



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**PROPUESTA DE DISEÑO DE LAZO DE CONTROL EN UN SISTEMA DE ALARMAS PARA  
EL CONTROL Y MONITOREO DE LOS PARÁMETROS CRÍTICOS EN UNA CALDERA  
ACUOTUBULAR AL APLICAR LA NORMA IEC 62682**

**Carlos Eduardo Recinos Trinidad**

Asesorado por el Ing. Airons Alejandro Retana Esquivel

Guatemala, septiembre de 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PROPUESTA DE DISEÑO DE LAZO DE CONTROL EN UN SISTEMA DE ALARMAS PARA  
EL CONTROL Y MONITOREO DE LOS PARÁMETROS CRÍTICOS EN UNA CALDERA  
ACUOTUBULAR AL APLICAR LA NORMA IEC 62682**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**CARLOS EDUARDO RECINOS TRINIDAD**

ASESORADO POR EL ING. AIRONS ALEJANDRO RETANA ESQUIVEL

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Armando Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Ing. Carlos Eduardo Guzmán Salazar
EXAMINADOR	Ing. Herbert Samuel Figueroa Avendaño
EXAMINADOR	Ing. Saúl Cabezas Durán
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**PROPUESTA DE DISEÑO DE LAZO DE CONTROL EN UN SISTEMA DE ALARMAS PARA  
EL CONTROL Y MONITOREO DE LOS PARÁMETROS CRÍTICOS EN UNA CALDERA  
ACUOTUBULAR AL APLICAR LA NORMA IEC 62682**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 3 de octubre de 2020.

**Carlos Eduardo Recinos Trinidad**

Guatemala 21 de abril de 2021

Ingeniero

José Aníbal Silva de los Angeles

Coordinador del Área de Electrotecnia

Escuela de Mecánica Eléctrica

Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero:

Por medio de la presente me permito informar que, en calidad de asesor **HAGO CONSTAR** que he revisado y dado mi aprobación al trabajo de graduación: **"PROPUESTA DE DISEÑO DE LAZO DE CONTROL EN UN SISTEMA DE ALARMAS PARA EL CONTROL Y MONITOREO DE LOS PARÁMETROS CRÍTICOS EN UNA CALDERA ACUOTUBULAR AL APLICAR LA NORMA IEC 62682"**, del estudiante: **Carlos Eduardo Recinos Trinidad**, quien se identifica con CUI **2312 40449 0101** y Carné No. **2013-14479**.

Después de haberle hecho las correcciones pertinentes, considero que llena los requisitos para ser aprobado por la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica; en vista de ello se lo remito y pongo a su consideración.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"



*Alejandro Retana Esquivel*  
*Ingeniero Electricista*  
*Col. 10992*  
Ing. Airons Alejandro Retana Esquivel  
Col. 10992



REF. EIME 106.2021.

17 DE JUNIO 2021.

Señor Director

Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo

Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

**Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:  
PROPUESTA DE DISEÑO DE LAZO DE CONTROL EN UN  
SISTEMA DE ALARMAS PARA EL CONTROL Y MONITOREO  
DE LOS PARÁMETROS CRÍTICOS EN UNA CALDERA  
ACUOTUBULAR AL APLICAR LA NORMA IEC 62682, del  
estudiante Carlos Eduardo Recinos Trinidad, que cumple con los  
requisitos establecidos para tal fin.**

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,  
**ID Y ENSEÑADA A TODOS**

Ing. José Anibal Silva de los Angeles  
Coordinador de Electrotécnica



sro



REF. EIME 142. 2021.

**El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; CARLOS EDUARDO RECINOS TRINIDAD : PROPUESTA DE DISEÑO DE LAZO DE CONTROL EN UN SISTEMA DE ALARMAS PARA EL CONTROL Y MONITOREO DE LOS PARÁMETROS CRÍTICOS EN UNA CALDERA ACUOTUBULAR AL APLICAR LA NORMA IEC 62682, procede a la autorización del mismo.**

  
**Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo**



**GUATEMALA, 16 DE SEPTIEMBRE 2,021.**





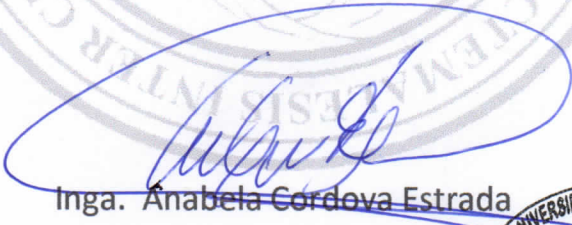
**USAC**  
TRICENTENARIA  
Universidad de San Carlos de Guatemala

**Decanato**  
**Facultad de Ingeniería**  
**24189101 - 24189102**

DTG. 443-2021

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **PROPUESTA DE DISEÑO DE LAZO DE CONTROL EN UN SISTEMA DE ALARMAS PARA EL CONTROL Y MONITOREO DE LOS PARÁMETROS CRÍTICOS EN UNA CALDERA ACUOTUBULAR AL APLICAR LA NORMA IEC 62682**, presentado por el estudiante universitario: **Carlos Eduardo Recinos Trinidad**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

  
Inga. Anabela Cordova Estrada  
Decana



Guatemala, septiembre de 2021

AACE/cc



## **ACTO QUE DEDICO A:**

<b>Dios</b>	Por darme la vida, la fuerza y el valor para culminar esta etapa de mi vida.
<b>Virgen María</b>	Por ser mi compañera en los momentos más difíciles de mi carrera y por interceder por mí ante su hijo.
<b>Mi mamá</b>	Claudia Trinidad, por la confianza y el apoyo que me ha brindado a lo largo de mis estudios, al corregir mis faltas y celebrar mis triunfos.
<b>Mi papá</b>	Eddy Recinos, por los consejos brindados.
<b>Mis hermanos</b>	Diego y Edith Recinos, por ser mis compañeros en la vida, por su apoyo y compañía en todo momento que los he necesitado.
<b>Mis abuelitos</b>	María Luisa Monroy (q. e. p. d.), Angélica Escobar (q. e. p. d.), Manuel Recinos (q. e. p. d.), Rafael Trinidad (q. e. p. d.) y Rosa Barillas, por aconsejarme siempre con su experiencia.

**Mis tíos**

Jorge Machaca, María Eugenia y Jéssica Melgarejo, Alan y Oscar Trinidad y Raquel García, por ser la ayuda oportuna a lo largo de mi carrera.

**Mis primos**

Julio y Andrés Trinidad Melgarejo, Isabela y Pablo Trinidad García, para que sepan que los sueños con esfuerzo siempre se hacen realidad.

**Demás familia**

Por el apoyo que me han brindado en cada instante.

**Mis amigos**

A todos los que forman parte especial de mi vida, en especial a Isaac Beltrand, Gabriela Mayén, Renato de la Roca, German Camey, Eddy Catú y todos con los que compartí momentos de alegría y satisfacción en toda la carrera.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Dios</b>	Por permitirme concluir esta meta.
<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por formarme como profesional y permitirme ser parte de tan prestigiosa casa de estudios.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por ser mi segundo hogar y por haberme permitido pasar dentro de sus aulas momentos buenos y difíciles y por crear en mí el amor a la carrera.
<b>Pueblo de Guatemala</b>	Por brindarme la oportunidad de estudiar y formarme profesionalmente para servir a mi patria a través del conocimiento adquirido.
<b>Mi familia</b>	Por darme una palabra de aliento y apoyarme siempre que lo necesito.
<b>Mi asesor</b>	Ingeniero Alejandro Retana, por su ayuda, paciencia y orientación en la realización de este trabajo de graduación.
<b>Mis amigos</b>	Con todos los que compartí momentos de alegría y tristeza a lo largo de esta carrera.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS.....	XIII
GLOSARIO.....	XV
RESUMEN.....	XXIII
OBJETIVOS .....	XXV
INTRODUCCIÓN.....	XXVII
1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. Conceptos termodinámicos .....	1
1.1.1. Leyes termodinámicas .....	4
1.1.1.1. Primera ley termodinámica.....	4
1.1.1.2. Segunda ley termodinámica .....	4
1.1.1.3. Tercera ley termodinámica .....	5
1.1.1.4. Ley cero de la termodinámica .....	6
1.1.2. Ley de Gay-Lussac .....	6
1.2. Generalidades de las calderas.....	7
1.2.1. Funcionamiento de la caldera acuotubular .....	10
1.2.2. Funcionamiento de la caldera pirotubular .....	12
1.2.3. Combustibles .....	13
1.2.4. Componentes de las calderas.....	17
1.2.4.1. Motores eléctricos .....	18
1.2.4.2. Ventiladores .....	18
1.2.4.3. Sensores.....	19
1.2.4.4. Gobernador .....	20
1.2.4.5. Precipitador electrostático .....	20

1.2.4.6.	Economizador.....	20
1.2.4.7.	Válvulas.....	21
1.2.4.8.	Alimentadores.....	22
1.2.4.9.	Parrillas .....	22
1.2.4.10.	Domo.....	23
1.2.4.11.	Super Heather .....	24
1.2.4.12.	Fondo delantero y trasero.....	24
1.2.4.13.	Venteos .....	25
1.3.	Lazos de control en los sistemas de instrumentación industrial.....	26
1.3.1.	Sistemas de control .....	26
1.3.2.	Tipos de lazos de control.....	27
1.3.2.1.	Lazo de control abierto .....	27
1.3.2.2.	Lazo de control cerrado .....	28
1.3.3.	Controladores.....	29
1.3.3.1.	Tipos de lazo de control.....	29
1.3.3.2.	Funcionamiento de los controladores ..	30
1.3.3.3.	Parámetros del control PID .....	31
1.3.3.4.	Variable controlada y manipulada .....	33
1.3.3.5.	Sensores y elemento final de control ...	33
1.3.3.6.	Tipos de alarma .....	34
1.3.4.	Conceptos del sistema SCADA .....	35
1.3.4.1.	Elementos del sistema SCADA.....	37
1.3.5.	Software para simulación de circuitos de automatización industrial .....	38
1.4.	Norma IEC 62682 .....	40
1.4.1.	Historia de la norma IEC 62682.....	41
1.4.2.	Aplicación de la norma IEC 62682.....	43
1.5.	Marco regulatorio nacional .....	44

1.5.1.	Acuerdo gubernativo 229-2014 y su reforma 33-2016.....	44
1.5.2.	Reglamento general sobre higiene y seguridad ocupacional IGSS .....	45
1.5.3.	Otras leyes aplicables .....	45
2.	INSTRUMENTACIÓN Y LAZOS DE CONTROL DE VARIABLES DEL PROCESO .....	47
2.1.	Variables del funcionamiento de la caldera .....	47
2.1.1.	Temperatura .....	48
2.1.1.1.	Termómetro de dilatación.....	48
2.1.1.2.	Termómetros termoelectrónicos .....	48
2.1.1.3.	Termómetro de presión .....	49
2.1.1.4.	Termómetro de resistencia.....	49
2.1.2.	Presión.....	49
2.1.2.1.	Manómetro Bourdon.....	50
2.1.2.2.	Manómetro de fuelle.....	50
2.1.2.3.	Sensor piezoeléctrico .....	51
2.1.2.4.	Presostatos .....	51
2.1.3.	Flujo o caudal .....	51
2.1.4.	Nivel.....	51
2.1.4.1.	Sensor capacitivo .....	52
2.1.4.2.	Sensor ultrasónico .....	52
2.1.4.3.	Sensor de flotador .....	52
2.1.4.4.	Electrodos de nivel.....	53
2.1.5.	Impurezas en el agua.....	53
2.2.	Variables controladas en la caldera .....	56
2.2.1.	Nivel de agua .....	57
2.2.2.	Llama .....	58



2.2.3.	Presión de vapor .....	59
2.3.	Variables manipuladas en la caldera .....	60
2.3.1.	Sistema de alimentación de agua .....	60
2.3.2.	Sistema de combustión .....	62
2.3.3.	Control de presión de vapor .....	64
2.4.	Lazos de control del sistema de alarma para las variables críticas de la caldera .....	67
2.4.1.	Lazo de control para alarma del nivel de agua .....	67
2.4.2.	Lazo de control para alarma del detector de llama .....	72
2.4.3.	Lazo de control para alarma de sobre presiones ....	74
3.	SOFTWARE LABVIEW.....	77
3.1.	Introducción al software LabVIEW.....	77
3.2.	Entorno de la herramienta gráfica LabVIEW .....	78
3.2.1.	Panel frontal .....	78
3.2.2.	Paleta de controles.....	79
3.2.3.	Controles e indicadores .....	80
3.2.3.1.	Controles e indicadores numéricos .....	81
3.2.3.2.	Controles e indicadores booleano.....	82
3.2.3.3.	Controles e indicadores de cadena de caracteres.....	82
3.3.	Diagramas de bloques .....	83
3.4.	Gráficos de datos .....	87
3.5.	Modulo DSC.....	88
4.	REGISTRO DE DATOS, CONTROL Y SIMULACIÓN .....	89
4.1.	Herramienta de adquisición.....	89
4.1.1.	Protocolos de comunicación .....	98

4.2.	Acercamiento de normas a la simulación de los lazos de control.....	111
4.2.1.	Bases generales para el diseño del sistema de alarmas de las variables críticas .....	113
4.2.1.1.	Principios Generales .....	113
4.2.1.2.	Anunciación de la alarma .....	114
4.2.1.3.	Directrices .....	114
4.2.1.4.	Estándares.....	115
4.2.2.	Simulación de panel principal del sistema.....	116
4.2.3.	Simulación del lazo de control para el nivel de agua en la caldera .....	120
4.2.4.	Simulación del lazo de control para la detección de llama .....	130
4.2.5.	Simulación del lazo de control para el control de la presión de vapor .....	144
4.2.6.	Aplicación de la norma IEC 62682 en las simulaciones del sistema de alarma.....	153
4.2.6.1.	Optimización del sistema .....	154
4.2.6.2.	Soporte avanzado al operador .....	155
4.2.6.3.	Evaluación del sistema.....	156
4.2.6.4.	Mejora continua del sistema de alarmas .....	156
4.2.7.	Análisis de rendimiento .....	157
4.3.	Equipo mecánico de respaldo.....	159
4.3.1.	Indicadores de presión.....	160
4.3.2.	Válvulas de seguridad y válvulas de alivio .....	160
4.3.3.	Termómetros .....	161
4.3.4.	Nivel de agua.....	162

5.	EVALUACIÓN TÉCNICO-FINANCIERA .....	163
5.1.	Determinación de presupuesto necesario .....	163
5.1.1.	Equipo de cómputo.....	163
5.1.2.	Software .....	165
5.1.3.	Equipo complementario del sistema .....	165
5.1.4.	Servicios asociados .....	166
5.2.	Análisis financiero .....	167
5.3.	Evaluación del proyecto .....	170
	CONCLUSIONES .....	177
	RECOMENDACIONES .....	179
	BIBLIOGRAFÍA .....	181

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Comportamiento de la entropía cerca del cero absoluto.....	6
2.	Diagrama caldera acuotubular .....	11
3.	Diagrama de lazo de control abierto.....	28
4.	Diagrama lazo de control cerrado .....	28
5.	Comparación del accionar de los lazos de control.....	32
6.	Componentes del sistema SCADA.....	38
7.	Ciclo de vida de la norma IEC 62682 .....	42
8.	Relación entre la demanda y el nivel del agua. ....	58
9.	Propuesta de lazo de control para el nivel de agua .....	68
10.	Propuesta de lazo de control de seguridad por bajo nivel de agua.....	70
11.	Propuesta de lazo de control detector de llama en caldera .....	72
12.	Propuesta de lazo de control para alarma de sobre presión.....	74
13.	Ventana del panel frontal, barra de herramientas y paleta de controles .....	79
14.	Paleta de controles .....	80
15.	Control numérico .....	81
16.	<i>Switch</i> y ledes utilizados en LabVIEW.....	82
17.	Control e indicadores de cadena de caracteres .....	83
18.	Ventana de diagrama de bloques.....	84
19.	Ventana con entradas y salidas .....	85
20.	Uso de diagrama de bloques.....	86
21.	Diagrama de bloques para representar datos en gráfica .....	87
22.	Controlador multilazo EZ-ZONE PM.....	89
23.	Entradas, procedimientos y salidas del controlador EZ-ZONE RM.....	91

24.	Ranuras de I/O del EZ - ZONE RM.....	93
25.	Conexiones de señales de entrada del EZ - ZONE RM .....	94
26.	Conexiones de señales de salida del EZ - ZONE RM.....	95
27.	Pantalla del EZ - ZONE PM.....	96
28.	Conexión de la pantalla del EZ - ZONE PM .....	97
29.	Ventana de inicio de LabVIEW .....	100
30.	Configuración de opc en LabVIEW .....	101
31.	Ventana para la creación de las variables .....	103
32.	Panel de control para la selección de componentes .....	104
33.	Panel frontal de LabVIEW.....	105
34.	Herramienta para conectar por medio de cable los gráficos .....	106
35.	Cableado de los terminales y conexión de forma de onda .....	106
36.	Paleta de herramientas e icono de selección automática .....	107
37.	Panel de funciones, programación y estructuras .....	108
38.	Conexión del bucle <i>while</i> y botón “detener” .....	109
39.	Contador de ms para el ciclo <i>while</i> .....	109
40.	Ejecución de la onda sinusoidal.....	110
41.	Panel principal del sistema de alarmas.....	116
42.	Usuarios de operadores creados para las simulaciones .....	117
43.	Usuario de supervisor y confirmación de acceso correcto al sistema	118
44.	Menú del supervisor para monitoreo de los demás paneles del sistema de alarmas.....	119
45.	Panel del sistema de alarmas para el control del nivel de agua .....	121
46.	Prueba de sensores del panel de control para el nivel de agua .....	123
47.	Falla de sensor en prueba de sensores del sistema de control nivel de agua .....	124
48.	Alarma de alto nivel de agua en el sistema.....	125
49.	Bajo nivel de agua – nivel inferior al 50% .....	126
50.	Bajo nivel de agua- nivel inferior al 40% .....	127

51.	Bajo nivel de agua- nivel inferior al 35%.....	127
52.	Paro de emergencia en panel para el monitoreo del nivel de agua ....	128
53.	Reporte de eventos generado por el sistema de control del nivel de agua.....	129
54.	Panel del sistema de alarmas para el control de la llama .....	130
55.	Prueba de sensores del panel de control del detector de llama.....	132
56.	Falla de equipo al momento de correr la prueba de sensores del panel de control del detector de llama.....	133
57.	Funcionamiento del detector de llama piloto en panel de control del detector de llama.....	134
58.	Indicador de encendido de llama principal en panel de control del detector de llama.....	135
59.	Indicador de arranque correcto en el panel de control del detector de llama.....	136
60.	Indicador de fallo de bomba en el arranque de la caldera .....	137
61.	Mensaje de fallo de bomba piloto en el arranque de la caldera .....	137
62.	Mensaje de fallo de bomba principal en el arranque de la caldera .....	138
63.	Falta de llama piloto en el arranque de la caldera .....	139
64.	Falta de llama principal en el hogar.....	140
65.	Bajo nivel de combustible en los depósitos .....	141
66.	Barrido de inquemados en paro de emergencia .....	142
67.	Mensaje de advertencia del paro de emergencia .....	142
68.	Reporte de eventos generado por el sistema de control del detector de llama .....	143
69.	Panel del sistema de alarmas para el control de la presión de vapor .	144
70.	Prueba de sensores del panel de control de la presión de vapor .....	146
71.	Falla de sensor en prueba de sensores del sistema de control de presión de vapor .....	147
72.	Falla de ventilador en el sistema de control de presión de vapor .....	148



73.	Falla de dámper en el sistema de control de presión de vapor .....	148
74.	Descenso de presión de vapor menor al 25 %.....	149
75.	Aumento de presión de vapor mayor al 85 % .....	150
76.	Aumento de presión de vapor mayor al 90 % .....	151
77.	Paro de emergencia en panel para el monitoreo de la presión de vapor.....	152
78.	Reporte de eventos generado por el sistema de control de la presión de vapor .....	153
79.	Indicadores de performance de un sistema de alarmas .....	156
80.	Gráfica costo – beneficio .....	174
81.	Fórmula para el cálculo de la TIR .....	175
82.	Fórmula para el cálculo del VAN.....	176

## TABLAS

I.	Clasificación de las calderas de vapor .....	9
II.	Comparación de softwares de simulación de circuitos de automatización industrial.. .....	39
III.	Problemas ocasionados por impurezas en el agua.....	53
IV.	Normativas para el análisis de impurezas en el agua .....	55
V.	Causas de explosión en la caldera .....	56
VI.	Límites máximos en calderas piro/acuotubulares de calentamiento indirecto.....	66
VII.	Señales I/O conectadas al controlador EZ-ZONE RM .....	92
VIII.	Protocolos de comunicación del controlador EZ-ZONE RM.....	99
IX.	Principios generales del diseño del sistema de alarma .....	113
X.	Porcentajes de rendimiento en equipos con sistemas de automatización instalados.....	158
XI.	Requisitos del sistema para la instalación de LabVIEW 2020 SP1 ....	163

XII.	Especificaciones de una computadora industrial .....	164
XIII.	Costo de componentes para el sistema de alarmas .....	166
XIV.	Datos técnicos de la caldera utilizada para la pasteurización .....	168
XV.	Pérdidas por hora de paro en caldera .....	172
XVI.	Análisis costo – beneficio .....	173



## LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
cm	Centímetros
cm <sup>2</sup>	Centímetros cuadrados
LIC	Controlador
SMC	Controlador de velocidad
B	Detector de llama
SO <sub>2</sub>	Dióxido de azufre
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
\$	Dólar
EFF	Eficiencia
e(t)	Error del lazo de control
ExAir	Exceso de aire
TD	Ganancia derivativa
TI	Ganancia integral
°C	Grados centígrados
KN/m <sup>2</sup>	Kilo Newton por metro cuadrado
KW	Kilowatts
Lt	Litros
m <sup>3</sup>	Metro cúbico
mA	Miliamperios
mm	Milímetro
ms	Milisegundos
CO	Monóxido de carbono
NO <sub>x</sub>	Óxido de nitrógeno
O <sub>2</sub>	Oxígeno
Q	Quetzales

<b>FY</b>	Relé
<b>LY</b>	Relé
<b>s</b>	Segundos
<b>Kr</b>	Señal de entrada
<b>yr(t)</b>	Señal de salida
<b>FT</b>	Transmisor de caudal
<b>LT</b>	Transmisor de nivel
<b>OT</b>	Transmisor de oxígeno
<b>PT</b>	Transmisor de presión
<b>VAC</b>	Voltaje medido en corriente alterna
<b>VDC</b>	Voltaje medido en corriente directa
<b>V</b>	Voltios

## **GLOSARIO**

<b>ABB</b>	ASEA Brown Boveri, empresa de tecnología multinacional suiza ubicada en Zúrich, Suiza, especializada en robótica, generación de energía, automatización, equipos industriales y otras tecnologías de ingeniería.
<b>ASME</b>	American Society of Mechanical Engineers, asociación de profesionales que genera códigos de diseño, construcción, inspección y prueba para equipos (especialmente calderas y recipientes a presión).
<b>Auto SIM</b>	Automation Simulator, software de simulación en tecnología de automatización. Permite a los usuarios probar circuitos y programas en un entorno virtual.
<b>Briqueta</b>	Conglomerado de carbón u otra materia en forma de ladrillo.
<b>Calderín</b>	En determinados aparatos, depósito de líquidos pequeño en forma de caldera.
<b>Cengicaña</b>	Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña, fue creado para apoyar el avance tecnológico en la industria azucarera, con el objetivo



de incrementar el rendimiento y la productividad de la caña de azúcar y sus derivados.

**Cohesión**

Acción de reunirse o pegarse las cosas entre sí o la materia de que permanecen formadas.

**Colector**

Pieza que suministra o recoge el fluido de varios conductos.

**DSC**

Datalogging and Supervisory Control, software complementario para el entorno de programación LabVIEW. Se puede utilizar para desarrollar sistemas de control y supervisión distribuidos desde docenas de miles, hasta decenas de miles de etiquetas.

**E/S**

En informática, periférico de entrada/salida.

**EEMUA**

Engineering Equipment and Materials Users Association, tiene como objetivo mejorar la seguridad, el medio ambiente y el rendimiento operativo de las instalaciones industriales y los activos de ingeniería de sus miembros de la manera más rentable para demostrar y continuar su liderazgo en la gestión de activos.

**For**

Permite ejecutar una o varias líneas de código de forma iterativa.

**GLP**

Gas licuado del petróleo.

