0	0.0	0.0	Comp. cerrada
20.0	20.0	20.0	Comp. sobre trabas
34.0	34.0	34.0	Comp. abierta

### 5.3.6 Prueba de luces indicadoras

En la prueba de luces indicadoras se toma en cuenta que el selector de modo de luces indicadoras se encuentre en la posición de operación. Al final de la tabla se muestra el resultado



obtenido al colocar el modo de pruebas de luces indicadoras destinado a identificar el estado de los bulbos de las luces, este modo no afecta a las pantallas de monitoreo y control de la HMI.

**Tabla 60**

*Resultado de las pruebas de luces indicadoras*

Estados	Luces indicadoras						HMI
	H1	H2	H3	H6	H7	H35	
Abierta	OFF	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	Comp. abierta
Abriendo	OFF	ON-1Hz	OFF	ON	OFF	OFF	Aviso comp. Abriendo
Parada sobre trabas	ON	OFF	OFF	x	OFF	OFF	Comp. sobre trabas
Parada y bloqueada	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	Comp. bloqueada
Parada bajo trabas	ON	OFF	OFF	x	OFF	OFF	Comp. bajo trabas
Cerrada	OFF	OFF	ON	OFF	OFF	OFF	Comp. cerrada
Cerrando	OFF	OFF	ON-1Hz	OFF	OFF	OFF	Aviso comp. cerrando
Equilibrio de presiones	x	x	x	ON	OFF	x	Eq. presiones
Paro de emergencia	x	x	x	x	ON-1Hz	x	Alerta de PE
En falla	x	x	x	x	ON	x	Según falla
Prueba de Luces Ind.	ON	ON	ON	ON	ON	ON	N/A

## Capítulo VI

### 6. Conclusiones y recomendaciones

Los dispositivos de control, instrumentación, así como las protecciones eléctricas y sistemas de comunicación pertenecen a la gama industrial, por lo tanto, se rigen a normativas nacionales e internacionales, prueba de esto son las variadas certificaciones que se muestran en sus respectivas hojas técnicas. Además estos dispositivos son capaces de operar los treientos sesenta y cinco días del año sin inconvenientes debido a su verificada robustez por variadas empresas. En base a lo anterior se concluye que la automatización de la compuerta plana del desarenador mejoró notablemente su confiabilidad ya que dispone de elementos de medición actuales y diseñados para entornos industriales.

Se utilizó al máximo los recursos de software y de hardware con el fin de mejorar la seguridad de los usuarios, prueba de esto son los resultados obtenidos en: la Tabla 46, Tabla 48, Tabla 50 y Tabla 53 en las que se comprueba que el sistema responde con una parada rápida configurada a cero segundos para detener el proceso de apertura o cierre de la compuerta en caso de presentarse un evento anómalo.

Se consideraron la mayor cantidad de fallas que se puedan presentar de tal manera que la probabilidad de ocurrir un evento inesperado en la manipulación de la compuerta sea casi nula, estos eventos incluyen: falla en el transmisor de posición, falla en los sensores de presión, falla en la alimentación del sistema, falla en la bomba de lubricación, en el freno electromagnético, falla en las redes de comunicación y fallas en el sistema de izaje.

El diseño de la interfaz HMI fue supervisado por las tres áreas que tienen contacto directo con el proceso, socializando e intercambiando ideas para obtener un diseño que cumpla con las exigencias del personal; esto permitió que las áreas se integren más con este proceso y que las pantallas diseñadas provean de todas las herramientas necesarias para el personal se sienta seguro al momento de manipular la compuerta plana.

Los datos del motor mostrados en la HMI permiten al personal eléctrico y electrónico programar mantenimientos preventivos de manera eficiente de tal forma que se evitarán acciones rutinarias y por ende optimizando el tiempo de los trabajadores.

La seguridad fue el eje central en la programación del software de control, en esta se incluyeron validaciones de todo tipo como: desconexiones de los instrumentos, fallas en la alimentación, desconexión de la comunicación, entre otras que fueron puestas a pruebas con resultados positivos como evidencias las tablas del capítulo cinco.

El uso de dispositivos de la misma casa comercial, en este caso Siemens, permite aprovechar al máximo los recursos de software.

Existen varias maneras de controlar al convertidor de baja tensión, en el diseño se tomaron en cuenta dos opciones: mediante el uso de salidas del controlador conectadas a las entradas del CBT y mediante comunicación Modbus; la primera opción es más sencilla de implementar, sin embargo se haría uso de las salidas físicas del PLC lo que hubiese llevado a utilizar un módulo más de salidas, así como también más cableado, conectores, etc. Mediante el uso de la comunicación Modbus se redujo la cantidad hardware en el tablero y se optimizaron los recursos disponibles.

Establecer los enlaces de comunicación fue el pilar fundamental en el desarrollo de este proyecto, para esto se debe entender a la perfección cómo funciona el protocolo Modbus y las implicaciones que conlleva utilizarlo, de tal manera que sea aprovechado al máximo.