<b>GPIB</b>	Hewlett-Packard Instrument Bus, este es un estándar de bus de datos digitales de corto alcance desarrollado por Hewlett-Packard en la década de 1970 para conectar equipos de prueba y medición (como multímetros, osciloscopios, etc.) con el equipo que los controla (como computadoras).
<b>Grafcet</b>	Graphe Fonctionnel de Commande Etape Transition, modelo de representación gráfica de la secuencia de acciones de un sistema lógico predeterminado por entradas y salidas.
<b>Hardware</b>	Conjunto de aparatos de una computadora.
<b>HMI</b>	Human-Machine Interface, forma en que los usuarios se comunican con máquinas, equipos, computadoras o equipos, e incluye todos los puntos de contacto entre el usuario y el equipo.
<b>I/O Server</b>	Servidor de entrada/salida.
<b>IEC</b>	International Electrotechnical Commission, organismo de normalización en el ámbito de la electricidad, la electrónica y tecnologías afines.
<b>IGSS</b>	Instituto Guatemalteco de Seguridad Social, institución gubernamental, autónoma, especializado en la prestación de servicios de salud y seguridad

social al público, denominado en su momento como asegurado o el beneficiario.

**Ionización**

Disociar una molécula en iones o convertir un átomo o molécula en ion.

**ISA**

Instrument Society of America, en instrumentación y control se utilizan símbolos especiales para facilitar y hacer más específico proporcionar información.

**LabVIEW**

Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench, software que utiliza un lenguaje de programación para proporcionar un poderoso entorno de desarrollo gráfico para el diseño de aplicaciones de ingeniería para la adquisición de datos, análisis de medidas y presentación de datos sin la complejidad de otras herramientas de desarrollo.

***Ladder***

En informática, una escalera de órdenes.

**Led**

Light-Emitting Diode, es un diodo emisor de luz. En su interior hay un semiconductor que, al ser atravesado por una tensión continua, emite luz, lo que se conoce como electroluminiscencia.

***Logigramme***

Puertas lógicas.

**MEM**

Ministerio de Energía y Minas de la República de Guatemala, entidad del sector público especializada

en materia ambiental y de bienes y servicios naturales del Sector Público, al cual le corresponde proteger los sistemas naturales que desarrollen y dan sustento a la vida en todas sus manifestaciones y expresiones.

**Microswitch**

Interruptor de acción rápida en miniatura.

**Mintrab**

Ministerio de Trabajo y Previsión Social, institución gubernamental encargada de velar y fomentar el cumplimiento de la legislación general que norma las relaciones obrero-patronales

**MTU**

Maximum Transmission Unit, término de redes de computadoras que indica el tamaño (*bytes*) de la unidad de datos más grande que se puede transferir mediante un protocolo de comunicaciones.

**NFPA**

National Fire Protection Association, organización establecida en Estados Unidos en 1896 para formular y mantener estándares y requisitos mínimos de protección contra incendios, capacitación, instalación y uso de dispositivos de protección contra incendios utilizados por los bomberos y el personal responsable de la seguridad.

**NI**

National Instruments, empresa que se especializa en el desarrollo y venta de productos de software, hardware y servicios informáticos. Los mercados

tradicionales son la recopilación de datos, el control de dispositivos y los dispositivos virtuales.

**NOM** Norma Oficial Mexicana, los estándares oficiales de México son estándares formulados para mantener los objetivos legales del país, especialmente en las siguientes áreas: humanos, animales y plantas, salud y protección ambiental, etc.

**NSO** Norma Salvadoreña Obligatoria, conjunto de normas descritas para el correcto manejo de los recursos naturales, implementadas en la industria salvadoreña.

**Off** Señal negativa que recibe el controlador.

**On** Señal positiva que recibe el controlador.

**Ph** Medida del grado de acidez o alcalinidad de una sustancia o una solución.

**PLC** Programmable Logic Controller, equipo electrónico que gestiona el proceso electromecánico en la línea de producción, especialmente en el proceso de conformación de la línea de montaje.

***Plug and play*** Conecta y reproduce, término que se le da al controlador por la facilidad de su instalación.

<b>RTU</b>	Remote Terminal Unit, dispositivo basado en microprocesador que permite adquirir señales que no están relacionadas con el proceso y enviar la información a un sitio remoto que procesa la información.
<b>SCADA</b>	Supervisory Control And Data Acquisition, concepto utilizado para crear un software informático que permite el control y seguimiento a distancia de los procesos industriales.
<b><i>Set point</i></b>	Es un punto de ajuste es el valor deseado u objetivo para una variable esencial.
<b>Software</b>	Grupo de programas, normas y reglas informáticas para llevar a cabo ciertas labores en una PC.
<b>Soldadura</b>	Pegar y unir firmemente 2 cosas, o 2 piezas iguales, generalmente con alguna sustancia idéntica o similar a ellas.
<b><i>Stop</i></b>	Detención en la marcha o en cualquier otra actividad.
<b>STPS</b>	Secretaría del Trabajo y Previsión Social, secretaria del Gobierno Federal a cargo de todos los servicios de salud social de la República Mexicana. Intenta lograr un equilibrio entre los factores de producción, de acuerdo con las regulaciones legales apropiadas.

<b>Transductor</b>	Dispositivo que transforma el impacto de una causa física, como presión, temperatura, expansión, humedad, etc., en un tipo de señal, generalmente eléctrica.
<b>VI's</b>	Virtual Instruments, es el uso de software personalizable y hardware de medición modular para crear un sistema de medición definido por el usuario.
<b>VXI</b>	VME eXtensions for Instrumentation, define líneas de bus adicionales para sincronización y activación, así como requisitos mecánicos y protocolos estándar para configuración, comunicación basada en mensajes, extensión multichasis y otras características.
<b>While</b>	Es una estructura de control repetitiva que impide la ejecución de un conjunto de instrucciones.
<b>Wire</b>	Un trozo de hilo de metal delgado que se puede doblar, en LabVIEW es el hilo por el cual se realizan las conexiones de los bloques.

## **RESUMEN**

En este trabajo se realizó un diseño del lazo de control para un sistema de alarma, donde el propósito fue utilizar la norma IEC 62682 como guía para realizar una propuesta del diseño del lazo de control y la respuesta con la que el sistema responderá a las emergencias que surjan en la máquina, en este caso una caldera acuotubular, esto con el fin de resguardar la integridad de las máquinas y de los técnicos de la planta. Para realizar el diseño de estos sistemas se hizo uso de la norma como se indicó anteriormente, esto también con el apoyo de la literatura referente a calderas de vapor, puesto que por medio de esta literatura se lograron identificar tres variables críticas en el funcionamiento de la caldera acuotubular.

Después de la identificación de estas tres variables críticas y el diseño de los lazos de control del sistema de alarma, estos fueron simulados por medio del software LabVIEW 2020 el cual por su capacidad de simulación de sistemas de automatización pudo ser posible la prueba de funcionamiento de los sistemas. Los resultados obtenidos de la simulación fueron satisfactorios, debido a que el sistema cumple los requerimientos que la norma exige, estos sistemas deberán ser adaptados a las necesidades que demande el fabricante de las calderas.

De igual forma se realizó un análisis económico sobre la viabilidad en la instalación del sistema de alarmas, con la cual se pudo concluir que la instalación del sistema es necesaria para evitar gastos imprevistos y así evitar daños permanentes a las máquinas, debido a que con el sistema de alarma se pueden evitar accidentes e incidentes que ocurran del mal funcionamiento de la caldera. Por tal motivo el sistema de alarma debe ser necesario en la industria



guatemalteca para aumentar la competitividad, eficiencia y confiabilidad de los servicios o productos que estos ofrecen.

## **OBJETIVOS**

### **General**

Realizar una propuesta de diseño del lazo de control de un sistema de alarma para utilizarse en una caldera acuotubular al aplicar las recomendaciones que indica la norma IEC 62682.

### **Específicos**

1. Identificar las variables críticas que normalmente afectan a una caldera acuotubular.
2. Diseñar un sistema para la adquisición de los datos generados por las variables críticas del proceso.
3. Evidenciar la importancia de un sistema de alarma en una caldera acuotubular, simulando las condiciones y regulaciones que se indican en la norma europea IEC 62682 aplicada en la propuesta de diseño del sistema de alarma.
4. Determinar la viabilidad técnica y económica del sistema propuesto por medio de una simulación en software.



## INTRODUCCIÓN

En este trabajo de graduación se propondrá un diseño de lazo de control para un sistema de alarma, este sistema permitirá la visualización y monitoreo de las alarmas y variables críticas que tienen la posibilidad interrumpir el correcto manejo de una caldera acuotubular, lo cual puede ocasionar accidentes.

El aporte personal en este trabajo de graduación radica en unir los conocimientos del área de electrotecnia, para brindar a la industria un parámetro que sea usado como guía, para el diseño del lazo de control de un sistema de alarmas, esto con el objeto de incrementar la eficiencia y confiabilidad de las calderas lo que asegura su correcto funcionamiento y cumplir de esta forma la norma de diseño del sistema de alarmas, debido a que estas calderas son altamente usadas en la industria guatemalteca.

Enfocarse en las calderas acuotubulares de los sistemas de generación de vapor es fundamental, porque son enormemente usadas en la industria guatemalteca para crear vapor en el proceso productivo y al mismo tiempo utilizar este vapor para la generación de energía eléctrica.

Los lazos de control son usados para monitorear y recabar información mediante sensores, después procesar esta información comparándola con valores establecidos anteriormente, la corrección del parámetro depende del tamaño del error obtenido, luego se usa un actuador para cambiar a un valor correcto la variable que se monitorea.

A nivel internacional existe la necesidad de disponer de una normativa para el diseño y administración de alarmas a nivel industrial, por esta necesidad se divulgó en 1999 la norma EEMUA 191, actualmente se cuenta con la norma vigente IEC 62682 para la administración de alarmas, en ella se encuentran los requisitos para el diseño de alarmas para la industria.

Los sistemas de alarma son relevantes en la industria, pues son beneficiosos para evitar pérdidas económicas e inclusive las vidas del personal, tomando en cuenta que los sistemas de alarma continuamente informan los valores que se encuentran fuera del rango usual de funcionamiento y estos se toma como base para la programación de mantenimiento de los múltiples equipos instalados, para hacer funcionar de manera óptima las calderas.

El valor de esta investigación radica en tener un antecedente para el monitoreo y control de las calderas acuotubulares, esto con el fin de evitar incidentes y accidentes en las plantas industriales al momento en que las calderas se encuentran en funcionamiento. Esta ayuda se tendrá con la propuesta de diseño de un sistema de alarma para una caldera acuotubular desarrollando la simulación de este sistema con la ayuda del programa LabVIEW 2020.

# 1. MARCO TEÓRICO

Tal como lo menciona la Revista *ABB Review*

Con cientos de procesos diferentes ejecutándose simultáneamente, los operadores pueden verse obligados a responder en cualquier momento a varias alarmas, incluso en condiciones normales. Si la gestión no es eficiente, hasta el operador más diligente puede pasar por alto una alarma. Incluso es posible que se desactiven alarmas persistentes con consecuencias potencialmente catastróficas.<sup>1</sup>

Por tal razón es importante un diseño que se adapte a las necesidades de una caldera acuotubular. Un diseño de alarma bien estructurado, identifica desde su etapa de diseño las variables críticas del proceso, las cuales deberán ser monitoreadas con mayor prioridad, debido a que las calderas son tanto complejas como peligrosas, estas tienen como función transformar en energía térmica la energía contenida en los combustibles fósiles o biomasa, esto se da mediante la combustión que realiza y la transferencia de esta energía al agua para generar vapor, de acá en adelante, este vapor se utilizará como tal o como medio de trabajo en otros equipos o procesos. A continuación, se explica la base central del porqué se dan estas transferencias de calor y su comportamiento.

## 1.1. Conceptos termodinámicos

Los principios termodinámicos son principalmente utilizados para diseñar y analizar objetos que son destinados a satisfacer necesidades humanas, este

---

<sup>1</sup> ABB Technology Ltd, *Descubrimientos alarmantes. ABB Review*. p. 60. Consulta: 26 de agosto de 2020.  
[https://library.e.abb.com/public/0233cb039738494c9988044c4c1d9008/Revista%20ABB%201-2016\\_72dpi.pdf](https://library.e.abb.com/public/0233cb039738494c9988044c4c1d9008/Revista%20ABB%201-2016_72dpi.pdf)

análisis está acompañado del estudio de otros principios como lo son: los fluidos y la transferencia de calor y masa.

Para describir un sistema es necesario conocer un conjunto de propiedades y el cómo estas se relacionan entre sí. “Una vez que cambia una propiedad de las características de un sistema, el estado también cambia y se expresa que ha pasado por un proceso. Un proceso simplemente es la transformación de un estado a otro”.<sup>2</sup> Con estas situaciones claras se puede mencionar que un ciclo termodinámico es una secuencia de procesos que comienzan y terminan en el mismo estado. Esto quiere decir que, las propiedades en el inicio del ciclo siguen siendo iguales al momento en el que este termina dicho ciclo termodinámico. Cada propiedad del ciclo tiene un valor en específico, definido que puede asignarse sin conocer porqué ha llegado a ese estado.

El término fase menciona la cantidad de materia que es homogénea en toda su estructura, esto puede darse tanto en su composición química como física. Es importante aclarar que un sistema puede contener una o más fases. Una sustancia pura puede existir en una o más fases, lo esencial de la sustancia pura es que su composición química debe ser igual en cada fase, puesto que las sustancias puras son aquellas que son uniformes e invariables en su composición química.

Cuando las sustancias en estudio pueden considerarse como sustancias continuas, sus propiedades termodinámicas pueden establecerse en un momento determinado. Se define de esta manera al volumen específico y el volumen ocupado por unidad de masa de un material. En otras palabras, es el inverso de la densidad del material, con la diferencia que no depende de la cantidad de materia.

---

<sup>2</sup> MORÁN, Michael. *Fundamentos de termodinámica técnica*. p. 73.

Ahora si se considera un área pequeña  $A$ , que contiene fluido estático. En un lado del área, el fluido ejerce una fuerza de compresión, que es la fuerza normal que actúa sobre el área. En el otro lado del área se ejerce una fuerza igual, pero en sentido opuesto. Al tomar en cuenta estos enfoques, se puede definir como presión a la fuerza ejercida por el punto de fluido especificado al inicio. Sin embargo, la presión puede variar dentro de un fluido de un punto a otro. Esta situación es el claro ejemplo de la presión atmosférica que varía dependiendo la elevación a la que se encuentre el punto de medición. La presión atmosférica también se llama presión absoluta. Los equipos de medición normalmente indican la diferencia que existe entre la presión absoluta de un sistema y la presión absoluta de la atmósfera fuera del equipo de medición. A la magnitud de la diferencia se llama presión manométrica o presión de vacío.

Al colocar dos bloques, se puede sentir que uno está más caliente que el otro. Estos bloques están en contacto entre sí y aislados del medio ambiente. Esta interacción se denomina interacción térmica. Cuando los bloques provocan una sensación cálida o fría se denomina equilibrio térmico. A esta propiedad anterior se le denomina temperatura. Se define como proceso adiabático al ejemplo de los bloques, uno de estos no intercambia calor con su entorno o con el bloque cerca de él. El proceso isoterma es aquel cuando los cuerpos interactúan con su entorno y cuentan con una temperatura constante.

Las tres definiciones antes mencionadas, son las más importantes en el estudio de la termodinámica.



### **1.1.1. Leyes termodinámicas**

Las leyes termodinámicas son un conjunto de ecuaciones matemáticas que describen el comportamiento de tres variables importantes, que son la temperatura, la energía y la entropía “Se le denomina entropía al grado de equilibrio que posee un sistema termodinámico, cuando la entropía es positiva nos indica que los componentes del sistema entran en un estado de desorden que cuando se produce una entropía negativa”.<sup>3</sup>

#### **1.1.1.1. Primera ley termodinámica**

Esta ley apareció por primera vez en 1860 gracias al físico Rudolf Clausus, esta ley también es conocida como de la conservación de la energía, la cantidad total de energía es siempre igual, aunque el sistema físico parece estar aislada del entorno. Es básicamente como un equilibrio de la energía en el sistema. Con esto se llega al siguiente principio básico debido a que la energía no se puede crear o destruir, solo se puede transformar.

Cuando se suministra calor a un sistema físico, la cantidad total de energía se puede calcular como el calor (Q) suministrado menos el trabajo (W) realizado por el sistema en sus alrededores.

#### **1.1.1.2. Segunda ley termodinámica**

Esta ley expresa que la cantidad de entropía en el universo tiende a aumentar con el tiempo. En otras palabras, ninguna máquina térmica puede producir trabajo neto intercambiando calor con una región a una sola temperatura fija, esto ocurre debido a la entropía en el sistema, porque la eficiencia en una

---

<sup>3</sup> MORÁN, Michael. *Fundamentos de termodinámica técnica*. p. 25.

máquina no puede estar al 100 % debido a que esta debe rechazar el calor no utilizado, este valor debe ser mayor a cero.

Esto ocurre en máquinas reales. Un ejemplo básico es el quemar una cantidad de materia y luego recolectar las cenizas resultantes. Durante su pesaje se comprobará que hay menor peso que al inicio, esto porque una parte de la materia se ha convertido en calor, en forma de gases que no puede hacer ningún trabajo en él por lo tanto están esparcidos por el medio ambiente.

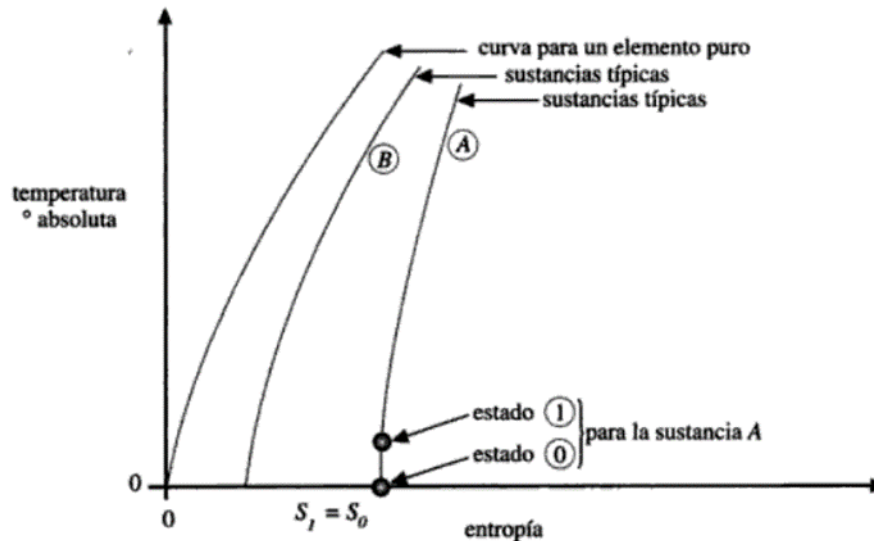
#### **1.1.1.3. Tercera ley termodinámica**

Este principio también llamado como postulado de Nerst debido a los estudios realizados por Walther Nerst entre 1906 y 1912. Esta ley establece que la entropía tiende hacia un valor constante mínimo cuando la temperatura tiende hacia el cero absoluto. En otras palabras, revela que “la entropía de un sistema que disminuye a cero absoluto será una constante definida”.<sup>4</sup> De manera práctica, esto muestra que es imposible llegar al cero absoluto con un proceso no reversible, puesto que, desde el cero absoluto el cambio en la entropía es cero, la forma irreversible de hacer reducir aún más la entropía es tener un ambiente más frío que el cero absoluto.

---

<sup>4</sup> RAFFINO, María. *Concepto: Entropía*. Consulta: 10 de septiembre 2020. <https://concepto.de/entropia>

Figura 1. **Comportamiento de la entropía cerca del cero absoluto**



Fuente: ROLLE, Kurt. *Termodinámica*. Consulta: 10 de septiembre 2020  
<https://books.google.es/books?id=1rlBBXQhmCwC&lpg=SA1PA31&ots=ikYYC72a8g&dq=leyes%20de%20termodinamica&lr&hl=es&pg=SA1-PA31#v=onepage&q&f=false>.

#### 1.1.1.4. **Ley cero de la termodinámica**

Llamada ley del equilibrio térmico, si dos sistemas están en equilibrio térmico independientemente de un tercer sistema, deben estar en equilibrio entre sí. En otras palabras, si se colocan dos cuerpos con diferentes temperaturas, se igualarán en un instante en el tiempo.

#### 1.1.2. **Ley de Gay-Lussac**

Esta ley fue estudiada por Joseph Louis Gay-Lussac a principios del siglo XIX, estableciendo la relación entre la temperatura y la presión de un gas si su volumen es constante.

Esta relación se presenta al momento en el que las moléculas de gas tienden a moverse más rápido a medida que aumenta la temperatura. Como resultado, aumenta el número de colisiones en las paredes del recipiente. Gay-Lussac descubrió que, en cualquier momento de esta relación, el cociente entre la presión y la temperatura siempre tenía el mismo valor. Como se puede apreciar en la siguiente expresión matemática.

$$k = \frac{P}{T} \rightarrow \frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2}$$

Esta expresión anterior establece que cuando se mantiene constante el volumen donde se encuentra contenido el gas, aumentará la presión si también aumenta la temperatura. También puede presentarse el caso contrario, al momento en el que la temperatura disminuye, también lo hará la presión en el volumen constante.

## **1.2. Generalidades de las calderas**

Una caldera “es todo aquel aparato a presión en donde el calor procedente de cualquier fuente de energía se transforma en utilizable, en forma de calorías, a través de un medio de transporte en fase líquida a vapor”<sup>5</sup>. En otras palabras, una caldera es aquel aparato que con la ayuda de un combustible puede transformar su energía a utilizable por medio de un líquido convertido en vapor.

A finales del siglo XIX, James Watt, ideó la primera máquina de vapor, él se basó en los estudios del físico francés Denis Papin, dado que este último, un siglo atrás había diseñado una máquina capaz de almacenar agua, calentarla y

---

<sup>5</sup> SANZ DEL AMO, Manuel y PATIÑO MOLINA, Rosario. *Manual práctico del operador de calderas industriales*. p.38.

generar vapor. Este diseño se denominó *marmita*, la actual olla de presión es heredera de aquel invento, este dio pie al estudio de las calderas de vapor. Watt, al mismo tiempo de idear esta máquina se dio cuenta del uso del poder del vapor para sustituir la fuerza realizada por animales o personas. Por este motivo se comenzó a estudiar y diseñar las calderas para fabricarlas y desarrollarlas hasta la actualidad.

Se denomina generadores de vapor a la caldera y al conjunto de los accesorios que componen a esta. El objetivo principal de una caldera es generar energía para centrales eléctricas, procesos industriales o calefacción. Estas calderas operan principalmente por transferencia de calor, normalmente se produce por combustión, esta transferencia se realiza con agua contenida o circulada dentro de un recipiente metálico.

En el proceso de generación de vapor en una caldera se inicia con la alimentación de agua, el agua debe de tener un nivel considerable de impurezas presentes en su composición, puesto que todo tipo de agua que proviene de una fuente natural presenta una cierta cantidad de materia disuelta, la cual debe de ser menor a los límites permitidos por el fabricante. El valor de impurezas en el agua de proceso debe ser bajo, porque un nivel alto de impurezas causa incrustaciones en la caldera, esto se da porque las impurezas son precipitadas fuera el agua directamente sobre la superficie de transferencia de calor. Este es un problema serio en la caldera, porque, estas incrustaciones intervienen en la transferencia de calor y pueden causar puntos calientes, lo que conduce al sobrecalentamiento local.

Cuando el agua no cumple con estos requisitos es necesario realizar un tratamiento para eliminar todas las impurezas antes de utilizarlas. Luego de este tratamiento, el agua pasa por unos tubos dentro de la caldera donde se conforma

el hogar. En el hogar se encuentran unas aberturas para los quemadores y la salida de los gases de combustión. El líquido ingresa a la caldera hacia el domo superior, este se encuentra ubicado en la parte más alta de la caldera, luego descendiendo al domo inferior, estando en este domo pasa a unos colectores directamente con los tubos dentro de la caldera, el calor se encuentra en la parte fuera de los tubos.

Las calderas normalmente cuentan con dos zonas importantes, la primera es la zona donde se genera la combustión o también llamado hogar o zona de liberación de calor, en este lugar es donde se produce la quema de combustible. La zona de tubos es donde los productos de la combustión transfieren el calor al agua principalmente por convección. La principal característica de la zona de tubos es que en estos puede circular tanto el combustible como el agua que se calentará, esto depende principalmente del tipo de caldera que se utilice.

La clasificación de las calderas depende de los aspectos presentados en la siguiente tabla.

**Tabla I. Clasificación de las calderas de vapor**

<b>Clasificación de la caldera</b>
Su posición (vertical u horizontal)
Su instalación
La ubicación del hogar
La circulación de los gases
La forma de su calefacción
La cantidad de presión de vapor que producen
Respecto a la cantidad de agua con respecto a la superficie calentada
Según la utilización
Según la circulación del agua dentro de la caldera
Según el tipo de combustible

Fuente: KOHAN, Anthony Lawrence. *Manual de Calderas*. p.17.

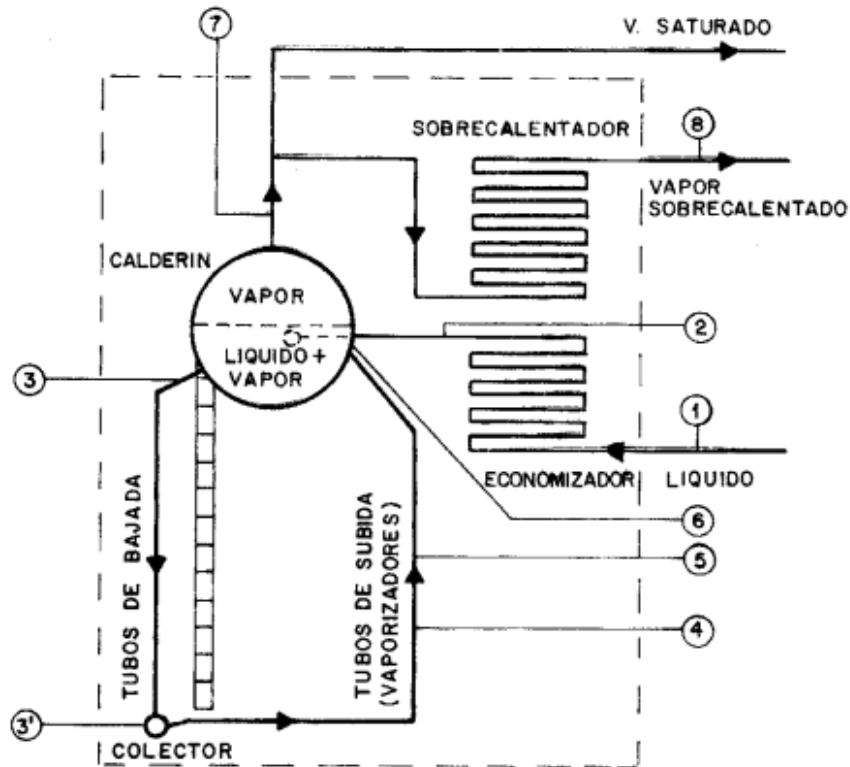
Todas las calderas se pueden clasificar de acuerdo con los aspectos anteriores, los fabricantes toman en consideración unos de estos aspectos para fabricar la caldera. Sin embargo, la clasificación más aceptable se basa en la circulación del agua y de los gases en la zona de los tubos en la caldera.

Estas dos clasificaciones son las acuotubulares, que básicamente en los tubos recorre el agua que será evaporada, las calderas pirotubulares son la siguiente en esta clasificación, donde los humos recorren los tubos de la caldera. El funcionamiento de este tipo de clasificación será ampliado en la siguiente sección.

#### **1.2.1. Funcionamiento de la caldera acuotubular**

La operación principal de las calderas de vapor es de evaporar el agua para sobrecalentar el vapor resultante, gracias a la energía liberada por el combustible.

Figura 2. Diagrama caldera acuotubular



Fuente: Babcock & Wilcox Co. *Calderas de Vapor Acuotubulares*. Consulta: 21 de septiembre 2020. <https://jrguezs.webs.ull.es/tecnologia/tema2/caldera2.pdf>.

En la figura 2 se observa un esquema esencial de una caldera acuotubular, esta clase de caldera de la misma forma que se menciona en el párrafo anterior, su función es evaporar agua, el proceso inicia una vez que el agua líquida entra en el economizador, en este punto el agua se calienta hasta una temperatura siguiente a la de saturación. En el punto 2 del esquema, se introduce al calderín y desciende por los tubos de riego, en el esquema están señalados con el 3, hasta el colector inferior, acá se distribuye hacia los tubos vaporizadores donde se forman las burbujas de vapor, que paralelamente se separan en el calderín. En este punto, el vapor saturado puede calentarse por arriba de su temperatura de saturación en el sobre calentador, que está señalado en el esquema con el 8. Circulación de agua a través de tuberías de bajada (riego) y de subida



(vaporizadores) podría ser por convección natural, gracias a la diferencia de densidades, o forzada por medio de una bomba.

Este tipo de calderas son las más utilizadas cuando se quiere obtener elevadas presiones y máximo rendimiento. El mantenimiento de este tipo de calderas se realiza de manera sencilla, porque las incrustaciones se quitan utilizando dispositivos mecánicos para la limpieza o con aire comprimido. Otra de sus ventajas es el arranque rápido que tiene este tipo de caldera, esto se da debido a que la caldera no posee un volumen alto de agua en su interior.

### **1.2.2. Funcionamiento de la caldera pirotubular**

Las calderas pirotubulares se caracterizan por la circulación de gases inflamables dentro del tubo y la evaporación del agua que rodea la superficie exterior del tubo. Entre las calderas verticales existen dos tipos respecto de la posición de sus tubos que son, de tubos semi sumergidos o tubos totalmente sumergidos. Las calderas horizontales con tubos múltiples de humos, hogar interno y retorno simple o doble retorno es también llamada como caldera escocesa. Esta caldera se puede utilizar para la combustión de carbón, leña, quemadores de petróleo o GLP. Este tipo de calderas pueden producir agua caliente o vapor saturado.

Este tipo de calderas son fáciles de operar debido a que poseen una mayor flexibilidad en su uso, pero al mismo tiempo, necesitan una elevada seguridad en su funcionamiento porque almacenan un gran volumen de agua, en virtud de esto la presencia de fallos puede ocasionar accidentes de una gran magnitud. Este tipo de caldera es la más utilizada para bajas presiones, también es la que presenta mayor aplicación en todo el sector industrial.

Este tipo de calderas se encuentra conformada por diferentes subsistemas, el más importante es el de generación de vapor debido a que este constituye el elemento principal para obtener una elevada eficiencia energética y un alto nivel de seguridad. Los fallos que se presentan en este subsistema generan una mayor peligrosidad respecto a otros subsistemas porque este puede presentar daños irreparables.

En este subsistema se desarrollan diferentes procesos que presentan una primordial importancia para el seguro y efectivo funcionamiento de la caldera, entre estos podemos encontrar: el proceso de combustión, de producción de vapor, de alimentación de agua a la caldera y de expulsión de los gases producto de la combustión. En cada uno de estos procesos se controlan diferentes tipos de variables que son de vital importancia para el control y monitoreo de estas en la caldera.

### **1.2.3. Combustibles**

El combustible es de vital importancia en el proceso que se realiza en la caldera, debido a que dependiendo la inflamabilidad del combustible es el tipo de energía térmica que se genera al momento que la combustión se produce.<sup>6</sup>

La inflamabilidad es la capacidad del combustible en quemarse o su habilidad de convertirse en un gas de forma que la combustión pueda tener lugar. Para que ocurra la combustión, es necesaria una mezcla adecuada con aire y un punto de inflamación para que la combustión continúe. Es necesaria una mezcla homogénea de aire y combustible para asegurar que el aire alrededor de cada partícula de combustible promueva la combustión. Los componentes fundamentales que producen calor en los combustibles son el carbono, el hidrogeno y sus compuestos.

---

<sup>6</sup> Consejería de Economía y Hacienda Comunidad de Madrid. *Guía Básica de Calderas Industriales Eficientes*. p. 30.

Los combustibles se dividen dependiendo de su estado de agregación. Esta clasificación se divide en:

- Combustibles sólidos
- Combustibles líquidos
- Combustibles gaseosos

Los combustibles sólidos son aquellas sustancias en las que las moléculas presentan una gran cohesión entre sí. Su característica fundamental es que mantienen una forma y volumen específico, y al momento de ser quemados producen cenizas.<sup>7</sup>

La combustión de este tipo de combustible depende de la cantidad de humedad que poseen estos al momento de ser quemados, de igual manera, la forma física que cuenta al momento en que es quemada. Entre este tipo de combustible se pueden mencionar los de tipo natural como lo son la leña y el carbón, también se puede encontrar la biomasa que principalmente es un combustible de procedencia vegetal. Entre los sólidos artificiales se encuentran aglomerados o briquetas en polvo, petróleo, carbón, alcohol y carbón vegetal.

Los combustibles líquidos son aquellos en las que las fuerzas resultantes de los movimientos moleculares son suficientemente elevadas, esto frente a las fuerzas de atracción para permitir el movimiento de las moléculas entre sí, lo cual le permite fluir.<sup>8</sup>

En otras palabras, los combustibles líquidos no poseen una forma definida, lo que hace que sea su característica principal, también lo caracteriza la temperatura de fusión y de evaporación, considerando que estos cuentan con un punto de inflamación, principalmente es el punto a partir del cual producen una

---

<sup>7</sup> Consejería de Economía y Hacienda Comunidad de Madrid. *Guía Básica de Calderas Industriales Eficientes*. p. 30.

<sup>8</sup> *Ibíd.*

cantidad suficiente de vapor para que estos se puedan encender ante un foco de ignición.

Los combustibles gaseosos “son aquellos donde sus moléculas se encuentran tan separadas debido a que las fuerzas resultantes de los movimientos moleculares son muy elevadas lo que ocasiona que estas ocupen todo el espacio en el que se encuentran.”<sup>9</sup> Su rasgo principal es que tienen forma y volumen variable, aunque a diferencia de los dos anteriores, este por ser un gas puede ser comprimido. Entre este tipo de combustible podemos mencionar el gas natural, gas de hulla, gas de alto horno y el GLP o gas licuado de petróleo.

La selección del combustible para la caldera está directamente relacionada con el poder calorífico que estos presentan, debido a que de esta manera se denomina a la cantidad de energía liberada por cantidad de combustible quemado en la cámara de combustión.

El combustible que utilizará la caldera de la simulación será carbón y biomasa, se eligieron estos dos tipos de combustibles debido a que el carbón es un combustible no renovable y es altamente utilizado en la industria guatemalteca, tal como se muestra en el Balance Energético del Ministerio de Energía y Minas de la República de Guatemala (MEM), el último balance proporcionado por el MEM es del año 2017. En este balance se puede apreciar que el carbón es uno de los combustibles más utilizados en la generación de energía eléctrica.

Para utilizar el carbón en una planta térmica, este puede ser utilizado de tres diferentes maneras, las cuales pueden ser de parrilla, de carbón pulverizado

---

<sup>9</sup> Consejería de Economía y Hacienda Comunidad de Madrid. *Guía Básica de Calderas Industriales Eficientes*. p. 30.

y las de lecho fluidizado. En el primero, una faja transportadora alimenta el combustible hacia la parrilla, este se quema y las partículas pequeñas se terminan de quemar en la parte superior de la caldera. En el segundo al ser utilizado, el carbón se alimenta en forma de pequeñas partículas, esto se consigue pulverizando el carbón y dejándolo menor a 100 micras, se consigue la alimentación de esta manera con la ayuda de un flujo controlado de aire.

En el uso de lecho fluidizado, el carbón se alimenta en forma de pequeñas partículas microscópicas, las cuales son introducidas por medio de un flujo controlado de aire, esto hace que se comporte como un fluido. Según la investigación *Perfil Energético de Guatemala*:

...en Guatemala, la tecnología predominante para la combustión son las calderas acuotubulares y el carbón utilizado para la generación de electricidad es la hulla bituminosa, importada de Colombia (...) La planta Jaguar Energy es la más grande, con 300 MW de potencia de placa. La generación con carbón aportó 2,172 GWh en 2016.<sup>10</sup>

La biomasa es un combustible renovable, que puede obtenerse de una fuente natural e inagotable, esto debido a su abundante cantidad en la tierra o bien por su capacidad de regenerarse en la tierra. En Guatemala, según el Balance Energético del MEM, el combustible renovable más utilizado es la biomasa, especialmente el utilizado en las centrales eléctricas es el bagazo de caña, altamente utilizado en los ingenios para generar vapor y este utilizarlo para la fabricación de azúcar.

En Guatemala regularmente los ingenios utilizan calderas de tipo acuotubular para generar vapor, este produce energía mecánica en turbogeneradores, generando energía eléctrica. El Centro Guatemalteco de

---

<sup>10</sup> ZURITA FUENTES, Ana Cecilia y ROSITO MONZÓN, Juan Carlos, *Perfil energético de Guatemala: Bases para el entendimiento del estado actual y tendencias de la energía*. p. 84.

Investigación y Capacitación de la Caña (Cengicaña) reporta dos tecnologías de mayor uso, las cuales son las turbinas de escape y las de condensación.

Para utilizar el bagazo de caña como combustible, primero se debe de desfibrar, triturar y comprimir la caña de azúcar en molinos, el resultado de este proceso es un subproducto fibroso al que se le denomina bagazo de caña. Este bagazo de caña posee en promedio un 50 % de humedad relativa, lo que significa que la mitad del contenido de la biomasa es agua, mientras que la otra mitad es fibra vegetal.

La humedad relativa es importante para la combustión puesto que cuando se quema la biomasa, primero es necesario evaporar el agua, previo a que el calor se encuentre disponible, por esa razón, cuanto mayor sea el contenido de humedad, menos poder calorífico. Para evitar estas pérdidas se hace un secado del bagazo previo a ser usado, esto con el único objeto de minimizar su grado de humedad.

#### **1.2.4. Componentes de las calderas**

Hay diferentes tipos de accesorios que componen a las calderas, la finalidad de todas estas es la de mejorar el funcionamiento, eficacia y seguridad.

A continuación, se explican ciertos de los más relevantes que se hacen mención en el *Manual de Calderas*.<sup>11</sup>

---

<sup>11</sup> KOHAN, Anthony Lawrence. *Manual de Calderas*. pp. 424 – 428.

#### **1.2.4.1. Motores eléctricos**

Estos son utilizados en diferentes partes principales de la caldera, una de ellas es el quemador, normalmente se busca reducir la velocidad de este motor para que de esta forma disminuya el consumo de energía eléctrica y el nivel sonoro. Es usado extensamente para bombas de agua, esto con el objetivo de hacer circular el agua en el circuito de la caldera. Además, los motores son usados para el tiro de la caldera, localizado en el ventilador que es utilizado en la chimenea.

#### **1.2.4.2. Ventiladores**

Este componente puede ser utilizado de dos formas, la primera es como ventilador de tiro inducido, en esta aplicación se impulsan los productos de la combustión de la caldera y son dirigidos a la chimenea para que sea descargada a la atmósfera. También es utilizado el ventilador para tiro forzado, este se encarga de tomar aire de la atmosfera y lo entrega a través de conductos y precalentadores de aire a los quemadores.

El tipo de ventilador centrífugo es el más común de ser usado, este también se divide en dos tipos, ya sea de chapas de acero o el tipo multi alabe o multi pala. Los ventiladores deben tener un mantenimiento adecuado, debido a que estos se encuentran propensos a que en él se produzca corrosión y provocar el desequilibrio con el resultado de la producción de vibraciones.

#### **1.2.4.3. Sensores**

Es necesario que los operadores conozcan el estado de la caldera al momento en el que esta es utilizada. Por tal razón a continuación se nombrarán algunos sensores utilizados en las variables críticas del sistema.

- Los sensores de temperatura son dispositivos que se encargan de transformar los cambios de temperatura en cambios de señales eléctricas. Algunos de estos sensores de temperatura pueden ser termómetros bimetalicos, termómetros rellenos de líquido, detectores electrónicos de temperatura o resistencia, termopares y termistores.
- Sensores de presión que son de gran importancia para el control de la caldera. De este tipo de sensor existen otros que se derivan y ayudan a mantener un sistema de la caldera estable. Entre estos podemos encontrar los presostatos y manómetros.
- Sensores para el nivel de agua, estos son de vital importancia porque nos indican la cantidad de agua que se encuentra dentro de la caldera. Entre estos se encuentran los sensores de tipo capacitivo, ultrasónico, sensor flotador y electrodos de nivel.
- Los sensores para el control de la llama son importantes en el circuito de seguridad de la caldera, esta importancia se da debido a que, si la llama se apaga y la caldera continúa alimentando la unidad con combustible, puede resultar en explosión. Los sensores utilizados para esta función son los sensores ópticos, sensor ultravioleta/ infrarrojo y el electrodo de detección.



- El sensor para la purga de la caldera es utilizado debido a que las impurezas que, contenidas en el agua en forma de gases, sólidos disueltos y en suspensión, se purga de manera periódica el agua de la caldera y con esto permitir que sea reemplazada por agua con relativa concentración de sólidos disueltos baja. Es utilizado un sensor de conductividad.

#### **1.2.4.4. Gobernador**

Este es utilizado para garantizar la presión constante del gas que se dirige a la cámara de combustión.

#### **1.2.4.5. Precipitador electrostático**

Es un dispositivo que es usado para que mediante la ionización que generan poder atrapar partículas, atrayéndolas por una carga electrostática inducida. Son utilizados debido a que mínimamente impiden el flujo de los gases por medio de él, de esta manera elimina de forma fácil finas partículas como polvo o humo de la corriente de aire.

#### **1.2.4.6. Economizador**

Son utilizados principalmente para mejorar la eficiencia en la caldera debido a que se encargan de recuperar calor de los humos para aumentar la temperatura de alimentación a la caldera, también puede ser utilizado para precalentar el agua destinado para realizar otras aplicaciones, cuando trabaja con agua de red, permitirá condensar el vapor de los humos durante el funcionamiento del equipo. Son instalados en la salida de gases de la caldera, esto con el propósito de incrementar su rendimiento. El agua de alimentación de la caldera consiste en un tubo liso o con aletas que circula por el interior del tubo y los gases de la

combustión salen del tubo contra la corriente. Estos gases pueden drenar la energía del agua y aumentar la temperatura del agua, reduciendo el consumo de energía requerido.

#### **1.2.4.7. Válvulas**

Las válvulas son críticas en el proceso de la generación de vapor en la caldera, de tal forma que el código de la American Society of Mechanical Engineers (ASME) para calderas y recipientes a presión, muestra la necesidad del uso de las válvulas y cómo tienen que ser utilizadas. Las primeras válvulas en una línea de salida de la caldera son normalmente las válvulas *stop*, también conocidas como válvula de cierre de la caldera. Estas tienen como función principal la de iniciar o detener el flujo del medio, al mismo tiempo actúan como una válvula de retención para cerrar automáticamente si se pierde la presión, así evitando el reflujo lo cual podría dañar de manera drástica a la caldera.

Las válvulas de seguridad son utilizadas para evitar daños a la caldera, entre las válvulas utilizadas se encuentra la válvula de corte por baja presión, el corte se puede realizar por una línea que puede encontrarse con nivel bajo de agua. También se encuentra la válvula reductora del quemador con enclavamiento, esta es utilizada en calderas con ignición manual, porque esta válvula ayuda a impedir que pase el gas si este no va a ser quemado. Otro tipo de válvula es la principal de vapor, esta es una válvula de paso que se coloca en la parte superior de la caldera y es de protección básica contra un exceso de la presión máxima. Por último, la válvula de seguridad cuenta en su interior con un resorte para reaccionar de manera casi instantánea al momento que sea requerido que corte por una sobre presión y evitar que explote la caldera.

#### **1.2.4.8. Alimentadores**

Son utilizados normalmente para la alimentación de biomasa y combustibles alternativos a las calderas, entre ellos se incluye la biomasa forestal, combustibles sólidos recuperados y combustibles agrícolas. El sistema de suministro de combustible incluye el sistema de almacenamiento, distribución y entrega de combustible al punto de suministro requerido de la caldera.

El almacenamiento de combustible antes de la inyección se realiza en depósitos comunes como silos, recipientes, tanques, entre otros, generalmente cerca del frente de la caldera. El tornillo circular en la parte inferior de los silos puede ser un tornillo completo equipado con un alimentador inferior o un alimentador mecánico. La descarga de combustible del tanque diario se puede realizar directamente en el puerto de alimentación de la caldera o con un transportador de tornillo dosificador, que alimenta a un único punto de alimentación para su inyección en la caldera.

La distribución del combustible puede realizarse con transportadores de distribución, tornillos dispensadores y tornillos dosificadores de alimentación. Este es un sistema de control sofisticado con controladores de nivel, dispositivos de frecuencia variable y, en algunos casos, alimentadores de peso, estos funcionan juntamente con el sistema de control de distribución de la sala de calderas, esto con el fin de que se pueda aumentar la distribución y el suministro del combustible.

#### **1.2.4.9. Parrillas**

Es una estructura diseñada para que en ella se logre transportar el combustible de la caldera, regularmente la biomasa. Las calderas que cuentan

con este sistema normalmente tienen varias parrillas que según la demanda de combustible así es su utilización. Por abajo de las parrillas se hace una primera inyección de aire, esto con el propósito de refrigerarlas y proporcionar comburente, mientras que por encima se hace una segunda inyección de aire para promover la combustión de los volátiles, finalmente se encuentra un cenicero donde se recoge la ceniza del residuo que no se pudo quemar, esta ceniza se puede utilizar como abono. Existen tres tipos de parrilla.

- Parrilla viajera: en este tipo de parrilla, la biomasa avanza sobre una oruga, esta biomasa que se transporta puede tener un alto contenido de cenizas y un porcentaje medio bajo de humedad. Cuenta con limpieza automática, por tal motivo son ideales para su utilización en actividades productivas intensivas que no realizan paradas de manera regular.
- Parrilla escalonada: en esta parrilla la biomasa se va volcando de un escalón al siguiente para que avance desde arriba hacia abajo. Entre los tres tipos de parrilla mencionados, estas son las más económicas.
- Parrilla inclinada: la biomasa se desplaza por resbalamiento, esto produce una combustión homogénea. Las cenizas caen a medida que se generan.

#### **1.2.4.10. Domo**

El domo normalmente se encarga de separar la mezcla agua-vapor procedente de las calderas, dejando exclusivamente el vapor en la línea para su consumo, proceso, entre otros. Estos normalmente se encuentran en calderas acuatubulares y pueden ser superiores o inferiores, dependiendo totalmente de la posición que tienen en la caldera. Los domos inferiores normalmente son los de sedimentos o de lodos y en ella se encuentra una válvula de purga para la

descarga de los sedimentos o los concentrados de sales. Los domos superiores son domos de agua y vapor, suele ser colocado en posición horizontal, aunque en algunos casos se coloca inclinado, de forma paralela a los tubos. El domo superior normalmente es llamado domo de vapor, por lo que es usual encontrar agua. En otras palabras, los domos son bóvedas sometidas a altas temperaturas y presiones, diseñadas para eliminar el arrastre de humedad y precipitados, purificando el vapor.

#### **1.2.4.11. Super Heater**

Dispositivo que se utiliza para calentar el vapor generado por la caldera nuevamente, de esta forma incrementar su energía térmica y decrecer la probabilidad de condensado en la caldera. Estos también son llamados supercalentadores y aumentan la eficiencia del sistema de una forma notable debido a que aumentan la temperatura del vapor saturado que pasa por medio de su interior, de esta manera se produce vapor sobrecalentado o vapor recalentado, a una temperatura preeminente de la de saturación. El vapor que no se ha supercalentado se le conoce como vapor saturado o vapor húmedo. El fin de un supercalentador es el de minimizar la cantidad de trabajo que se debe realizar para producir la misma cantidad de energía. En otras palabras, la instalación de un super calentador tiene el efecto de aumentar la capacidad de la planta con el mismo flujo de vapor.

#### **1.2.4.12. Fondo delantero y trasero**

Los exteriores en las calderas son de forma circular y evitan que los fluidos salgan. En estas piezas van soldados los tubos de humos y paso de gases, de igual forma las puertas de registro e inspección y cajones recolectores de gases. Las interiores son las que se encargan de contener los productos de la

combustión, en el fondo delantero van soldados los tubos de segundo paso de gases, van soldados entre si el fondo trasero exterior y el fondo trasero, unos tubos huecos para dar al conjunto robustez y flexibilidad.

#### **1.2.4.13. Venteos**

Estos son usados para el control de la evaporación, normalmente una vez que se necesita o desea minimizar la evaporación de los contenidos de un tanque a la atmósfera. Regularmente son conectados al espacio de vapor de un tanque de almacenamiento. La presión en este espacio de vapor aumenta o disminuye a medida que el líquido entra y sale del tanque. Los cambios de la temperatura atmosférica provocan una expansión o contracción de los vapores en este espacio, lo que al mismo tiempo provoca aumentos o disminuciones de presión.