En el desarrollo técnico de este proyecto resulta de vital importancia conocer las prestaciones que brinda cada equipo, de tal manera que se puedan ser explotadas al máximo, de esta manera se pueden reducir costos por gastos innecesarios.

El desarrollo del proyecto permitió plasmar los conocimientos adquiridos a lo largo del desarrollo de la carrera de ingeniería en electrónica, automatización y control, así mismo de afianzarlos en un entorno industrial de gran importancia para el desarrollo del país como lo es el sector energético.

Antes de armar el tablero de control es importante realizar pruebas de laboratorio en las que se simule de la manera más precisa los escenarios a los que va a enfrentarse el sistema de control, de tal manera que se perfeccione el algoritmo de control. Esta etapa fue la más larga en el desarrollo del proyecto debido a la cantidad de pruebas de laboratorio que se hizo para obtener un control robusto de la compuerta plana. Estas pruebas también sirven para verificar el uso adecuado de los equipos considerados en el diseño.

En un inicio el diseño contemplaba el mando del freno electromagnético desde el controlador principal, el PLC, sin embargo en las pruebas de puesta en marcha se pudo constatar que la apertura y cierre del freno no se realizaban en el momento preciso provocando que la compuerta se desplace involuntariamente al momento de parar, por otro lado, al momento de abrir el CBT arrojaba un error de sobre corriente. Esto se debe a que en el primer caso el freno se “suelta” después de que el motor se detuvo provocando el deslizamiento, y el

segundo caso el freno se queda “enganchado” provocando que el motor no gire libremente y produciendo sobre corriente. Para dar solución a este inconveniente se utilizó la función tecnológica del convertidor “Freno de Mantenimiento”; esta permite activar o desactivar el freno mediante una de las salidas digitales del CBT en función de la configuración de parámetros específicamente destinados a este objetivo, estos permiten modificar el tiempo de apertura y cierre del freno en función de la velocidad y flujo de magnetización del motor provocando que el freno se activado y desactivado justo en el momento preciso.

El enlace de comunicación WLAN mediante el estándar IEEE 802.11h resultó ser robusto y eficiente para entablar la comunicación entre el bloque 13 y la oficina de operación a pesar de estar ubicado a una distancia que rosa con el límite establecido por el fabricante de la antena en su hoja de datos.

Como implementación a futuro se recomienda instalar el tablero de control en la cota de 1653 m.s.n.m. ya que, en base a los resultados obtenidos en la encuesta, este tablero resulta de gran utilidad para el personal de mantenimiento mecánico y el personal de operación. El controlador posee asignadas las entradas necesarias y programada la lógica de control para esta futura implementación. Adicionalmente, se añadieron las validaciones necesarias para que se instale un selector de modo de mando para el futuro tablero de 1653 m.s.n.m. que permitirá intercambiar el modo de mando de manera segura, de tal modo que solo se pueda manipular el proceso desde un solo punto. Además, el HMI también está configurado para adaptarse a este cambio.

Las tareas de mantenimiento del nuevo tablero de control son reducidas debido a los elementos utilizados; la electrónica actual y las condiciones a las que está expuesto el tablero de

control limitan estas actividades a limpieza y ajuste, sin embargo existen dos componentes electromecánicos (contactores de bomba de lubricación y freno electromagnético) los cuales se recomienda realizar las actividades de mantenimiento preventivo como ajuste y prueba de bobinas para alargar su tiempo de vida.

El HMI brinda la posibilidad de activar los “Bypass” para el encoder, los sensores de presión o ambos en el peor de los casos, sin embargo si esta decisión es tomada se recomienda que el personal de operación, eléctrico/electrónico y mecánico supervise el proceso de apertura y cierre de la compuerta durante todo su trayecto, de tal manera que la operación sea segura para todo el personal y para los equipos involucrados.

## 7. Referencias

ABB. (2010). Miniature circuit breakers. In ABB, *S200 Series*.

ABB. (2017). Pcb relays, optocouplers and accessories. In ABB, *Data Sheet*.

Camsco. (2020). *RT18-32A Fuse Base*. Retrieved from

[https://www.camsco.com.tw/upload\\_files/catalog/fuse-link-base/RT18-32A.pdf](https://www.camsco.com.tw/upload_files/catalog/fuse-link-base/RT18-32A.pdf)

Castro, C., & Alvarado, J. (2017). *Implementación de una Red Modbus TCP Wireless con Integración de Tecnología Siemens y Schneider para Prácticas Estudiantiles del Laboratorio de Automatización Industrial*. Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil.

CONELEC. (2011). Estadística del Sector Eléctrico Ecuatoriano. *Folleto resumen*.

Consult, T. (1987). *Volumen de Gráficos*.

Corrales, L. (2007, Octubre). Instrumentación Industrial. Quito, Pinchincha, Ecuador.

Domínguez, E., & Logroño, D. (2010). *Diseño e Implementación del Control Automático y Monitoreo del Nivel del Embalse en la Central Hidroeléctrica Agoyán*.