El conjunto de paletas de la carcasa se abre cuando se detectan niveles específicos de presión y vacío. Cuando se libera una presión o vacío excesivo, el conjunto de paletas vuelven a cerrarse automáticamente. El espacio de vapor del tanque siempre se mantiene dentro de los límites de seguridad que son los límites de diseño de operación de presión y vacío.

Los venteos de fin de se utilizan para reducir la presión directamente a la atmósfera, pero los respiraderos de escape y en línea tienen conexiones de salida que permiten que el vapor de escape se contraiga para su procesamiento posterior o mediante conexiones de tubería.

### **1.3. Lazos de control en los sistemas de instrumentación industrial**

El lazo de control es un sistema cuyo principal objetivo es mantener el proceso industrial estable, libre de interferencias y desequilibrios, suele estar formado por equipos de medida, controladores, componentes finales de control y el propio proceso.

#### **1.3.1. Sistemas de control**

Las variables son características que pueden tomar diferentes valores en un determinado tiempo, estas afectan las entradas y salidas del proceso en una caldera. Las variables críticas deben de estar siempre por debajo de un valor en específico, también llamado, señal o punto de ajuste (*set point*), se denomina de esta manera al punto de consigna para el valor de la señal variable que se tiene que controlar.

Este tipo de control se lleva a cabo gracias a un lazo de control el cual es una combinación de elementos conectados entre sí, tal como se menciona en el libro *El ABC de la instrumentación en el control de procesos industriales*, que de manera individual no podrían ser utilizados. Estos elementos son:

- El controlador, se comporta como el cerebro del sistema, porque en él rigen las decisiones que tomará respecto a los parámetros que se programen previamente.
- Actuadores o transductores de salida, son los que realizan la acción a realizar, que ordena el actuador.

- Sensores o transductores de entrada, se dedican a medir las variables de entrada o de salida del proceso.<sup>12</sup>

Es importante recalcar que la medición de una o más variables hace determinar con certeza que es lo que sucede en un punto en específico del proceso.

### **1.3.2. Tipos de lazos de control**

Tal como se definió antes, el objetivo principal del lazo de control es mantener el proceso estable, independientemente de perturbaciones y desajustes. Se realiza la medición deseada y esta información se transporta al controlador, el cual puede tener su acción de manera automatizada o por medio de la acción humana. Depende de la decisión anterior se envía una señal hacia el dispositivo final de control, el cual ejerce influencia sobre la variable que se mide. Los lazos de control se dividen en dos grupos principales, lazo abierto y lazo cerrado.

#### **1.3.2.1. Lazo de control abierto**

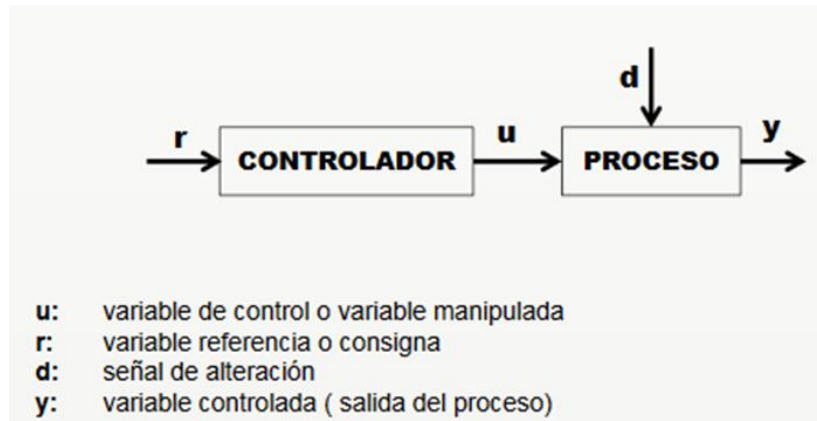
Esta clase de lazo de control se caracteriza principalmente porque la información o las variables que controlan el proceso circulan en una sola dirección, en otras palabras, no se realimenta la información del proceso al controlador, debido a lo cual, la acción correctora no lleva a un cambio en la variable manipulada.

---

<sup>12</sup> ENRÍQUEZ, Gilberto. *El ABC de la instrumentación en el control de procesos industriales*. p.12.



Figura 3. Diagrama de lazo de control abierto

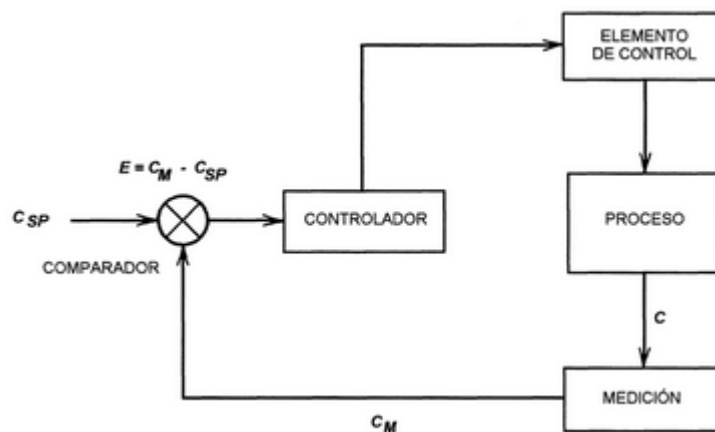


Fuente: Academia Universitaria Cartagena. *Control de procesos*. Consulta: 27 de julio 2020.  
[http://www.cartagena99.com/recursos/alumnos/apuntes/TEMA%207%20Acciones%20de%20Control%20S\\_y\\_C.PDF](http://www.cartagena99.com/recursos/alumnos/apuntes/TEMA%207%20Acciones%20de%20Control%20S_y_C.PDF).

### 1.3.2.2. Lazo de control cerrado

Es un tipo de lazo de control por retroalimentación. Debido a que la salida del controlador es calculada en función de la información recibida del proceso y la ley de control implementada.

Figura 4. Diagrama lazo de control cerrado



Fuente: ENRÍQUEZ, Gilberto. *El ABC de la instrumentación en el control de procesos industriales*. p.13.

### 1.3.3. Controladores

Este es el punto del lazo de control donde la señal de referencia recibida se compara con un punto de ajuste que define el error.

#### 1.3.3.1. Tipos de lazo de control

Se denominará a la adquisición de datos y a el control con el termino de control de procesos, existen diferentes maneras de controlar los procesos, a continuación, los más importantes:

- Controladores tipo P: también llamado proporcional (P), este es un tipo de controlador lineal, simple y sencillo, es la relación entre la señal de salida del controlador y la señal de error actual.

$$y_r(t) = \pm K_r e(t)$$

- Controladores tipo I: denominado como tipo integral (I), es un tipo de controlador lineal sencillo, dado que consta de un solo modo donde la señal de salida del controlador resulta de integrar la señal de error actual.

$$y_r(t) = \pm K_r T_i \int_0^t e(t) dt$$

- Controladores tipo PD: esta configuración llamada proporcional-derivativo (PD) es el resultado de la combinación lineal de los modos P y D y en consecuencia la relación entre la señal de salida del controlador y la señal de error actual es:

$$y_r(t) = \pm K_r [e(t) + T_D \frac{de(t)}{dt}]$$

- Controladores tipo PI: la configuración proporcional-integral (PI) es básicamente la combinación lineal de los modos P e I y en consecuencia la relación entre la señal de salida del controlador y la señal de error actual es:

$$y_r(t) = \pm K_r [e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt]$$

- Controladores tipo PID: la última configuración proporcional-integral-derivativo (PID), es el resultado de la combinación lineal de los modos P, I y D y en consecuencia la relación entre la señal de salida del controlador y la señal del error actual resulta ser:

$$y_r(t) = \pm K_r [e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt}]$$

### 1.3.3.2. Funcionamiento de los controladores

Los controladores funcionan comparando el valor real de la salida con el valor de entrada usado de referencia, al hacer esto establece la desviación y crea una señal de control que disminuirá la desviación a cero o a un valor diminuto.

Cabe mencionar que, en un sistema hay una señal o punto de ajuste el cual es una señal del proceso o punto de ajuste que es el valor deseado. Además, entra en juego la variable de proceso que indica el valor real de la variable en un determinado tiempo, a diferencia de estos valores (variable de proceso y señal de proceso) se le llama error. Este valor puede ser positivo o negativo,

dependiendo del ajuste que utilizará el controlador para regular la señal de salida en respuesta a la cantidad de error.

Las perturbaciones en el sistema son las alteraciones que modifican el desarrollo de un proceso industrial, actuando de diferentes maneras. Este tipo de perturbaciones son las que ocasionan que las variables lleguen a niveles críticos si no se logra controlar la situación en el momento adecuado.

La recopilación de datos del proceso requiere la recopilación automática de información de fuentes de medición analógicas y digitales, como sensores.

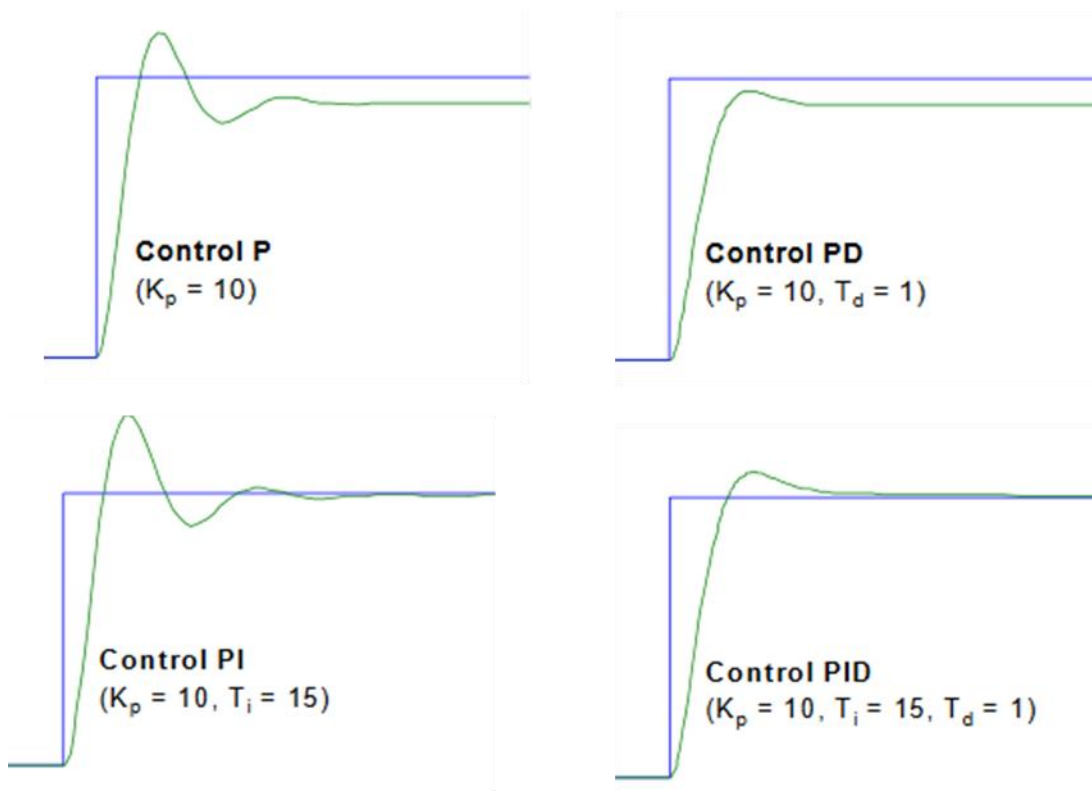
#### **1.3.3.3. Parámetros del control PID**

En mención de lo anterior, el controlador regulará la señal de salida en respuesta a la cantidad de error, a esta ganancia se le denomina PID, estos valores se pueden ajustar para cambiar la velocidad en el que el sistema responderá. Más del 95 % de los lazos de control utilizan el PID, dado que es ideal para rechazar las perturbaciones del sistema por medio de la realimentación, puede anticipar el futuro con la acción derivativa. A este control lo compone la ganancia proporcional, esta es la constante de proporcionalidad que determina cuánto cambia la salida del controlador de acuerdo con el cambio de la falla especificada.

Otro parámetro del control PID es la constante de tiempo integral, en vista que con esta constante se conocerá el tiempo requerido para que el control integral contribuya a la salida del controlador en una porción igual a la acción proporcional, de igual manera influye en la corrección que se debe de tomar para compensar las perturbaciones y conservar la variable controlada en el punto de consigna. El último parámetro que compone al control PID es la constante de

tiempo derivativa, esta constante indica el tiempo requerido para que la acción proporcional contribuya a la salida del controlador en una cantidad igual a la acción derivativa, en otras palabras, ayuda a anticipar el impacto de la acción proporcional para estabilizar de manera inmediata la variable controlada luego de cualquier perturbación.

Figura 5. **Comparación del accionar de los lazos de control**



Fuente: MORILLA GARCÍA, Fernando. *Controladores PID*. p. 11. Consulta: 27 de julio 2020.  
<http://www.dia.uned.es/~fmorilla/MaterialDidactico/EI%20controlador%20PID.pdf>.

En las figuras anteriores se visualiza en cada una la amortiguación de la respuesta ante las perturbaciones que sufre el sistema controlado, con esta comparación se aprecia notablemente que, el control PID es uno de los que mejor respuesta otorga al momento de recibir alguna perturbación.

#### **1.3.3.4. Variable controlada y manipulada**

En el control de procesos, hay dos tipos de variables, las variables controladas son las variables directas para regular, dado que su funcionalidad es estar pendiente, debido a que perjudica de forma directa el sistema del proceso. Esta variable debe permanecer estable sin cambios, porque las variaciones alterarían las condiciones requeridas previamente por el sistema, su monitoreo se da por medio de un sensor, debido a que es la condición fundamental para dar inicio al control de esta variable.

Las variables controladas son las que se mantienen constantes de manera que no interfiere la forma en que la variable independiente afecte a la variable dependiente. El otro tipo de variable es la manipulada, esta representa la condición que es variada por el controlador, para conseguir que se afecte el valor de la variable controlada.

#### **1.3.3.5. Sensores y elemento final de control**

Los sensores y los elementos finales de control son dos de las partes vitales del sistema de control. Por una parte, los sensores son dispositivos que se encargan de detectar y señalar una condición de cambio. Esta condición de cambio normalmente se llega a tratar de la presencia o la ausencia de un material u objeto. Los sensores también tienen la funcionalidad de hacer una medición, como un cambio de distancia, tamaño o color. Estos son los componentes que hacen posible la comunicación entre el mundo físico y los sistemas de medición, estos últimos, son usados en toda clase de procesos industriales y no industriales para fines de medición, control, monitoreo y procesamiento.

Existen diferentes tipos de sensores, dependiendo de la necesidad y la variable a medir, así es su construcción y funcionamiento, existen sensores de presión, sensores de flujo, sensores de temperatura, termocuplas, termistores, sensores de nivel, flotadores, sensores de presión diferencial, sensores de peso, sensores de conductividad, sensores de velocidad, sensores de pH, entre otros.

El elemento final de control es un mecanismo que cambia el valor de la variable que se manipula en respuesta a una señal de salida del controlador. Estos elementos reciben señales del controlador y manipulan el flujo del material y energía al proceso. El elemento final de control puede ser de varios tipos, como motor eléctrico, válvula de control, servo válvulas, relé, variadores de frecuencia, elementos calefactores y amortiguadores. Estos elementos constan de dos partes principales, la primera parte es el actuador que convierte la señal del controlador en comandos del dispositivo de control. El segundo es el mecanismo de ajuste de las variables manipuladas.

#### **1.3.3.6. Tipos de alarma**

En los procesos es necesario tener un determinado nivel de seguridad de las variables críticas y vitales del sistema, por tal razón, es importante tener cierta medida entre valores máximos y mínimos, dependiendo de las necesidades que presente la variable, esto para tenerla de manera estable en el proceso. Cuando una de estas variables sobrepasa el límite permisible que pone en riesgo el sistema completo, es necesario generar un aviso o alarma que permita al operador actuar de manera adecuada para controlar los niveles del proceso y poder corregir la situación que ha originado la alarma.

Es determinante recalcar la importancia de diferenciar un aviso y una alarma, porque un aviso es algo que va a suceder, en este caso indicar que una

variable está por llegar al límite del valor permisible. Las alarmas son la confirmación de que los fenómenos no previstos ocurren. En la industria existen diferentes métodos de generar un aviso o alarma del sistema, pudiendo ser de tipo luminoso o con parpadeo intermitente. De igual forma, existen los cambios de color del tipo luminosos, esto para indicar la gravedad del aviso o alarma que se origina.

También existen audibles, los cuales generan diferentes tipos de sonidos de alarmas, depende la necesidad que se registre en el momento. Los dispositivos para alarmar a los operarios o técnicos son de diferentes tamaños, voltajes y colores, dependerá del ambiente en el que sea utilizado.

#### **1.3.4. Conceptos del sistema SCADA**

El sistema Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) es un instrumento de automatización y control industrial, normalmente utilizada en la mayoría de los procesos productivos donde se necesite supervisar, recopilar datos, analizar datos, controlar y crear informes a distancia por medio de una aplicación informática. Su función principal es la de evaluar los datos recabados, esto lo ejecuta con el propósito de arreglar posibles errores y conservar las variables en un estado estable.

En el libro *Simulador de Automatización* se encuentra la siguiente definición del sistema SCADA, “El sistema SCADA es una agrupación de aplicaciones informáticas instaladas en un ordenador Máster”<sup>13</sup>, de esta forma se le denomina al ordenador o también llamado MTU. “Este ordenador es destinado al control automático de una actividad productiva a distancia”<sup>14</sup>, el ordenador esta

---

<sup>13</sup> AutoSim 200. *SMC International Training: Simulador de automatización*. Consulta: 8 de septiembre 2020. <https://www.smctraining.com/es/webpage/indexpage/108>

<sup>14</sup> *Ibíd.*



interconectado con otros instrumentos llamados de campo, estos pueden ser los autómatas programables y las unidades de terminal remota.

Este sistema formado por un software o hardware permite controlar los procesos industriales de forma local o remota, de igual forma permite monitorear, recopilar y procesar datos en tiempo real. Existe una interacción directa con dispositivos como sensores, válvulas, motores e interfaces *Human-Machine Interface* (HMI).

Este sistema permite grabar secuencialmente en un archivo acontecimientos que se producen en un proceso productivo, como las variaciones que sufren las variables a consecuencia de las perturbaciones ajenas a ella. Con esta información se puede realizar la gestión de la verificación de las causas que provocan las perturbaciones a las variables críticas.

Los PLCs (*Programmable Logic Controller*) y RTUs (*Remote Terminal Unit*) son microprocesadores de los cuales se vale el sistema SCADA para recibir información de las variables, estos componentes se comunican con una serie de instrumentos, como las máquinas de fabricación, HMI, sensores y dispositivos finales. Después usan computadoras con software SCADA para enviar la información de esos objetos. Este software es capaz procesar, distribuir y mostrar datos, lo que es de gran ayuda para los operadores y técnicos a cargo de las maquinas. Esto es para detectar posibles daños a los componentes del proceso industrial.

La importancia de este sistema se encuentra en la automatización. Porque permite que en la industria se estudie y anticipe una respuesta óptima a las condiciones medidas y se puedan ejecutar esas respuestas automáticamente. Para los sistemas de alarma, el control preciso de la máquina es esencial para

poder monitorear y procesar la información correctamente. Con estos sistemas se reduce el error humano de manera eficiente.

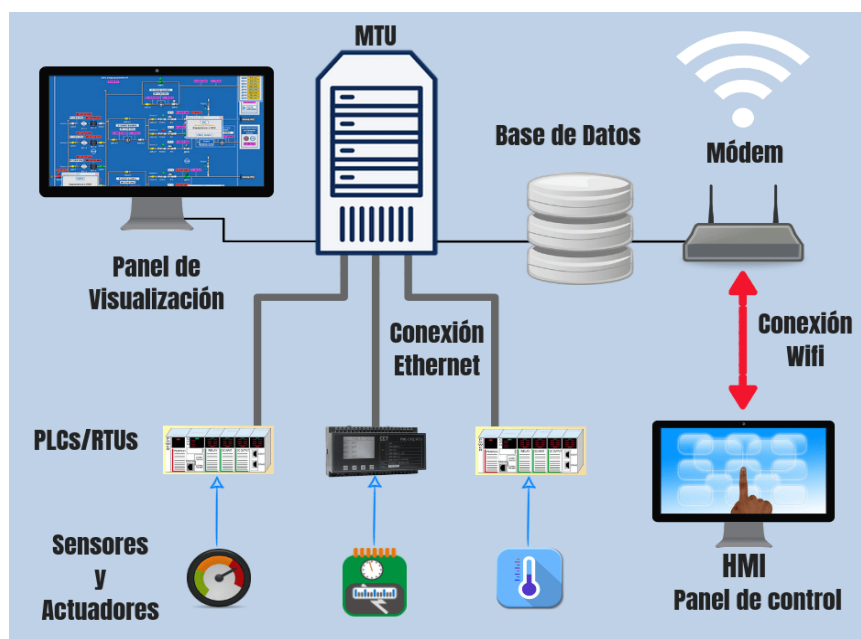
#### **1.3.4.1. Elementos del sistema SCADA**

Tal como su nombre lo indica, el sistema SCADA necesita de elementos o componentes para realizar la supervisión, control y adquisición de los datos.

- HMI: este es el nombre de la interfaz hombre-máquina conectada, que tiene la función de mostrar los datos del proceso al operador a través del sistema de monitoreo. Además, controla las acciones a realizar a través de la pantalla.
- MTU o Sistema de supervisión: tiene la función de recolectar los datos del proceso y enviar las instrucciones necesarias para controlar el proceso a través de comandos.
- RTUs: estos son microprocesadores que adquieren señales independientes de acciones y luego envían información adquirida de forma remota para su procesamiento. Se conectan a sensores, convierten la señal recibida en datos digitales y luego la envían a una computadora o sistema de monitoreo.
- PLCs: también llamados autómatas programables, debido a su bajo costo, versatilidad, flexibilidad y configuración más fácil que los RTU, se utilizan como dispositivos de campo en el sistema.
- Red o sistema de comunicación: responsable de establecer la conexión de MTU a RTU y PLC.

- Sensor: es un dispositivo que actúa como detector de cantidades físicas o químicas, estas cantidades también se denominan variables de sistema, el sensor las convierte generalmente en variables o señales eléctricas.
- Actuador: este es el nombre de un dispositivo mecánico que se utiliza para actuar o proporcionar movimiento en otro dispositivo mecánico.

Figura 6. **Componentes del sistema SCADA**



Fuente: Curso Aula 21. *Centro de formación técnica para la industria*. Consulta: 28 de julio 2020. <https://www.cursosaula21.com/que-es-un-sistema-scada/>.

### 1.3.5. Software para simulación de circuitos de automatización industrial

A nivel de software existen múltiples programas para diseñar y probar simulaciones de automatizaciones industriales, algunos de ellos son gratuitos, otros online y otros de pago. Sin embargo, la importancia de ellos se encuentra

en la certeza y confianza que dan estas simulaciones al compararlas con la realidad y que tan aproximados a ella están. Se presenta en la siguiente tabla con diferentes softwares, se identifican las ventajas y desventajas

Tabla II. **Comparación de softwares de simulación de circuitos de automatización industrial**

Software	Características	
	Ventajas	Desventajas
<b>NI LabVIEW</b>	Lenguaje de programación intuitivo. Bibliotecas y herramientas de desarrollo de alto nivel específicas de la aplicación. Cientos de funciones de E / S, control, análisis y presentación de datos. Ayuda contextual integrada y tutoriales extensos. Flexibilidad del <i>software</i> .	Seguridad (menos niveles de acceso). Menos capacidad de procesamiento.
<b>Auto SIM</b>	Esto permite a los usuarios simular, controlar y monitorear el proceso de automatización real en un entorno virtual. Puede utilizar texto estructurado para crear conjuntos de gráficos, escaleras, diagramas de puertas lógicas y bloques de funciones. Puede ejecutar una simulación para monitorear y controlar cada paso que da su aplicación.	Limitaciones para realizar la programación de un sistema SCADA.
<b>Zelio Soft</b>	Software de descarga gratuita. Para la programación de diagramas de escalera, existe una herramienta de "prueba de conformidad" que puede ayudar a verificar si hemos dejado conexiones abiertas o errores simples. Además de poder programar el sistema de diferentes formas, también podemos simular en el propio programa sin tener que conectar el dispositivo en ese momento.	Uso de relés de la marca del software para implementar la simulación.

Continuación de la tabla II.

Software	Características	
	Ventajas	Desventajas
<b>PC SIMU</b>	Permite la simulación gráfica de procesos automáticos intercambiando entradas y salidas, evitando así tener que activar interruptores de entrada o ver los leds de salida del PLC.	Catálogo de la biblioteca del software, con pocos componentes para realizar la simulación.

Fuente: elaboración propia.

Se observa en la tabla anterior, los diferentes tipos de software, para realizar la simulación del circuito de este trabajo de graduación, se utilizará el software LabVIEW 2020 SP1, debido a que ofrece mayores ventajas en comparación con los demás softwares. LabVIEW 2020 SP1 ofrece una mayor solidez y confianza al momento de realizar las simulaciones en él, también proporciona una facilidad en programación, porque puede ser utilizado por personas profesionales en dicho ámbito como para las personas que no poseen dicho conocimiento.

#### 1.4. Norma IEC 62682

Es imperativo conocer la importancia de los sistemas de alarma, la gestión y el diseño de estas. La historia de las catástrofes industriales nos demuestra que el debido control de las máquinas y procesos peligrosos, que por casualidad pueden salirse de control y provocar una catástrofe irreparable, al mismo tiempo comprometer la funcionalidad y la seguridad de los sistemas y el mismo proceso, pueden llegar a ser controladas por un sistema el cual esta baso en la gestión y diseño adecuado de las alarmas. Por tal motivo fue diseñada la norma IEC 62682.

Es importante mencionar que para la industria es necesario reducir los riesgos asociados al funcionamiento de una caldera a un nivel aceptable, por tal motivo, existe la norma NFPA 85, “La norma NFPA 85-2019 proporciona pautas para el operador de calderas y capacitación en mantenimiento.”<sup>15</sup> Si se habla de un punto de vista de funcionalidad y seguridad, se menciona a la norma IEC 62682, como se mencionó en el párrafo anterior, esta norma nos recomienda el diseño y gestión que debe de tener un sistema de alarmas para un buen funcionamiento.

#### **1.4.1. Historia de la norma IEC 62682**

Una alarma consiste en un medio visual o audible que indica al operador el mal funcionamiento del equipo, la desviación del proceso o cualquier condición anormal que requiera una respuesta oportuna. Un diseño adecuado del sistema de alarmas proporciona un control más efectivo sobre los eventos que perturben al sistema, esto ayuda al operador a reconocer y responder ante una situación rápidamente. Los problemas relacionados con la operación de la maquinaria o equipo, es la gran cantidad de información a la que el operador está expuesto, lo que dificulta su visualización y el actuar del operador se ve afectada.

Debido a la recurrencia de accidentes industriales y a la mala gestión del sistema de alarmas, desde su diseño hasta su implementación, dio lugar a métodos de gestión por primera vez en la norma EEMUA 191 publicada en 1999, diez años después la norma ISA 18.2 añadió un planteamiento en el ciclo de vida de las alarmas, hasta que en 2014 fue publicada la norma IEC 62682, hace hincapié en el ciclo de vida de las alarmas desde su diseño hasta su adecuado manejo y actualización de ellas.

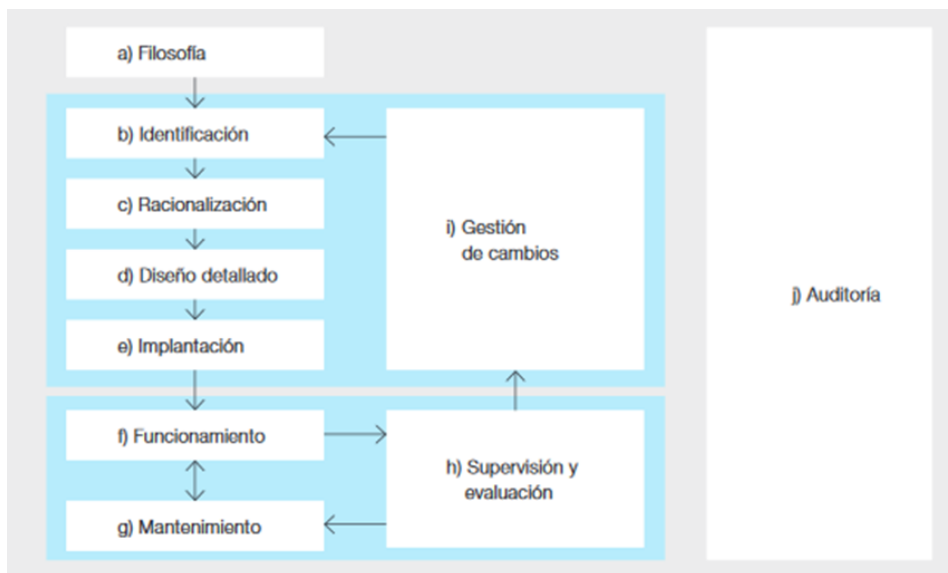
---

<sup>15</sup> Secure Week. *NFPA 85-2019 Código de riesgos de sistemas de combustión y calderas*. Consulta: 8 de septiembre 2020. <https://www.secureweek.com/nfpa-85-2019-codigo-de-riesgos-de-sistemas-de-combustion-y-calderas/>

En ella se indica que es importante determinar los aspectos principales y críticos del ambiente donde será utilizada dicha alarma, este paso puede ser realizado para el diseño con la ayuda de simuladores. Posteriormente, durante el uso de la fábrica, se puede recopilar más información sobre las máquinas que utilizarán la alarma para revisar las decisiones de diseño originales. La norma IEC 62682 es una guía útil sobre el contenido y la estructura de las alarmas adecuadas y enfatiza la necesidad de su aplicación en diferentes sistemas de alarma utilizados en máquinas industriales.

La norma IEC 62682 especifica los principios y procedimientos del sistema de alarma en un sistema de control que utiliza tecnología HMI para monitoreo y control.

Figura 7. **Ciclo de vida de la norma IEC 62682**



Fuente: ABB Technology Ltd. *Descubrimientos alarmantes*. ABB Review. Consulta: 26 de agosto de 2020.

[https://library.e.abb.com/public/0233cb039738494c9988044c4c1d9008/Revista%20ABB%201-2016\\_72dpi.pdf](https://library.e.abb.com/public/0233cb039738494c9988044c4c1d9008/Revista%20ABB%201-2016_72dpi.pdf)

#### **1.4.2. Aplicación de la norma IEC 62682**

Tal como lo detalla ABB en su revista *Descubrimientos Alarmantes*, la falta de implementación de la norma al sistema de alarmas son de los mayores desafíos en la industria, por tal razón la norma IEC 62682, en su ciclo de vida (figura 7) presenta el paso inicial para la concepción de un sistema de alarmas como tal, porque se debe comenzar con el concepto de alarma que define claramente las funciones y responsabilidades, los requisitos que debe cumplir la alarma y el flujo de trabajo y los procedimientos implementados de acuerdo con los requisitos acordados.

Esta norma es una guía para el diseño de la alarma, teniendo siempre presente la gestión y funcionamiento adecuado. Es ideal que para concretar un sistema de alarma se lleve a cabo un diseño de esta de manera documental, en vista que al momento que esta sea implementada se pueda tomar en cuenta las características generales del sistema, como lo son las variables críticas que rigen el funcionamiento de la máquina. De igual forma la norma establece la necesidad de un sistema donde se registren de manera adecuada los datos generados de las perturbaciones del sistema que activen una alarma.

La racionalización de la alarma es importante porque recalca las consecuencias de inacción o de la acción incorrecta del operario, al mismo tiempo la causa probable de la alarma.

Debido al manejo que la norma IEC 62682 plantea para el diseño de las alarmas, la aplicación de esta norma al sistema de alarmas no debe de faltar en los sistemas de calderas. En la *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica* se destaca la necesidad de un sistema de alarma para la explotación eficiente y fiable de las calderas industriales, porque esos sistemas de detección y



diagnóstico automático de fallos en la caldera presentan varias ventajas tales como la alta eficiencia, fiabilidad y disponibilidad de la caldera. Estos sistemas ayudan a registrar la evolución del proceso y detectar fallos de manera temprana esto con el fin de evitar daños y pérdidas.

## **1.5. Marco regulatorio nacional**

Guatemala cuenta con una normativa regulatoria sobre la salud y seguridad ocupacional, estos indican tanto las medidas de prevención como las sanciones por no cumplir las mismas.

### **1.5.1. Acuerdo gubernativo 229-2014 y su reforma 33-2016**

Este acuerdo fue publicado en el diario oficial el 8 de agosto del 2014 y fue creado con el objeto de regular las condiciones generales de salud y seguridad bajo las cuales los trabajadores y patronos deben de cumplir con el fin de proteger la vida, la salud, la seguridad y el bienestar físico de los trabajadores. Específicamente, el artículo 522 de este Acuerdo, remarca las condiciones de seguridad que deben de cumplir los equipos destinados a contener fluidos bajo presión. El Acuerdo también establece que el Ministerio de Trabajo y Previsión Social (MINTRAB) y el Instituto Guatemalteco de Seguridad Social (IGSS), cuando la gravedad o inminencia de peligro lo amerite, suspenderán todos o algunos de los locales de determinado lugar de trabajo, así como de prohibir el uso de cierta maquinaria, dispositivos, herramientas o equipos que amenacen gravemente la vida, la salud o la integridad física de los trabajadores, caso contrario si se toman las medidas de seguridad necesarias para evitar cualquier peligro.

### **1.5.2. Reglamento general sobre higiene y seguridad ocupacional IGSS**

El objeto de este reglamento es regular las condiciones generales de salud y seguridad, bajo estas condiciones los trabajadores de patronos privados, el estado, las municipalidades y los trabajadores de los organismos autónomos que están obligados a cumplir con el deber de proteger la vida, la salud y la integridad física.

El uso adecuado de las calderas y tanques de almacenamiento de líquidos a presión se especifica en el capítulo 2, artículo 27. Este indica que se deben reunir las condiciones de seguridad establecidas por las disposiciones especiales, referentes a las calderas.

Las sanciones se enumeran en el título VII de este reglamento y dependen de la gravedad de la infracción y de la capacidad financiera del infractor. Las sanciones oscilan desde Q100.00 hasta Q1,000.00. Cuando la gravedad del riesgo y la amenaza inminente son justificables, el Ministerio de Trabajo y Bienestar Social suspenderá todo o parte del trabajo, así también el prohibir el uso de algunas máquinas, equipos, herramientas o dispositivos que se empleen y que constituyan un riesgo grave para la vida, la salud física o el bienestar de los trabajadores hasta que se tomen las medidas de seguridad necesarias para prevenir los riesgos.

### **1.5.3. Otras leyes aplicables**

La legislación laboral en Guatemala crea instituciones para regular los derechos y obligaciones de empleadores y empleados y resolver disputas en el proceso de trabajo. En particular, los artículos 271 y 272 del Código de Trabajo,

determinan las sanciones administrativas que la inspección general del trabajo aplica en consideración a la situación financiera de la persona sancionada, los medios de subsistencia del sancionado, antecedentes, condiciones personales, riesgos y otros factores que, en general, pueden adaptarse bien a las sanciones administrativas. En caso de reincidencia, la multa se incrementará al 50 %. Si ha pasado un año desde la fecha de vigencia de la sanción hasta la nueva fecha de infracción, no habrá reincidencia. Las violaciones de la prohibición resultarán en multas de hasta el salario mínimo de 3 a 14 meses por mes aplicable a las actividades no agrícolas.

En el Código Penal de Guatemala, en el artículo 127 se especifica la sanción referente sobre el homicidio culposo, con prisión de dos a cinco años. De igual manera se define en el artículo 150 las lesiones culposas, las cuales incurrirán en una sanción con prisión de tres meses a dos años. Es importante mencionar que en este tipo de situaciones culposas en la ocurrencia de un accidente de trabajo puede ocasionarse por negligencia e imprudencia ya bien por el empleador o superiores.

## **2. INSTRUMENTACIÓN Y LAZOS DE CONTROL DE VARIABLES DEL PROCESO**

“La instrumentación industrial está basada en la aplicación de aparatos de medición a uno o varios objetos, esto con el objetivo de identificar y cuantificar las variables que intervienen en el sistema.”<sup>16</sup> Estos aparatos son los que ayudaran al controlador a conocer el estado de las variables y corregir los errores que surjan del proceso con el cual se trabaja.

### **2.1. Variables del funcionamiento de la caldera**

Se denominan variables de proceso a aquellas que pueden cambiar la situación de un proceso industrial, este pudiéndolo afectar en su aspecto físico, químico o ambos, según sea la constitución de la variable que perturba el proceso. Es importante mencionar que en todo proceso industrial existen diversas variables, estas pueden afectar las entradas y salidas del proceso. Estas variables son de gran interés, puesto que se pueden medir o modificar para alterar de alguna manera el proceso.

Las variables pueden ser de diferentes tipos, las principales son:

- Temperatura
- Presión
- Flujo o caudal
- Nivel

---

<sup>16</sup> GUTIÉRREZ, Marlleis del Valle e ITURRALDE, Sadi. *Fundamentos Básicos de Instrumentación y Control*. p.1.

- Impurezas en el agua

Estas variables están relacionadas con el funcionamiento de la caldera que se explica en el capítulo anterior.

### **2.1.1. Temperatura**

Este es el nombre que se le da a la cantidad de energía interna o de calor que disponible en un cuerpo. Para las calderas, la temperatura y el calor son la cantidad de energía que este componente posee en su interior. Para medir la temperatura se necesita un elemento que es fundamental para su medición, este es el termómetro. En las calderas se encuentran diferentes tipos de termómetro entre los que se puede mencionar los siguientes.

#### **2.1.1.1. Termómetro de dilatación**

El principio de funcionamiento se basa en el cambio del volumen de un objeto cuando varía la temperatura. Estos pueden utilizar como sustancia termométrica un material sólido, líquido o gaseoso. En la práctica se utilizan los termómetros sólidos para mediciones no tan precisas, debido a que tienen un coeficiente de dilatación muy pequeño. De igual forma el termómetro de gas a presión no es muy utilizado debido a su complicada manipulación. Caso contrario se da con los termómetros de dilatación de líquidos, son más utilizados los que contienen como sustancia termométrica el mercurio o el alcohol.

#### **2.1.1.2. Termómetros termoelectrónicos**

La combinación de dos metales dieléctricos provoca un cambio en el potencial que da el valor de temperatura en ese punto. Este tipo de termómetro

es muy utilizado en calderas para controlar la temperatura del líquido en circulación. Estos cuentan con una soldadura o punto caliente como puntos de medición y soldadura en frío como puntos de referencia.

#### **2.1.1.3. Termómetro de presión**

La medición se basa en las fluctuaciones de presión presentes en un gas en particular para corregir la temperatura para la medición. Básicamente, una medición es la relación entre la presión de vapor y la temperatura del gas en una medición. Esto se debe a que la temperatura exterior del termómetro hace que el gas del interior se expanda.

#### **2.1.1.4. Termómetro de resistencia**

Estos miden los cambios que presentan por la resistividad eléctrica que se da en los cuerpos por el cambio de temperatura en ellos. El funcionamiento de este termómetro viene dado por la variación de la resistencia del hilo de platino en función de la temperatura. Una fuente de corriente eléctrica se conecta al hilo, de igual forma se conecta un equipo que ayude a traducir las variaciones de resistencia en indicaciones de temperatura.

### **2.1.2. Presión**

Se denomina presión a la relación que existe entre una fuerza y el área sobre la cual actúa esta, esto quiere decir que las unidades de medición de presión están relacionadas entre las unidades de fuerza / unidades de área. Es importante considerar los diferentes tipos de presión que existen, tales como la presión manométrica, presión absoluta y presión diferencial.

En las calderas acuatubulares se manejan altas presiones, esto se define en el momento del diseño de la caldera puesto que la potencia nominal de esta varía en función de la presión de trabajo del generador y la temperatura del agua de alimentación a la caldera. Es importante recordar que la presión actúa sobre las paredes de la caldera.

Para que se tenga un registro de esta variable se utilizan comúnmente medidores analógicos que utilizan una aguja que apunta a un número en una escala correspondiente a la presión detectada, entre ellos se pueden mencionar los siguientes.

#### **2.1.2.1. Manómetro Bourdon**

Es un tipo de medidor es un tipo de medidor que no requiere una fuente de alimentación externa para funcionar mecánicamente. Este manómetro consiste en tubos curvados en arco que cuentan con una sección oval. Cuando se aplica presión en el interior del tubo, este tiende a enderezarse. Traza la trayectoria a través de la aguja que transmite a un mecanismo que muestra las medidas de presión registradas en ese momento.

#### **2.1.2.2. Manómetro de fuelle**

Los manómetros de fuelle utilizan una pieza axial flexible la cual se encarga de dilatarse y contraerse al momento en el que un fluido entra en una cámara, lo cual hace que se deforme proporcionalmente a la presión aplicada sobre el dispositivo.

#### **2.1.2.3. Sensor piezoeléctrico**

La característica principal de este sensor se debe a la falta de una fuente externa para su funcionamiento, puesto que está conformado por elementos piezoeléctricos que transforman la deformación sufrida en una señal eléctrica. En otras palabras, su funcionamiento depende del efecto piezoeléctrico en ciertos materiales.

#### **2.1.2.4. Presostatos**

Básicamente, su funcionamiento está en el equilibrio entre la fuerza por la presión del líquido y la fuerza por el sistema de fuelles y resortes. Para este tipo de sensor se pueden encontrar de diferente tipo, los de ajuste fijo o los de modulación.

### **2.1.3. Flujo o caudal**

Se denomina caudal al volumen de un líquido que circula en un lugar específico, en la caldera se monitorea el flujo de vapor se controla como presión diferencial. De hecho, la condensación del vapor de agua reduce la presión. El flujo de vapor debe canalizarse al lugar donde se utilizará el vapor.

### **2.1.4. Nivel**

En el funcionamiento de una caldera es importante monitorear el caudal de alimentación de agua, puesto que un nivel bajo de esta puede ocasionar desde una fuga a una explosión. Esto se da debido a que los tubos de la caldera se dilatan a medida que el nivel de agua baja y deja a los tubos con un nivel muy



bajo de agua, estos se suelen romper por los asientos o los puntos de unión, lo cual produciría fugas.

Actualmente para realizar el monitoreo de esta variable se utilizan válvulas controladoras que dependen de sensores para detectar el nivel de agua, luego esta transfiere esta medida a un actuador que ajustara el nivel a un nivel deseado.

#### **2.1.4.1. Sensor capacitivo**

Es utilizado dentro de la caldera, la medición que registra se basa principalmente en la capacidad del capacitor que aumenta constantemente de acuerdo con el nivel de llenado. En presencia de líquido entre los electrodos y la superficie metálica del tanque ceba el funcionamiento de la electrónica del dispositivo y de la conmutación del relé de salida.

#### **2.1.4.2. Sensor ultrasónico**

Este sensor utiliza la emisión de pulsos ultrasónicos, los cuales son reflejados por la superficie del medio luego el mismo sensor los capta en forma de señal. Son de gran utilidad, puesto que proporcionan una medición de nivel de forma continua, otra ventaja es que la medición no se ve afectada por la densidad, humedad, ni la constante dieléctrica del medio.

#### **2.1.4.3. Sensor de flotador**

El sensor de flotador posibilita medir el nivel del agua de trabajo por medio del flotador y el *microswitch* para niveles altos y bajos de agua. Si el nivel del agua alcanza o supera el sensor del nivel de agua, se utiliza como herramienta principal o auxiliar para activar la bomba de agua de alimentación.

Suele instalarse fuera de la caldera para controlar fácilmente el nivel del agua en el interior. El sensor además tiene un modelo con un acoplamiento para instalar un visor de agua.

#### **2.1.4.4. Electroodos de nivel**

Son controladores que operan en la transmisión de señal por medio de los electrodos con los que se cuenta, estos son los que comandan la salida de la tensión, este habilita el contactor de la bomba de agua. Normalmente tienen cuatro electrodos, inferior, superior, extremo y masa. Se conecta en paralelo a la bomba de alimentación de agua.

#### **2.1.5. Impurezas en el agua**

Otro de los problemas ocasionados por las impurezas en el agua de aportación que pueden aparecer en la caldera al momento que esta es utilizada son los que se presentan en la siguiente tabla

Tabla III. **Problemas ocasionados por impurezas en el agua**

Incrustaciones
Corrosiones
Arrastres
Depósitos

Fuente: Consejería de Economía y Hacienda Comunidad de Madrid. *Guía Básica de Calderas Industriales Eficientes*. p. 47.

Las incrustaciones se forman directamente sobre la superficie de calefacción, esto se sucede porque las sales en disolución saturadas presentes en el agua se cristalizan. Este tipo de fenómeno es peligroso, debido a que reducen el rendimiento térmico de las calderas y ocasiona un recalentamiento importante en el metal expuesto a la llama.

La corrosión es el proceso por el cual el metal expuesto al medio ambiente cambia de un metal puro a una forma más inestable. Las altas temperaturas, los gases corrosivos y la presencia de sólidos disueltos en el agua promueven una rápida corrosión dentro del intercambiador de calor.

El arrastre de condensado tiene una relación estrecha con el vapor húmedo. El vapor de una caldera siempre contiene partículas de agua. Cuando el vapor regresa al recalentador, los residuos sólidos de la evaporación del agua de la caldera pueden depositarse parcialmente en la caldera. El vapor generado por la caldera debe de contener en torno a un 3 % o 5 % de humedad<sup>17</sup>.

El exceso de sólidos en suspensión, llamado depósitos, puede hacer que los componentes de control de la caldera, como los transductores de nivel y de presión, presentes fallos.

Para evitar este tipo de problemas a lo largo del funcionamiento de la caldera, es importante realizar diferentes tipos de tratamientos en el agua tales como los tratamientos fisicoquímicos del agua de aportación y los tratamientos internos del agua de caldera. También existen normativas que regulan los parámetros básicos que debe de contener el agua de alimentación y el agua de

---

<sup>17</sup> Sistemas Industriales de Calderas. *Conceptos básicos del vapor*. Consulta: 4 de junio 2021. <https://sincal.es/conceptos-basicos-del-vapor/>

caldera. Si corresponde, los parámetros deben validarse con base en los siguientes estándares:

Tabla IV. **Normativas para el análisis de impurezas en el agua**

<b>Parámetro</b>	<b>Norma</b>
<b>Capacidad ácida</b>	EN ISO 9963-1
<b>Conductividad</b>	ISO 7888
<b>Cobre</b>	ISO 8288
<b>Hierro</b>	ISO 6332
<b>Oxígeno</b>	ISO 5814
<b>pH</b>	ISO 10523
<b>Fosfato</b>	ISO 6878-1
<b>Potasio</b>	ISO 9964-2
<b>Sílice</b>	Hasta la fecha, no existen estándares europeos o internacionales aplicables. Véase, por ejemplo, el método estándar alemán DIN 3805-21 para analizar agua, aguas residuales y lodos.
<b>Sodio</b>	SO 9964-1
<b>Dureza total (Ca + Mg)</b>	ISO 6059
<b>Conductividad ácida</b>	El interruptor debe estar ubicado en un cilindro con una relación diámetro / altura de no más de 1: 3 y los medios de conmutación deben ocupar al menos 3/4 del cilindro. Esto se puede comprobar mediante un interruptor con indicador de color y un cilindro transparente.

Fuente: Sistemas Industriales de Calderas. *Calidad del agua de calderas*. Consulta: 4 de junio 2021. <http://www.sincal.es/descargas/calidad-de-agua-de-calderas.pdf>

## 2.2. Variables controladas en la caldera

Como se menciona en el capítulo anterior, se les denomina variables controladas a las variables que, para el proceso se deben de mantener de manera constante a lo largo del proceso que se realiza, si este tipo de variable tiene una variación a lo largo del tiempo, podría comprometer en sobre manera a la caldera y a los operarios de esta. En las calderas es importante tener identificadas las variables controladas que harán que el sistema sea seguro para su uso, esto debido a que las calderas pueden experimentar condiciones inseguras de funcionamiento, las cuales pueden desencadenar en una explosión de la caldera.

Las explosiones son el principal riesgo que puede sufrir la caldera, estas explosiones pueden ser de tipo físicas o químicas. Un aumento significativo de la presión del vapor en una caldera puede provocar una explosión física, si en el hogar de la caldera quedan restos de inquemados, pueden provocar una explosión del tipo químico. En la siguiente tabla se mencionan las causas de las explosiones, las primeras dos ocasionan explosiones físicas y la tercera ocasiona explosiones químicas.

Tabla V. **Causas de explosión en la caldera**

Alta Presión
Alta Temperatura
Combustión instantánea del combustible

Fuente: Cosmo Palasio. *Riesgo Lab - Calderas: Riesgos de explosiones*. Consulta: 12 de octubre 2020. <https://riesgolab.com/index.php/component/k2/item/1054-calderas-riesgo-de-explosiones>.