Endress+Hauser. (2009). *Functional Safety Manual RIA45*.

Escudero, A. (2007). Estándares en Tecnologías Inalámbricas. In B. Roger, *Unidad 2*.

Gavilanez, M. (2011). *Sistema de control y supervisión de las compuertas del vertedero 1 de la represa Agoyán por medio de un panel HMI local*. Riobamba.

- Goya, K. (2015). Desarrollo e Implementación de una Interfaz en el Software Labview NI, que Permita el Accionamiento, Monitoreo y la Puesta en Marcha de los Variadores G120C a través del Protocolo de Comunicación Modbus RTU. Guayaquil, Guayas, Ecuador.
- Hernández, R. (2010). *Introducción a los sistemas de control*. México: Pearson.
- Hidroagoyan. (2020, 02 05). *CELEC EP*. Retrieved from <https://www.celec.gob.ec/hidroagoyan/index.php/centrales/agoyan>
- Hurtado, J. (2015). *Introducción a las redes de Comunicación Industrial*. Retrieved from <https://josemariahurtadotorres.wordpress.com/2015/10/25/introduccion-a-las-redes-de-comuniacion-industrial>
- López, A. (2013). *Bases para el Diseño Hidráulico de la Estructura de Salida, Canal de Recolección y Tanque de Carga entre  $20 \text{ m}^3/\text{s} \geq Q \geq 2 \text{ m}^3/\text{s}$  para Desarenadores en Aprovechamientos Hidroeléctricos*. Quito.
- Marín, A. (2010). *Control de PLCs Siemens s7-1200 mediante el protocolo Modbus a través del programa Labview para realización de prácticas de comunicación industrial*.
- Mitsubishi Electric, C. (1984). Proyecto Hidroeléctrico Agoyán. In I. E. Electrificación, *Schematic Diagram for DAM Equipment*.
- Omron. (2017). *Two-circuit Limit Switch*.
- Orozco, F. (2015). Diseño e implementación de un prototipo de control y comunicación por internet para reporte de procesos industriales para toma de decisiones a nivel gerencial.



*Maestría en redes de comunicación*. Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Quito, Pichincha, Ecuador.

Pescarmona, I. M. (1983). Proyecto Hidroeléctrico Agoyán. In D. -C. Plana, *Catálogos de Elementos Comerciales*. Ministerio de Recursos Naturales y Energéticos.

Pescarmona, I. M. (1983). Proyecto Hidroeléctrico Agoyán. In C. P. Desarenador, *Manual de Operaciones*. Ministerio de Recursos Naturales y Energéticos.

Rosado, A. (2009). *Sistemas Industriales Distribuidos*. Universidad de Valencia. España: Universidad de Valencia.

Ruiz, A. (2002). *Implementación de una red Modbus/TCP*. Santiago de Cali, Colombia.

Sanchez Cardenas, S. y. (2012). Actualización del Plan de Manejo Ambiental para la Central Hidroeléctrica Agoyán.

Sick. (2020). *Hoja de datos DFS60B-S4PA10000*.

Siemens. (2010). *Instrucciones de servicio S7-1200 Compact Switch Module CSM 1277*.

Siemens. (2011). Transmisor de presión SITRANS P220 (7MF1567). In *Instrucciones de servicio*.

Siemens. (2013). Aparatos de vigilancia y de mando. In *Relés de monitoreo 3UG4/3RR2*.

Siemens. (2015). *Convertidores de baja tensión SINAMICS G120C*.

Siemens. (2015). *Hoja de datos S7-1200 1214C DC/DC/DC*.

Siemens. (2015). *Industrial Wireless LAN SCALANCE W760-W720*.

- Siemens. (2016). Basic Operator Panel 2. In *Instrucciones de servicio*.
- Siemens. (2016). Hoja de datos 3RV2021-4AB10. In Siemens, *DataSheet*.
- Siemens. (2016). *Hoja de datos SM 1231 AI*.
- Siemens. (2019). *Speed Control with S7-1200 via Modbus RTU*.
- Siemens. (2020). *Hoja de datos ANT792-6MN*.
- Siemens. (n.d.). *Hoja de datos SM 1223 RLY*.
- STECK. (2018). Catálogo de productos. In STECK, *Comando y protección*.
- Telemecanique. (2004). Datasheet - LC1-D2510. In *Technical Data*.
- Villacrés, M. (2017). *Diseño e instalación de un sistema de control, supervisión y monitoreo para la compuerta de restitución tipo vagón de la central hidroeléctrica san francisco mediante el uso de un plc de una interfaz humano-máquina*. Riobamba.
- Zambrano, R., & Caballero, C. (2018). Diseño e implementación de una red MODBUS/RTU entre dos autómatas programables S7-1200 basado en el estándar RS485. Guayaquil, Guayas, Ecuador.

## **8. Anexos**

### **8.1 Análisis de la encuesta**

### **8.2 Tabla de asignación de variables**

### **8.3 Tabla de direccionamiento modbus**

### **8.4 Manual de usuario**