Estas causas de explosión deben de ser monitoreadas, debido a que se desee reducir en todo momento la ocurrencia de un accidente de estas magnitudes, esto se logra implementando un sistema de monitoreo permanente para el tipo de variable de control relacionada con las causas de explosión en una caldera mencionadas en la tabla IV, a continuación, se enumera las variables controladas que están relacionadas a estas causas.

### **2.2.1. Nivel de agua**

Esta es una de las principales variables que deben de ser controladas, en la sección de domos y agua de alimentación de la caldera se emplea el monitoreo de este nivel, debido a que el bajo nivel de agua puede pueden ser los más peligrosos, porque pueden dañar gravemente la infraestructura y, a menudo, tener consecuencias catastróficas. Como lo podrían ser las altas temperaturas en la caldera, es importante mencionar que esta variable también está relacionada con la demanda de vapor. Este último ocasiona en el nivel de agua un comportamiento un poco inusual, puesto que produce un esponjamiento o una contracción ante los cambios de carga de vapor, estos cambios a su vez modifican el nivel en la dirección opuesta a la que, de manera intuitiva, se esperaría que sean en la misma dirección.

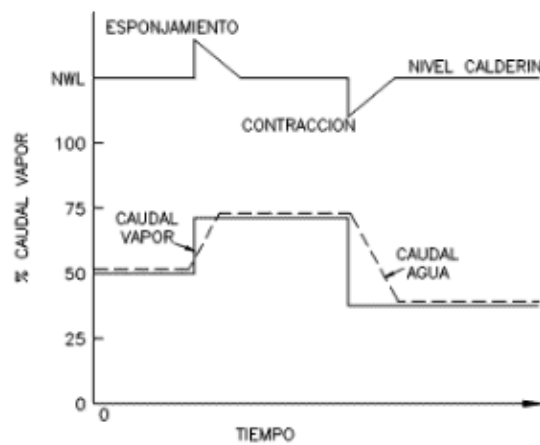
Esto significa que, al instante de un incremento de la demanda de vapor, el nivel de agua aumenta de forma temporal al extraerse más vapor de la caldera, situación intuitiva sería la de la disminución del nivel. Esta disminución en el nivel se registra debido al descenso de la presión, esto paralelamente causado por el crecimiento de consumo.

Esta demanda de vapor además causa un incremento en la evaporación y en el tamaño de las burbujas de vapor, a esto se le conoce como esponjamiento,

que hace incrementar el nivel. Caso opuesto se registraría frente a una disminución en la carga, esto genera una disminución en el nivel del agua, situación ocasionada por el incremento en la presión. Este último origina una menor evaporación y un menor tamaño en las burbujas de vapor, situación que se llama contracción, que hace reducir el nivel del agua.

En la figura 8 se aprecia el comportamiento del nivel al registrarse la situación anteriormente mencionada.

Figura 8. **Relación entre la demanda y el nivel del agua**



Fuente: Instrumentación y control .net. *Control de nivel de agua de alimentación de calderas.*

Consultado: 2 de noviembre 2020. <https://instrumentacionycontrol.net/cap-3-3-control-de-nivel-de-agua-de-alimentacion-de-calderas//>

### 2.2.2. Llama

El control de llama se debe realizar principalmente al monitorear la presencia de esta al momento en el que la caldera este en pleno funcionamiento y actuar en dado caso se pierda la llama, para ser más preciso, el riesgo de una explosión en una caldera por combustible se da principalmente por la presencia de inquemados acumulados en el hogar, esto puede dar lugar a una explosión.

Esta falla momentánea de la llama de combustión instantánea y el reencendido no controlado pueden hacer que la caldera explote.

Para evitar esta situación peligrosa, se deben eliminar los inquemados de manera adecuada, si no se previene la acumulación de estos al momento de encender los quemadores en la nueva puesta en marcha de la caldera, se provocará una explosión, debido a la creación de una atmósfera explosiva incontrolada. Por este motivo, antes de encender la caldera, el hogar tiene que quedar libre de combustible acumulado. Junto con esto se debe de asegurar que la llama de los quemadores se mantiene encendida de forma permanente, porque si un quemador se apaga sería una entrada de combustible constante en el hogar de la caldera, lo que provoca una atmósfera explosiva continua. Por tal razón, al momento de registrarse una pérdida de llama se debe de provocar un cierre automático de la válvula de corte e inmediatamente la apertura de la válvula de venteo.

### **2.2.3. Presión de vapor**

Esta variable es de vital importancia al momento de evitar una falla en el sistema de la caldera, puede existir una sobrepresión en el sistema de vapor de la caldera debida a varias causas, la más común puede ocasionarse por la falla de los elementos de seguridad como las válvulas de seguridad o los presostatos que están incluidos en la caldera.

Esta variable debe encontrarse dentro de una estrecha banda en torno al punto de operación normal de la caldera y de las necesidades que requiera la demanda de vapor, esto con el fin de asegurar una operación completamente segura en la caldera.



## **2.3. Variables manipuladas en la caldera**

Se denomina variable manipulada al elemento al cual se le realiza una modificación por el controlador, esto con el fin de afectar la variable controlada. En otros términos, la variable manipulada perturba el proceso y esta puede ser medida y de esta manera lograr una respuesta deseada, normalmente se manipula la entrada del proceso.

### **2.3.1. Sistema de alimentación de agua**

Como es mencionado en la sección 2.2.1, el nivel del agua en la caldera es una variable que debe ser controlada, esto por la falta de agua que puede aumentar la temperatura de la caldera drásticamente, elevándola a niveles críticos para la caldera. Esta falta de agua puede detectarse mediante diferentes dispositivos, los cuales pueden ser:

- Detector mecánico
- Detector eléctrico
- Detector neumático

Al momento en el que se detecta la falta de agua, se debe solucionar el problema mediante la variable manipulada que regulara el nivel, en este caso es el sistema de alimentación de agua. Para solucionar el problema, en primera instancia, se debe de accionar el sistema de alimentación, esto con el fin de regular el nivel y mantenerlo en un rango específico, en el caso que esta medida resultase insuficiente, deberá entrar en funcionamiento un segundo dispositivo el cual detiene el sistema de aportación calorífica y este a su vez alerta al calderista de la falla por medio de una señal acústica. Como medida de seguridad es importante contar con un detector principal y uno secundario, esto debido a que,

si un detector falla, el detector restante puede realizar el trabajo y de esta manera no perderá el registro del nivel de agua. Para esta simulación se utilizará un detector principal de tipo eléctrico y el detector secundario de tipo mecánico. Con esto se puede asegurar la vigilancia permanente del nivel de agua.

Existen diferentes maneras de controlar el nivel de agua en el interior de la caldera:

Controles de nivel continuo a un elemento (nivel de agua), a dos elementos (nivel de agua y caudal de vapor consumido) y a tres elementos (nivel de agua, caudal de vapor consumido y caudal de agua de aporte)<sup>18</sup>

El control a un elemento se caracteriza porque el elemento de control final debe tener una relación lineal con la señal de control. De hecho, la compensación alrededor del punto de ajuste representa una cierta cantidad de agua para la carga de toda la caldera. Ejemplo: si el elemento final de control es una válvula de control, la señal de apertura de la válvula debe ser lineal con respecto al caudal proporcionado por la válvula. De igual manera puede ser utilizada una bomba de velocidad variable, la velocidad de esta dependerá del nivel de agua que se registre en la caldera.

El control a dos elementos, como se menciona anteriormente, dependerá del caudal de vapor consumido, esta será la señal índice que ayudará a anticipar una variación en el nivel de agua, a raíz de esto se determinará la necesidad de aportación de agua, de esta manera se puede establecer una relación entre este y la posición de la válvula. Este tipo de control no es del todo ideal, puesto que no se lleva un correcto monitoreo del agua de alimentación en relación con las modificaciones en la presión de suministro, por tal motivo es de mayor utilidad el control a tres elementos.

---

<sup>18</sup> MARTÍNEZ, Ana Belén. *Curso de introducción a la interacción persona-ordenador*. p.91.

El control a tres elementos consta del nivel de agua y el caudal de vapor, a esto le agregamos el caudal de agua de alimentación, con esto se solucionarán los problemas en el control del elemento final. En los capítulos siguientes se detallará el lazo de control de este sistema.

### **2.3.2. Sistema de combustión**

En esta sección se desarrollará el sistema de combustión en especial la influencia que tiene con las explosiones incontroladas en el lado del hogar, las cuales pueden ser ocasionadas por falla en la llama. El sistema de combustión compone la variable manipulada del sistema de alarmas, debido a que los equipos que lo componen ayudan a controlar las variables críticas en el funcionamiento de las calderas.

Los controles de seguridad en los que el sistema de combustión se ve involucrado, son aquellos en los que se debe limitar la entrada de energía y así cerrar o cortar los equipos cuando se registra o presenta una situación de inseguridad en el sistema. A continuación, se mencionan estas posibles situaciones<sup>19</sup>:

- Control de límites de presión y temperatura.
- Control de corte de combustible por bajo nivel de agua.
- Sistema de protección contra explosiones.
- Control de encendido automático por inquemados.
- Controles de cierre de válvula de combustible.
- Interconexión de controles de presión de aire y de combustible.

---

<sup>19</sup> KOHAN, Anthony Lawrence. *Manual de Calderas*. p. 449.

- Controles reguladores del suministro de agua.

Estos controles de seguridad que componen al sistema de combustión previenen ante sobrepresiones del lado de agua o vapor, sobrecalentamiento de partes metálicas situación que deformaría el metal ocasionando una explosión inminente. Por último, las explosiones en el hogar debido a mezclas incontroladas.

Las mezclas incontroladas en el hogar son debido a la falta de llama y la quema de inquemados que quedan en el hogar, esto normalmente se presenta en combustibles líquidos o gaseosos. Los incidentes por falta de llama se dan al momento de reencender la caldera. Por tal motivo, el sistema de combustión está íntimamente ligado con la presencia de la llama, porque, para evitar una explosión en la caldera se debe controlar diferentes componentes al momento de perder la llama. Hay que recordar que para que se produzca una combustión debe existir la presencia en el espacio y tiempo de tres elementos, los cuales son: el combustible y comburente, que, en este caso, es el combustible con que funciona la caldera y, por último, debe estar presente la ignición, la cual es una fuente de energía que produce el inicio de la combustión y el tercer elemento.

Este sistema se encuentra presente principalmente en el arranque de la caldera, porque el procedimiento para arrancar una caldera es iniciando con un barrido de gases inquemados que existen en el hogar, los cuales se barren con la ayuda de un ventilador. Luego del respectivo barrido se debe encender una llama piloto o una llama principal, esto dependiendo el tipo de caldera. Inmediatamente después de iniciada la chispa se procede con la apertura de la válvula magnética del combustible principal o del combustible auxiliar que alimenta la llama piloto.

En dado caso la llama piloto no está establecida dentro de un tiempo determinado se debe de proceder al cierre de la válvula magnética junto con el paro de la formación de chista, seguidamente se procede a realizar un post barrido por el ventilador. Si se forma la llama piloto, se abre la válvula magnética del combustible principal, esto ayudará a formar la llama principal. Si no se produce la llama principal en un tiempo determinado, se detendrá tanto la llama piloto como la chispa, se procede a cerrar la válvula magnética principal y se realiza un post barrido del ventilador.

En el momento en el que la llama esté formada como controlada y el quemador se encuentre funcionando de manera normal, si por cualquier circunstancia la llama desaparece, el detector de llama mandará una señal al programador para que cierre la válvula magnética asociada al combustible principal, luego al ventilador para realizar un post barrido en el circuito de los gases de combustión.

### **2.3.3. Control de presión de vapor**

La presión del vapor en el sistema se puede controlar teniendo el nivel de agua dentro de un rango recomendado debido a que este nivel está relacionado a la demanda de vapor que aporta la caldera, la ausencia de esta demanda ocasiona una sobrepresión en la caldera, lo que podría ocasionar un accidente catastrófico. El control de nivel de agua se encuentra detallado en la sección 2.3.1.

Otro factor importante que ocasiona un aumento en la presión del vapor es la temperatura, esta puede ser manipulada variando la cantidad de oxígeno que ingrese al hogar de la caldera, esto es posible debido a la estrecha relación que

existe entre el aumento de la temperatura y la presión del vapor, detallada de mejor manera en la sección 1.1.2

Es importante mantener el porcentaje de oxígeno que existe en la combustión de la caldera, este porcentaje puede ser medido por un sensor de manera permanente en la chimenea de la caldera. Dicho sensor debe ser colocado a una distancia de 8 diámetros ( $8D_{chimenea}$ ) después de la última perturbación, para que los gases de combustión no presenten turbulencia puesto que se ha desarrollado un flujo laminar y así asegurar un análisis más preciso del porcentaje de oxígeno que tiene la combustión.

De acuerdo con la Norma Salvadoreña Obligatoria (NSO) 13.11.02.07 de Emisiones Atmosféricas Fuentes Fijas Puntuales, los límites para combustión en calderas piro/acuotubulares de calentamiento indirecto son dependientes del tipo de combustible utilizado. Tales parámetros se presentan en la tabla siguiente:

Tabla VI. **Límites máximos en calderas piro/acuotubulares de calentamiento indirecto**

PARÁMETRO	SÍMBOLO	UNIDAD	GLP	DIESEL	BUNKER	BIOMASA
PORCENTAJE DE OXIGENO	% O <sub>2</sub>	%	1.5% - 3%			
PORCENTAJE DE EXCESO DE AIRE	%ExAir	%	5% - 15%			
PORCENTAJE DE EFICIENCIA	%EFF	%	85%-90%			
DIÓXIDO DE AZUFRE	SO <sub>2</sub>	PPM	NO APLICA	166	883	INFORMAR
DIÓXIDO DE CARBONO	CO <sub>2</sub>	%	INFORMAR			
MONÓXIDO DE CARBONO	CO	PPM	INFORMAR	132	132	INFORMAR
ÓXIDO DE NITRÓGENO	NO <sub>x</sub>	PPM	107	107	217	INFORMAR
OPACIDAD		%	NO APLICA	30	50	50

**DATO DE BUNKER – DIÓXIDO DE AZUFRE REFERIDO A UN NIVEL MÁXIMO DE 0,03 DE FRACCIÓN DE MASA (3% MASA) DE AZUFRE EN EL COMBUSTIBLE.**

Fuente: Normativa Salvadoreña Obligatoria. NSO 13.11.02:07 Emisiones Atmosféricas Fuentes Fijas y Puntuales. Consulta: 11 de noviembre 2020.

[http://www.puntofocal.gov.ar/notific\\_otros\\_miembros/slv117\\_t.pdf](http://www.puntofocal.gov.ar/notific_otros_miembros/slv117_t.pdf).

En la tabla anterior se observan los parámetros de oxígeno y exceso de aire.

Para cumplir o estar dentro de estos parámetros es importante que el sistema de control de oxígeno cuente con un ventilador soplador ubicado en el hogar de la caldera y que este opere de manera adecuada para realizar la función de intercambio de calor. También se puede contar con un sistema de regulación de velocidad del ventilador, para que de esta manera los parámetros de exceso

de aire, y por ende de contenido de oxígeno (%O<sub>2</sub>) se mantengan oscilando entre un rango definido.

De esta manera se puede manipular la temperatura de la caldera logrando el control del exceso de aire, puesto que esto generaría un mejor intercambio de calor entre los gases y el agua de la caldera. Al haber mayor transferencia, se aprovecha más el poder calorífico del combustible. Este sistema proporciona la información necesaria para tener una correcta relación entre la combustión y la presión de vapor.

#### **2.4. Lazos de control del sistema de alarma para las variables críticas de la caldera**

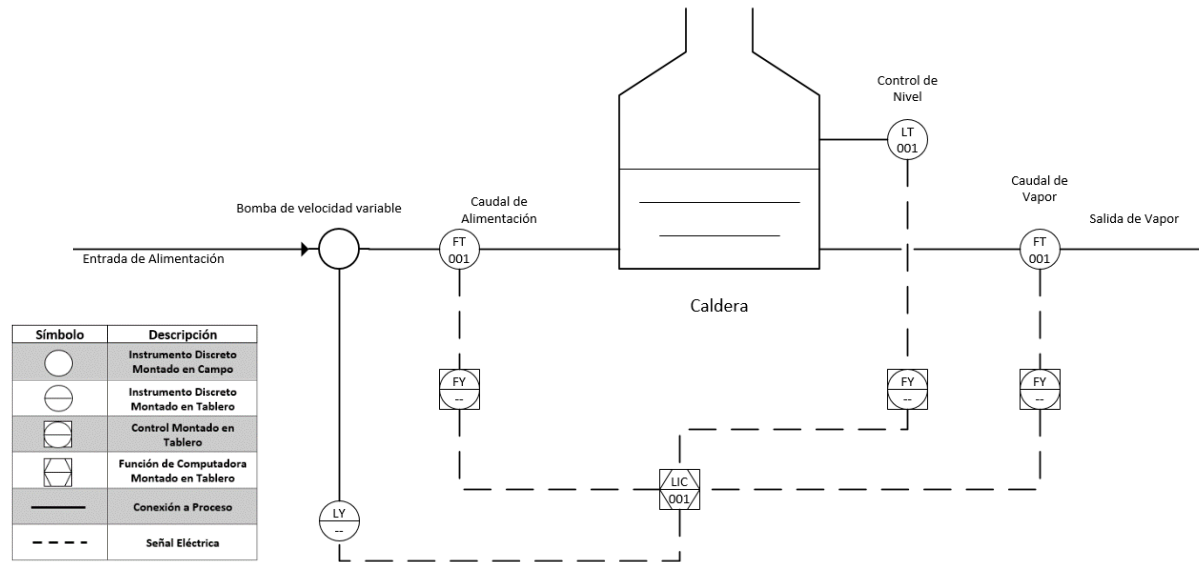
Las aplicaciones de control de procesos industriales generalmente necesitan controlar muchas variables al mismo tiempo, al igual que el circuito de control del sistema de alarma, las principales variables que deben controlarse incluyen la presión, el nivel del agua y la detección de llamas. El lazo de control en el sistema de alarma es necesario para obtener un control satisfactorio de todo el sistema, evitando así la falla de la caldera.

##### **2.4.1. Lazo de control para alarma del nivel de agua**

Tal como se menciona en la sección anterior, se simulará un sistema de tres elementos, el cual proporciona mayor control en el nivel de agua ajustándolo a las necesidades que se requieren en la demanda de vapor. Estas mediciones se realizarán con la ayuda de transmisores de presión diferencial. En la siguiente imagen se aprecia el lazo de control propuesto utilizando la norma ISA S5.4 para realizar el diagrama.



Figura 9. **Propuesta de lazo de control para el nivel de agua**



Fuente: elaboración propia, realizado con Visio.

Como se puede observar en la imagen anterior se necesita un medidor de caudal en la entrada de la alimentación del agua, este proporciona la cantidad real de agua que está ingresando a la caldera. De igual manera se aprecia un medidor de nivel, este es del tipo electrónico el cual enviará una señal al controlador para indicar el nivel de agua en el domo de la caldera, este estará determinado por un rango especificado donde se establecerá un nivel máximo y un nivel mínimo, donde el nivel máximo es indicado por el fabricante de la caldera.<sup>20</sup>

Por último, se encuentra un medidor de presión de vapor en la salida, esto para determinar la demanda de vapor que sale de la caldera, debido a que la demanda tiene una relación inversamente proporcional a la presión del vapor en

<sup>20</sup> SANCHIS, Julio. *Medidor de nivel de agua*. Consulta: 4 de junio 2021. <https://www.calderasformacion.com/medidor-de-nivel-de-agua/#:~:text=El%20medidor%20de%20nivel%20de,pueda%20realizar%20las%20operaciones%20correspondientes.>

la caldera, esto quiere decir que, a mayor demanda tendrá menor presión de vapor y a menor demanda de vapor habrá en la caldera mayor presión de vapor.

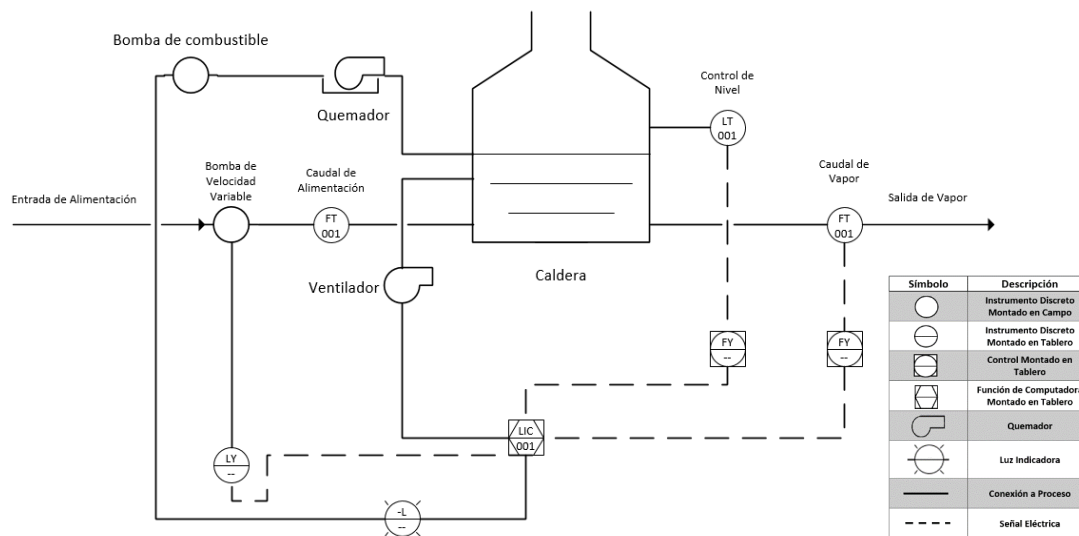
Este tipo de medidores se conecta directamente al controlador que determinará por medio del nivel, la presión y los caudales, la variación que se tendrá que realizar en la alimentación de agua para compensar la falta de esta dentro de la caldera. Para esto se enviará una señal a una bomba variable la cual funcionará en relación con el nivel de agua que se necesita compensar.

En dado caso la bomba no logra compensar lo suficiente y el nivel de agua disminuye peligrosamente, el sistema de alarma inicia su funcionamiento emitiendo una alarma primaria, esta se activará al momento en el que se tenga un porcentaje del 50% del nivel total del agua dentro de la caldera iniciando con una alerta sonora y visual, la cual indicará al técnico encargado, el tipo de problema que se está generando en la caldera.

Es importante mencionar que el nivel mínimo de agua recomendado lo indica el este es el tiempo necesario para que el nivel del agua caiga por encima del nivel mínimo permitido, es decir, la última superficie calentada<sup>20</sup>, por tal motivo es necesario el uso de una alarma secundaria si la situación anterior no es controlada satisfactoriamente y el nivel de agua sigue disminuyendo llegando al porcentaje del nivel que recomienda el fabricante, en este punto se indicará al técnico la situación que está ocurriendo y al mismo tiempo el sistema iniciará con el protocolo de protección, el cual apagará la bomba de inyección y la chispa que ayuda a producir la combustión en el hogar, al mismo tiempo se apagaran los ventiladores en el hogar y se encenderán los ventiladores de la chimenea el cual ayudará a deshacerse de los inquemados.

Al mismo tiempo que esto sucede se comienza a regular el nivel de agua de forma automática, hasta que este llega a su rango adecuado, luego de esto el calderista tendrá que arrancar la caldera nuevamente.

Figura 10. **Propuesta de lazo de control de seguridad por bajo nivel de agua**



Fuente: elaboración propia, realizado con Visio.

Si por algún motivo no puede ser regulado el nivel de agua de forma manual o automática, el controlador emitirá una alarma de forma auditiva y visual en la cual se le indicará al calderista la falla que se está ocasionando en ese momento, esta alarma será absolutamente baja. La alarma absolutamente baja se presenta cuando el parámetro controlado es inferior al *set point* establecido.

Es importante mencionar que la calibración del transmisor deberá de realizarse de modo que transmita un margen de trabajo en torno al nivel normal para las condiciones de operación nominales de la caldera. También como se menciona anteriormente que se debe de tener en cuenta una ventana de alerta que inicie en el 50 % del nivel de agua total en la caldera, esto con el fin de evitar

llegar al nivel mínimo que recomienda el fabricante de la caldera. Debido a que el Acuerdo Gubernativo 229 - 2014 hace mención de la vigilancia permanente del nivel de agua en la caldera, mas no del nivel al que se tiene que generar un paro o una alerta, se toma como referencia para el funcionamiento de nivel bajo de agua la Norma Oficial Mexicana NOM-020-STPS-2011, en el inciso 12.2.3, donde se resalta el uso y funcionamiento de las características de seguridad del nivel del agua, donde se indican que se debe de incluir el nivel mínimo de agua especificado por el fabricante. En esta misma norma se menciona el uso del paro y alarma de seguridad por alto nivel de agua, este alto nivel de agua puede llegar a provocar incrustaciones en la salida de vapor.

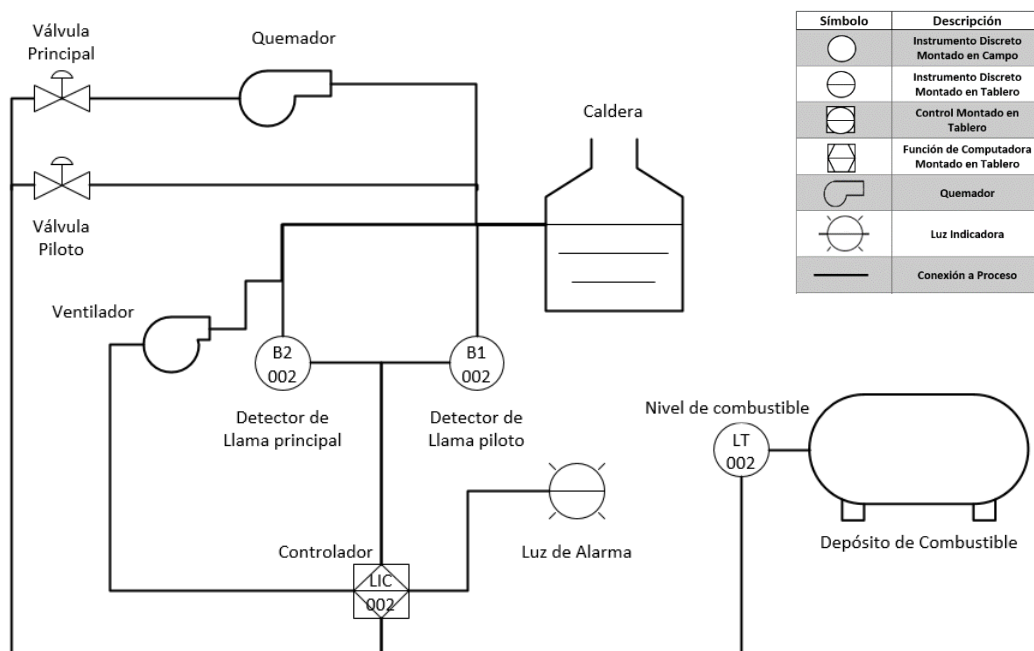
Cuando se presenta la alarma y el parámetro controlado ya no la provoque en el sistema se le denomina alarma sin cerrojo, una característica de este tipo de alarma es que el calderista no está obligado a reconocer la falla, puesto que esta fue controlada por el sistema. Situación contraria se da cuando la alarma con cerrojo se presenta en el momento en el que el parámetro ya no sigue presentando la alarma, pero el calderista está obligado a reconocer la falla. Independientemente del tipo de alarma se tendrá una luz parpadeando hasta que se reconozca la falla, en el caso que el fallo persista la luz permanecerá encendida, al mismo tiempo en el que esto sucede, el controlador apagará el quemador, el ventilador y la bomba de combustible, esto para detener la fuente que aporta calor a la caldera, a su vez se activará el ventilador de la chimenea para que ayude a evacuar los inquemados del hogar. Esto sucederá hasta que el nivel del agua se regule y todo llegue a su normalidad nuevamente, en este momento el calderista iniciará el protocolo de arranque de la caldera para continuar nuevamente con el funcionamiento normal.

La bomba de agua que funcionará para regular el nivel de agua en la caldera deberá de contar con bombas de agua de apoyo, esto si en dado caso la bomba principal no funciona o no se da abasto para regular el nivel.

#### 2.4.2. Lazo de control para alarma del detector de llama

El lazo de control para la detección de la llama es de suma importancia, tal y como se menciona en el apartado de variables. A continuación, se presenta la propuesta de alarma del lazo de control del detector de llama utilizando la norma norma ISA S5.4 para realizar el diagrama, esta también presenta los componentes en los que influye al momento en el que se registre una alarma por la falta de llama.

Figura 11. Propuesta de lazo de control detector de llama en caldera



Fuente: elaboración propia, realizado con Visio.

En el lazo de control anterior se identifica los dos detectores de llama, en este caso la llama piloto que es utilizada para arrancar la caldera, también se encuentra el detector de llama principal, el cual indica que está presente una llama principal.

En el caso que se pierda la llama ya sea la principal o la piloto, el controlador apaga el aporte de combustible en este caso el quemador, al mismo tiempo se enciende un ventilador en el hogar, esto con el fin de deshacerse de los inquemados que pueden llegar a ocasionar problemas en la caldera, como explosiones no controladas. Al momento en el que se activa la alarma también se activará una alerta visual, en este caso una luz que le indica al calderista que ha ocurrido una falla, por tal motivo él deberá de identificar el origen de la alarma con la ayuda del registro en el sistema de alarmas.

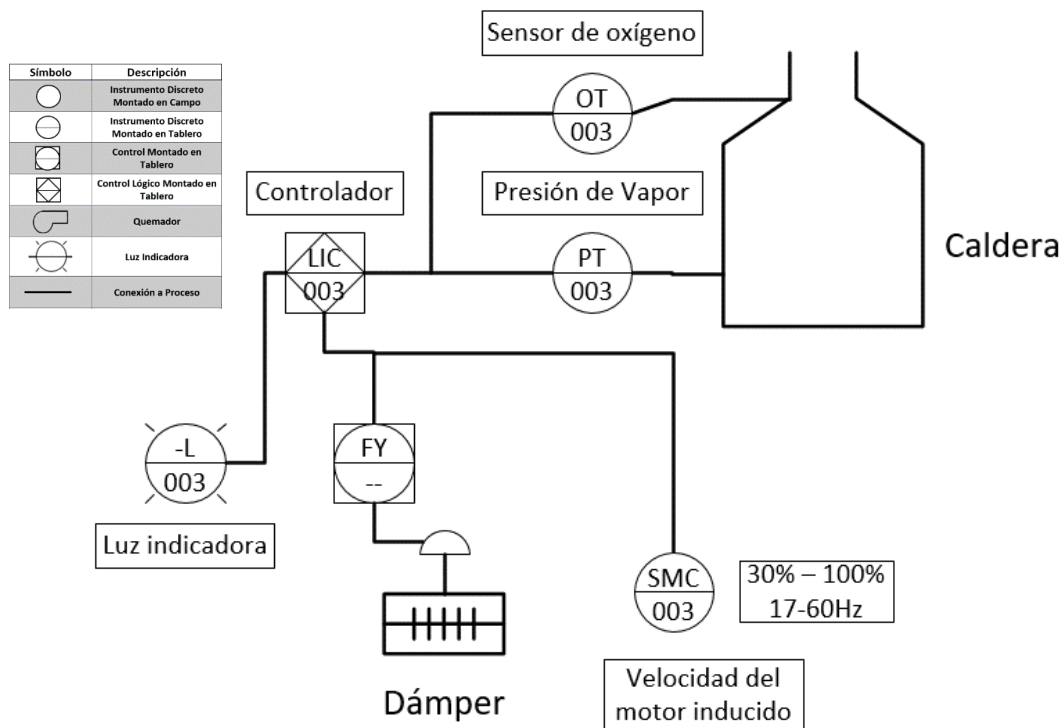
Es importante recordar la importancia de los detectores de llama, puesto que pueden ser utilizados como temporizadores al momento del arranque de la caldera, porque luego de arrancada la caldera el sensor vigila permanentemente la presencia de la llama en el hogar.

También se aprecia un detector del nivel de combustible, este se encuentra en el depósito de combustible de la llama piloto o principal. Este indica la cantidad de combustible que queda en el depósito para que el calderista determine la cantidad de arranques y horas de funcionamiento que dispone por medio del nivel, este valor debe de ser establecido de acuerdo con las necesidades y nivel de producción que presenta la caldera.

### 2.4.3. Lazo de control para alarma de sobre presiones

Este control de presión de vapor es regulado mediante el funcionamiento coordinado de los ventiladores de tiro forzado e inducido, el primero es utilizado para que ingrese al hogar el aire de alimentación, el tiro inducido es el encargado de mantener la presión de vapor, esto se logra al aspirar los gases hacia la chimenea y mantener de esta forma el tiro balanceado en el hogar, al tomar en cuenta los niveles recomendados de oxígeno que se mencionan en la norma salvadoreña y así se mantiene la presión de vapor regulado por medio de la temperatura en el sistema.

Figura 12. Propuesta de lazo de control para alarma de sobre presión



Fuente: elaboración propia, realizado con Visio.

Según lo anterior, el fin de este lazo es mantener la presión de vapor en un punto de operación normal, esto se logra al controlar la velocidad del tiro inducido,

esto provocará mayor o menor succión en el hogar, esto dependerá del comportamiento de la presión de vapor y la temperatura, al igual que la cantidad de oxígeno que ingresa en el hogar. A este lazo de control lo compone una luz piloto, que le indicará al calderista lo que está ocurriendo con la presión, con el fin de que él verifique que los parámetros que han sido ajustados anteriormente, como el *set point* como valor de presión deseado, se encuentran debajo de este o dentro del rango de presión.

Se puede mencionar también que el flujo de aire de combustión es manejado por mayor o menor aporte del ventilador de tiro forzado. La presión de vapor es una variable que está sujeta a diversas variaciones provocadas por el mismo proceso natural de la caldera, esta presión normalmente se ajusta al realizar pequeños cambios en el ventilador del inducido, así mismo, si no hay un cambio significativo en la corrección de la presión se realizará la apertura o cierre de los dámperes del tiro inducido esto con el fin de aumentar o disminuir la temperatura que se aporta al vapor y de esta manera disminuir la sobre presión que pueda registrarse en el sistema.





### **3. SOFTWARE LABVIEW**

La tecnología avanza en todo el mundo hoy en día, y los procesos de construcción que utilizan la tecnología permiten que cualquier organización se adapte rápidamente a los constantes cambios e innovaciones que esto conlleva. Las nuevas exigencias crean presión a las empresas para que se establezcan nuevas formas de proceder y así aumentar el impacto de la institución en la comunidad, esto con el fin de asegurar tranquilidad y confianza al momento que ocurra un incidente, para que este sea de la menor magnitud posible, siempre teniendo el control de la situación.

#### **3.1. Introducción al software LabVIEW**

Entre los productos ofrecidos por la empresa National Instruments (NI) se encuentra el software LabVIEW, el cual es una herramienta gráfica para programar y probar, controlar y diseñar en un lenguaje gráfico. Este software proporciona un potente entorno para el desarrollo gráfico, los programas que se desarrollan en LabVIEW se llaman VI's (Virtual Instruments).

LabVIEW fue lanzado por primera vez al mercado en 1986 con la versión 1.0 del software. Desde ese entonces se integraron características importantes que hasta hoy siguen siendo el núcleo fundamental del entorno de programación. La reducción en el tiempo de desarrollo del programa se debe principalmente a la sustitución de líneas de texto por símbolos gráficos y la escritura de código vinculando estos símbolos.

La instrumentación virtual integra lenguajes de programación con hardware dedicado para crear soluciones que permitan la recopilación, análisis y visualización de datos para hacer realidad las decisiones basadas en datos reales. El éxito de este tipo de instrumentación radica en su utilidad en un entorno de programación gráfica y a los dispositivos de hardware autoconfigurables *plug and play* que permiten a profesionales de diferentes áreas laborales, trabajar en el monitoreo y control de sistemas sin ser expertos en software, programación o electrónica, puesto que LabVIEW como se menciona anteriormente, hace uso de símbolos gráficos en lugar de un lenguaje escrito.

LabVIEW tiene una serie de bibliotecas dedicadas a funciones y subrutinas, incluidas bibliotecas específicas para la adquisición de datos, control de dispositivos VXI, comunicación en serie, GPIB, análisis, presentación y visualización de datos de respaldo. Una de las principales aplicaciones del software LabVIEW son los sistemas de medición, independientemente de las aplicaciones de control y monitoreo de procesos.

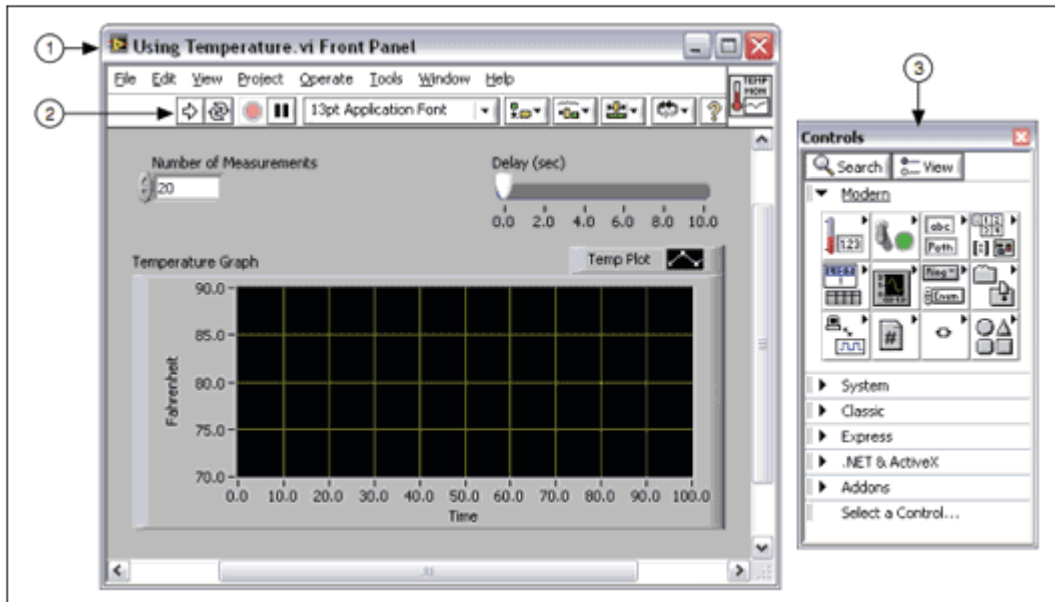
### **3.2. Entorno de la herramienta gráfica LabVIEW**

El entorno de trabajo de LabVIEW lo componen un panel frontal y el diagrama de bloques.

#### **3.2.1. Panel frontal**

El panel frontal del instrumento virtual (VI) se muestra cuando abre un VI nuevo o existente. La ventana del panel frontal es la interfaz de usuario del VI. La figura 13 muestra el panel frontal (1), la barra de herramientas (2) y la paleta de controles (3).

Figura 13. **Ventana del panel frontal, barra de herramientas y paleta de controles**



Fuente: National Instruments. *Conceptos Básicos de LabVIEW*. Consulta: 29 de diciembre 2020. <https://www.ni.com/academic/students/learnLabVIEW/esa/environment.htm>.

### 3.2.2. Paleta de controles

La paleta de controles, como su nombre indica, contiene los controles e indicadores utilizados para crear el panel frontal. La siguiente figura muestra el tablero con todas las categorías mostradas y las categorías más nuevas expandidas.

Figura 14. **Paleta de controles**



Fuente: National Instruments. *Conceptos Básicos de LabVIEW*. Consulta: 29 de diciembre 2020. <https://www.ni.com/academic/students/learnLabVIEW/esa/environment.htm>.

### 3.2.3. **Controles e indicadores**

Para crear cuadros de mando e indicadores en los terminales de entrada y salida interactivos del VI, respectivamente. Los controles pueden ser perillas, botones, controles deslizantes y otros dispositivos de entrada. Los indicadores son gráficas, led y otras pantallas. El controlador simula el dispositivo de entrada de la herramienta para proporcionar datos al diagrama y mostrar los datos que captura o crea.

En la figura 13 se señala que se tienen dos controles, el primero es el *Number of Measurements and Delay (s)*. También hay gráficos XY llamados *Temperature Graph*.

Se puede variar el número de mediciones y el valor de entrada del comando *Number of Measurements and Delay (s)*. El usuario puede ver los valores

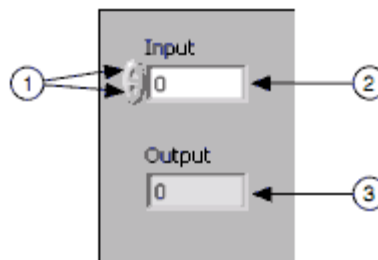
generados por el VI en la pantalla de temperatura. El VI genera medidas basadas en el código generado a partir del diagrama de bloques.

Cada comando o indicador está asociado con un tipo de datos. Por ejemplo: el *slide horizontal Delay* (s) es un tipo de dato numérico. Los tipos de datos más utilizados son los literales numéricos, booleanos y de cadena.

### 3.2.3.1. Controles e indicadores numéricos

Los tipos de datos numéricos tienen la posibilidad de representar diversos tipos de números como números enteros o reales. Los controles e indicadores digitales son objetos numéricos comunes. Los objetos como contadores y botones también representan datos numéricos.

Figura 15. Control numérico



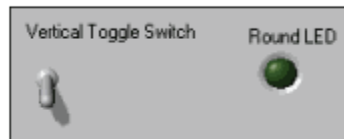
Fuente: National Instruments. *Conceptos Básicos de LabVIEW*. Consulta: 29 de diciembre 2020. <https://www.ni.com/academic/students/learnLabVIEW/esa/environment.htm>.

En la figura 15 se identifica el control numérico simple, donde se cambia la cantidad de una señal en la salida y devuelve un resultado numérico de la entrada de los bloques.

### 3.2.3.2. Controles e indicadores booleano

Los indicadores de este tipo representan datos con solo dos estados posibles: verdadero o falso, o bien *on* y *off*. Normalmente se utiliza para emular interruptores, botones y luces. La siguiente figura muestra un interruptor de encendido vertical y un objeto *led* redondo.

Figura 16. **Switch y ledes utilizados en LabVIEW**

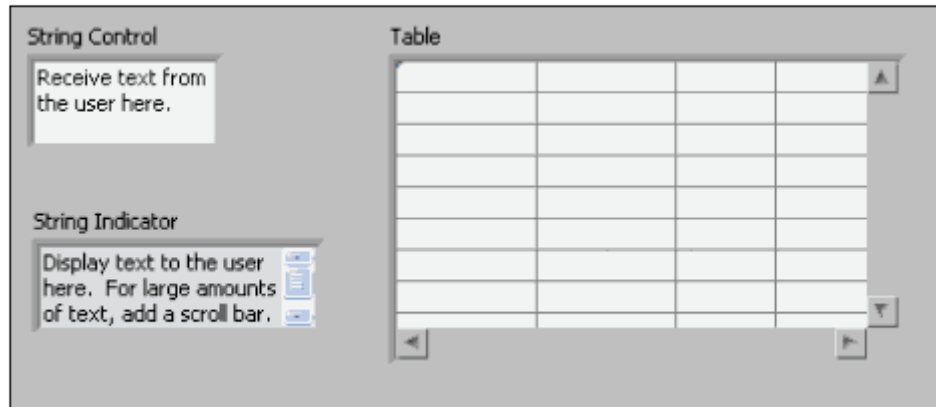


Fuente: National Instruments. *Conceptos Básicos de LabVIEW*. Consulta: 29 de diciembre 2020. <https://www.ni.com/academic/students/learnLabVIEW/esa/environment.htm>.

### 3.2.3.3. Controles e indicadores de cadena de caracteres

Un control de cadena es utilizado para obtener el texto del usuario, como el nombre y la contraseña. También muestra texto al usuario. Los objetos más comunes son tablas y cuadros de texto, como se muestra en la siguiente figura.

Figura 17. **Control e indicadores de cadena de caracteres**



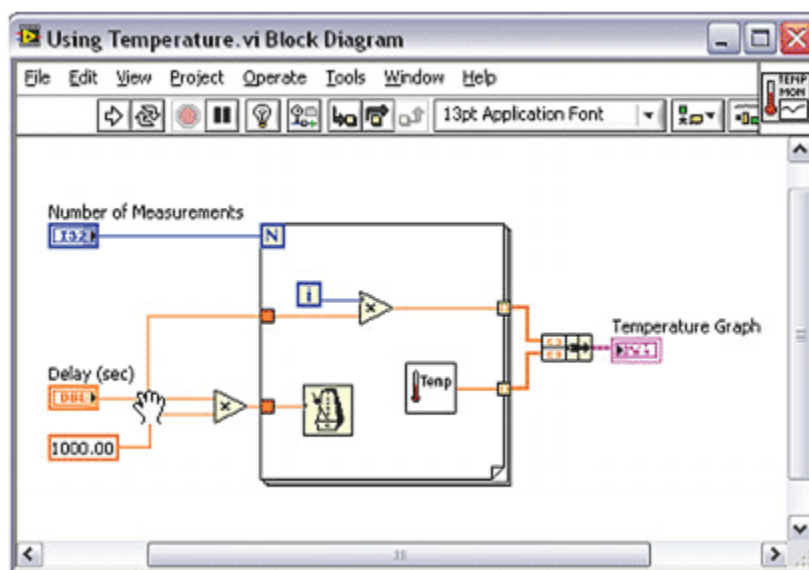
Fuente: National Instruments. *Conceptos Básicos de LabVIEW*. Consulta: 29 de diciembre 2020. <https://www.ni.com/academic/students/learnLabVIEW/esa/environment.htm>.

### 3.3. Diagramas de bloques

Los diagramas de bloques se usan para controlar objetos en el panel frontal, agregando código usando una representación gráfica de la función. A continuación, se muestra una ventana de diagrama que contiene el código fuente del gráfico.



Figura 18. **Ventana de diagrama de bloques**



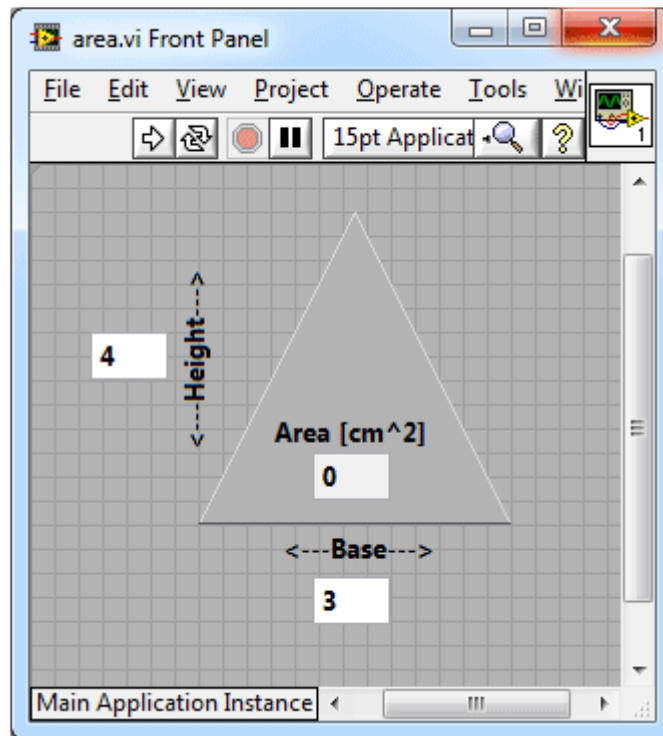
Fuente: National Instruments. *Conceptos Básicos de LabVIEW*. Consulta: 5 de enero 2021.  
<https://www.ni.com/academic/students/learnLabVIEW/esa/environment.htm>.

Los objetos en la ventana del panel frontal se presentan como terminales en el diagrama de bloques. Los terminales son puertos de ingreso y salida que le permiten intercambiar información entre el panel frontal y el diagrama de bloques. El terminal es parecido a los límites y constantes de un lenguaje de programación con base en escrito. El terminal incluye un control o indicador y un terminal de nodo.

Los controles e indicadores del panel frontal tienen a las terminales de control e indicador. Los datos proporcionados por el panel frontal se transfieren al diagrama general por medio de los terminales de control.

Los controles, indicadores y constantes sirven como entradas y salidas para algoritmos esquemáticos. En la figura siguiente se observa: base (cm) y altura (cm) son las entradas al sistema, el valor del área (cm<sup>2</sup>) es la salida del algoritmo.

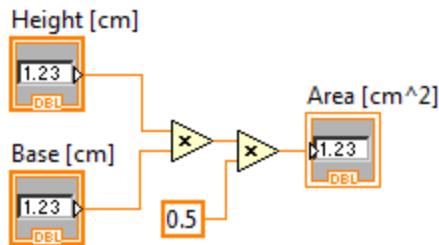
Figura 19. Ventana con entradas y salidas



Fuente: National Instruments. *Conceptos Básicos de LabVIEW*. Consulta: 5 de enero 2021.  
<https://www.ni.com/academic/students/learnLabVIEW/esa/environment.htm>.

Mientras no esté incluido en la documentación del algoritmo, los usuarios no podrán modificar o acceder al algoritmo que lo ejecuta. La siguiente figura muestra un diagrama de bloques de la entrada y salida de la figura 19. Hay cuatro terminales diferentes, dos de los cuales son controles, uno constante y uno indicador.

Figura 20. **Uso de diagrama de bloques**



Fuente: National Instruments. *Conceptos Básicos de LabVIEW*. Consulta: 5 de enero 2021.  
<https://www.ni.com/academic/students/learnLabVIEW/esa/environment.htm>.

Se puede percibir que los terminales del diagrama de bloques base (cm) y elevación (cm) poseen una forma distinta a los terminales de área (cm<sup>2</sup>). El control y la visualización de diagramas de bloques poseen 2 propiedades relevantes. La primera es una flecha en el terminal que sugiere la dirección del flujo de datos. Los botones de control con flechas indican los datos enviados desde el terminal, y los indicadores con flechas indican los datos que ingresan al terminal. La segunda característica es el borde alrededor de la terminal. El control tiene un borde grueso y el indicador tiene un borde delgado.

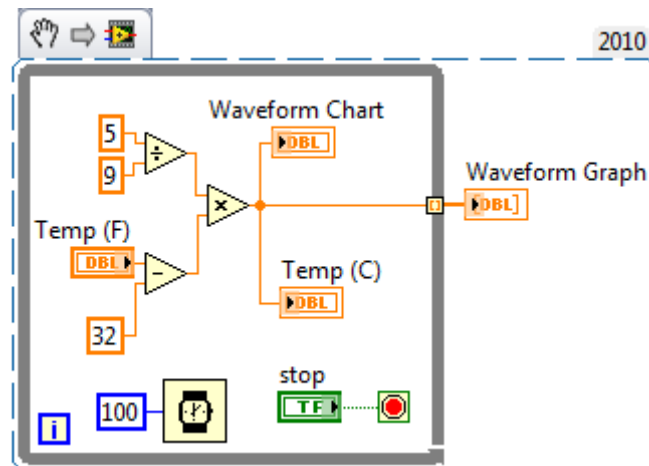
Un nodo es un objeto de diagrama de bloques que obtiene entradas o salidas y hace ocupaciones una vez que se hace el VI. Es semejante a las normas, operaciones, funcionalidades y subrutinas en un lenguaje de programación con base en escrito. Los nodos tienen la posibilidad de ser funcionalidades, subVIs o estructuras. Estas estructuras son recursos de control de procesos, como Estructuras de Casos, Ciclos *For* o Ciclos *While*.

La funcionalidad es el elemento operativo básico de LabVIEW. No hay ventanas de panel frontal ni ventanas de diagrama de bloques, pero tampoco paneles de conexión. Al hacer doble clic en un objeto, solo se selecciona ese objeto. Lo especial es que el fondo del icono es amarillo claro.

### 3.4. Gráficos de datos

Los VIs tienen la posibilidad de recolectar datos en un arreglo y luego presentarlos en una gráfica. Cuando estos datos son graficados, la gráfica descarta los datos mostrados antes y muestra solamente los nuevos datos. Por el contrario, una tabla adjunta a la gráfica puede mostrar datos nuevos y aquellos datos históricos del gráfico. En la tabla se puede ver la lectura actual o medida en contexto a los datos anteriores. Se pueden añadir más puntos de los que la tabla puede mostrar, esto ocasionará que la tabla se desplace para que los puntos nuevos sean añadidos a la derecha y los antiguos desaparezcan por la izquierda. Normalmente es recomendable utilizar una tabla con procesos lentos en los que solo se añadan pocos por segundo al gráfico. En la siguiente figura se observa un arreglo simple del diagrama de bloques, en él se aprecia que los datos al final del ciclo son graficados.

Figura 21. Diagrama de bloques para representar datos en gráfica



Fuente: National Instruments. *Conceptos Básicos de LabVIEW*. Consulta: 5 de enero 2021.  
<https://www.ni.com/academic/students/learnLabVIEW/esa/environment.htm>.

### **3.5. Modulo DSC**

El módulo de control y base de datos (Datalogging and Supervisory Control-DSC) permite la creación de sistemas de control y medición distribuidos. Este módulo amplía el entorno de desarrollo de LabVIEW para configurar y administrar alarmas y eventos, registrar bases de datos históricas, ver datos en tiempo real y proporcionar seguridad, crear sistemas con dispositivos en tiempo real y otros dispositivos.

El módulo DSC permite construir sistemas de control y automatización industrial para ayudar a configurar la recepción de datos o monitorear los puntos de entrada y salida. Este módulo permite representar gráficamente tendencias históricas o en tiempo real según las necesidades del usuario. Se puede utilizar para servidores de entrada y salida, controlar el proceso de producción y conectarse con controladores lógicos programables o servidores de entrada y salida. Utilizando la programación de LabVIEW se tiene una amplia variedad de sistemas distribuidos con lo cual se amplían las soluciones al control de los sistemas. El módulo DSC cuenta con VIs prediseñados como el VI de tendencia histórica y el VI de tendencia en tiempo real.

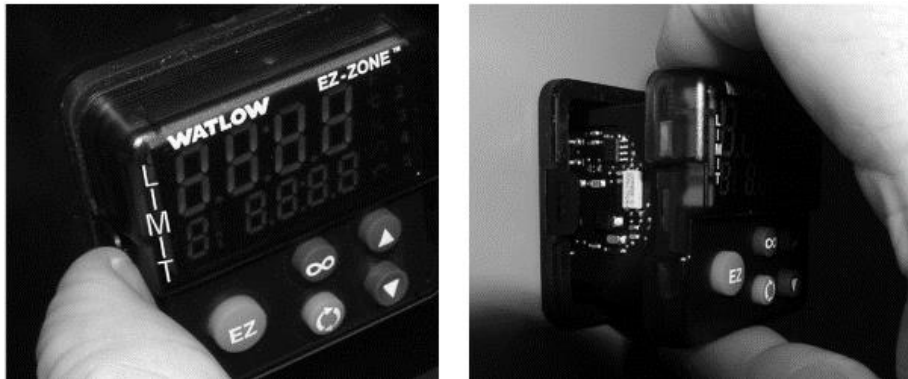
Es importante mencionar que permite construir interfaces de usuario para verificar los datos en tiempo real, permite la creación de representaciones gráficas para sistemas de producción o de control.

## 4. REGISTRO DE DATOS, CONTROL Y SIMULACIÓN

### 4.1. Herramienta de adquisición

Para la recopilación de los datos, se necesita usar un sistema multivariable, tales sistemas tienen el propósito de conservar más de una variable en su punto de ajuste o valor deseado, del mismo modo tienen la tarea de recopilar los datos de los sensores instalados en el sistema. Por estas situaciones se define como instrumento de adquisición de datos y control al equipo controlador multilazo EZ - ZONE RM

Figura 22. Controlador multilazo EZ-Zone PM



Fuente: Watlow. *Controlador de Procesos - EZ-ZONE-RM-Integrated-Controller*. Consulta: 18 enero 2021 <https://es.watlow.com/products/Controllers/Temperature-and-Process-Controllers/EZ-ZONE-RM-Integrated-Controller>.

Este tipo de controlador posee tres partes útiles para conocer su funcionamiento, estas son las entradas, salidas y procedimientos.<sup>21</sup> Cuando el

---

<sup>21</sup> Watlow. *Manual del Usuario: Modelos de controladores de límite*. Consulta: 18 enero 2021 <https://es.watlow.com/products/Controllers/Temperature-and-Process-Controllers/EZ-ZONE-RM-Integrated-Controller>.

controlador se configura de manera adecuada, la información se llega a transmitir desde una entrada a un procedimiento y por último a una salida. Un único controlador es capaz de realizar varios procedimientos al mismo tiempo, tal como lo menciona el manual, puede supervisar diferentes situaciones de alarma, el monitoreo de variables, el accionamiento de entradas digitales y dispositivos de salida como luces o contactores.

La entrada del controlador ayuda a proporcionar la información adecuada de acuerdo con el procedimiento programado. Es decir, esta información puede ser obtenida por el operador presionando una tecla o desde un sensor de monitoreo de temperatura en el lazo de control.

Cada entrada analógica es capaz de leer voltios, corriente o resistencia, este tipo de flexibilidad en la lectura de datos le permite al controlador a utilizar diferentes tipos de dispositivos para medir. También tiene la capacidad de leer dispositivos digitales, si este está activo o inactivo. Este controlador posee terminales, cada par de ellas deben de configurarse para funcionar como entrada o salida con el parámetro de dirección en el menú E/S digital.

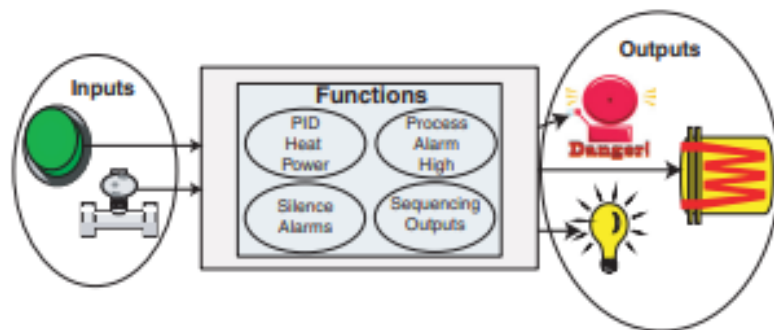
La función de este controlador utiliza la señal de entrada para calcular el valor. Estas entradas pueden establecer el estado digital en verdadero o falso y utilizar lecturas de temperatura para activar o desactivar el estado de la alarma. Alternativamente, en el caso de una falla con el dispositivo de detección principal, el contactor se puede restringir la energía apagando el elemento calefactor para evitar daños a la carga

La salida de este controlador depende del lazo de control que se esté ejecutando en ese momento. Puede tener varias funciones o realizar acciones dependiendo de la información proporcionada por el seccionador de tensión de

control del contactor, encender o apagar una luz, encender una alarma. Tienen la posibilidad de destinar numerosas salidas para que respondan a una sola instancia de una función.

Hay módulos de memoria extraíbles que admiten ajustes de parámetros, resultados de cálculos, temporizadores, adiciones, valores y configuraciones de salida. Las entradas y salidas son independientes y se pueden configurar con valores o estados predefinidos en caso de un corte de energía. El controlador puede detectar la pérdida de señales de campo o circuito abierto y alertar al operador. Esto proporciona la máxima seguridad y rendimiento operativo.

Figura 23. **Entradas, procedimientos y salidas del controlador EZ-ZONE RM**



Fuente: Watlow. *Controlador de Procesos - EZ-ZONE-RM-Integrated-Controller*. Consulta: 18 enero 2021 <https://es.watlow.com/products/Controllers/Temperature-and-Process-Controllers/EZ-ZONE-RM-Integrated-Controller>.

Como se mencionó en los párrafos anteriores, es capaz de mezclar señales de corriente, voltaje, RTD, termopar y de unión discreta sobre la misma base para aplicaciones individuales. Las señales de entrada y salida que se contemplan para el sistema de alarma se presentan en la siguiente tabla.



Tabla VII. **Señales I/O conectadas al controlador EZ-ZONE RM**

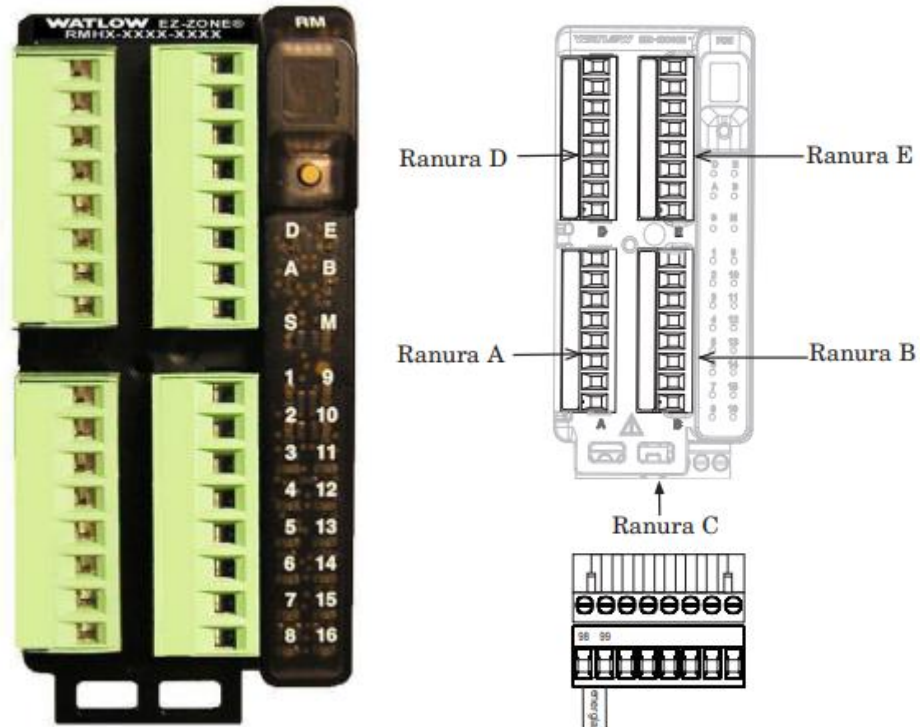
Dispositivo	Tipo de señal	
	Voltaje	0-10 V
<b>Termopar</b>	Voltaje	0-10 V
<b>Sensor de Presión</b>	Corriente	4-20mA
<b>Sensor de Nivel</b>	Corriente	4-20mA
<b>Válvulas de control</b>	Corriente	4-20mA
<b>Posicionador de Válvula</b>	Corriente	4-20mA
<b>Variador de Frecuencia (Señal de entrada y salida)</b>	Voltaje / Corriente	

Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de Watlow. *Sensores - Termocuplas*. Vapor para la industria. *Transmisor de presión*. Omega. *Sondas de nivel*. Instrumentación y control. *Válvulas y posicionadores*. IGUREN. *Variador de Frecuencia*. Consulta: 26 de agosto 2021.

El controlador cuenta con entradas analógicas seteadas para utilizar con termocuplas, cuatro entradas analógicas universales integrales y de uno a doce salidas integrales de corriente (0 a 20 mA o 4 a 20 mA), con dos fuentes independientes de alimentación en voltios (0 – 10 V), milivoltios, RTD de dos o tres alambres, termopar tipo B, E, J, K, N, R, S, T, dos fuentes de transmisor independientes aisladas, dos salidas corrientes (0-20 mA).

Tiene en su estructura la capacidad de agregar entradas / salidas en cualquier momento, por medio de módulos analógicos y discretos de punto. Los de entrada de corriente pueden ser RTD de tres alambres, RTD de 100 ohmios, RTD de dos alambres, RTD de 1000 ohmios, termopar, entradas y salidas análogas de voltios o milivoltios, entrada digital aislada (2,5-28 VDC, 4-16 VDC, 10-32 VDC y 12-32 VAC), salida digital aislada (5-60 VDC, 5-200 VDC, 12-140 VAC y 24-280 VAC). Todos los módulos semiconductores analógicos y digitales están aislados entre sí y conectados a tierra individualmente.

Figura 24. Ranuras de I/O del EZ - ZONE RM

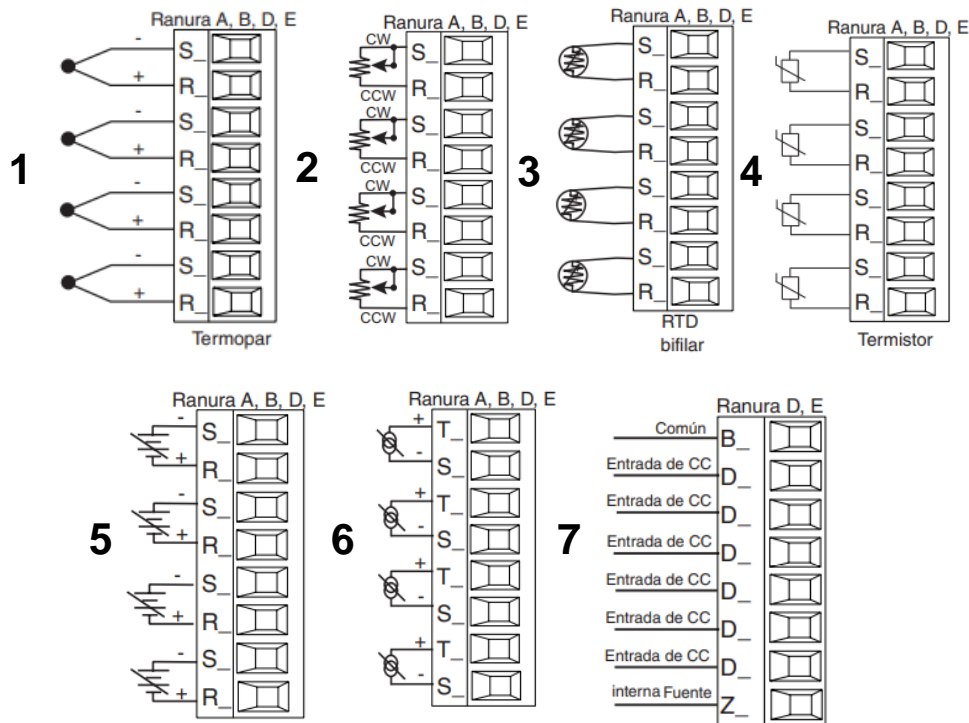


Fuente: Watlow. *Controlador de Procesos - EZ-ZONE-RM-Integrated-Controller*. Consulta: 1 de septiembre de 2021 <https://es.watlow.com/products/Controllers/Temperature-and-Process-Controllers/EZ-ZONE-RM-Integrated-Controller>.

El controlador posee en su estructura cuatro ranuras (A, B, C y D) de entrada o salida, estos pueden apreciarse en la figura anterior. En el lado derecho del módulo se encuentran los indicadores led de las salidas utilizadas. En la parte inferior del módulo se encuentra la ranura C, esta ranura se dedica específicamente para la conexión de la alimentación del módulo también es utilizada para agregar módulos extras al sistema.

Las ranuras A, B, C y D, pueden ser utilizadas como entradas<sup>22</sup>. En la imagen siguiente se puede apreciar la conexión que se realiza para los diferentes componentes. La guía de usuario establece la conexión de termopares (1), estos deben de conectarse con el conductor negativo en la terminal S.

Figura 25. **Conexiones de señales de entrada del EZ - ZONE RM**



Fuente: Watlow. *Controlador de Procesos - EZ-ZONE-RM-Integrated-Controller*. Consulta: 1 de septiembre de 2021 <https://es.watlow.com/products/Controllers/Temperature-and-Process-Controllers/EZ-ZONE-RM-Integrated-Controller>.

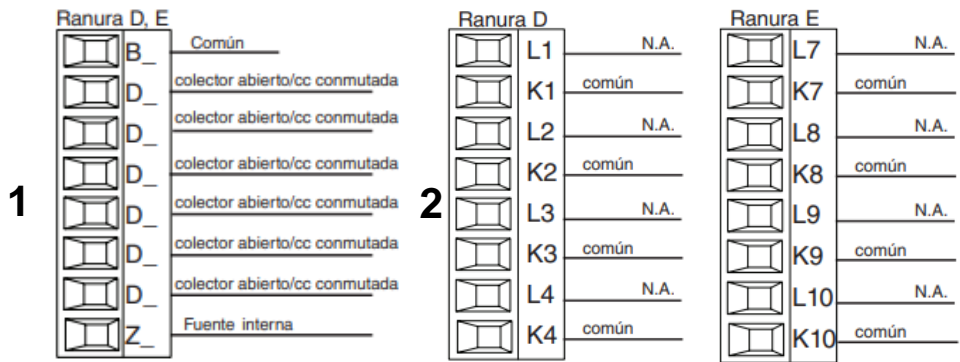
Los potenciómetros (2) pueden utilizarse desde valores de 1k ohm. Los detectores de temperatura (3) para su conexión debe de considerarse en su calibración la resistencia generada por el conductor con el que se conecta al

<sup>22</sup> Watlow. *Guía de Usuario: Módulo de alta densidad EZ Zone*. Consulta: 1 septiembre 2021 <https://www.zesta.com/Zesta/media/User-Manuals/ES/zesta-watlow-RMH-Manual-del-Usuario-espanol-Rev-B.pdf>.

módulo. Se puede apreciar también en la imagen anterior la conexión de los termistores (4). Las entradas de señales de voltaje (5) en el rango de 0 a 10V o bien 0 a 50mV. Las entradas de señales de corriente (6) en el rango de 0 a 20mA. Por último, tenemos las entradas digitales (7) que se encuentran en estado inactivo cuando la señal de entrada es menor de 2V y el estado activo se registra al momento en el que la señal es mayor a 3V.

Las salidas se configuran en el controlador para las ranuras D y E<sup>23</sup> tal como se puede apreciar en la siguiente figura. Se pueden configurar salidas digitales (1) o bien salidas para el control de relés (2) donde la configuración nos permite conectar 6 relés al controlador, en esta configuración se pueden tener señales de corriente alterna o directa. Con esta información se puede realizar la conexión segura de los dispositivos mencionados en la tabla VI.

Figura 26. **Conexiones de señales de salida del EZ - ZONE RM**



Fuente: Watlow. *Controlador de Procesos - EZ-ZONE-RM-Integrated-Controller*. Consulta: 1 de septiembre de 2021 <https://es.watlow.com/products/Controllers/Temperature-and-Process-Controllers/EZ-ZONE-RM-Integrated-Controller>.

<sup>23</sup> Watlow. *Guía de Usuario: Módulo de alta densidad EZ Zone*. Consulta: 1 septiembre 2021 <https://www.zesta.com/Zesta/media/User-Manuals/ES/zesta-watlow-RMH-Manual-del-Usuario-espanol-Rev-B.pdf>.

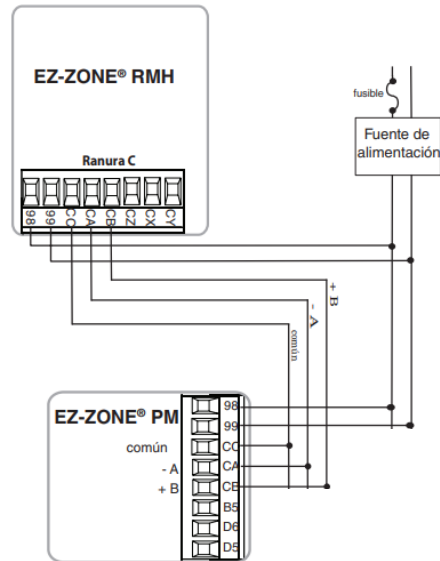
La pantalla del controlador EZ-ZONE PM puede conectarse al controlador RM para poder observar el valor de proceso, en él se puede mostrar el valor del punto establecido o de potencia de salida durante la operación o bien el parámetro, donde el valor aparece en la parte superior. Posee luces laterales, las cuales indican los valores de porcentajes, °C o °F. En los modelos superiores pueden programarse las teclas EZ para bloquear el teclado, configuraciones de usuario, entre otros. Los Ledes numéricos indican la actividad de las salidas. También puede observarse las alarmas para cualquier señal, esto es de manera ilimitada. De igual forma cuenta con un ingreso protegido por contraseña de valores de sintonización, curvas, *set points* y otros datos de vital importancia para el comportamiento adecuado del sistema. También presenta un monitoreo de valores actuales de las entradas y salidas, así como información detallada de diagnósticos y un registro de eventos.

Figura 27. **Pantalla del EZ - ZONE PM**



Fuente: Watlow. *Controlador de Procesos - EZ-ZONE-PM-Integrated-Controller*. Consulta: 18 enero 2021. <https://es.watlow.com/products/Controllers/Temperature-and-Process-Controllers/EZ-ZONE-PM-Integrated-Controller>.

Figura 28. **Conexión de la pantalla del EZ - ZONE PM**



Fuente: Watlow. *Controlador de Procesos - EZ-ZONE-RM-Integrated-Controller*. Consulta: 1 de septiembre de 2021. <https://es.watlow.com/products/Controllers/Temperature-and-Process-Controllers/EZ-ZONE-RM-Integrated-Controller>.

EZ-ZONE RM tiene un controlador completamente funcional, el bloque de funciones se puede reutilizar más de 1000 veces y se puede agrupar y almacenar en la biblioteca del software de configuración. El bloque de función flexible tiene función de control PID, con ganancia y reinicio adaptables, retroalimentación directa, retroalimentación externa, seguimiento y valor establecido y límite de salida. La matemática / lógica modular tiene operadores aritméticos y lógicos, así como funciones logarítmicas y de valor absoluto.

Existe una gran flexibilidad para instalar en consolas de pantalla todo en uno existentes o versiones de montaje lateral con pantallas remotas. El estilo de montaje lateral le permite elegir una tarjeta más pequeña y económica sin dejar de tener fácil acceso a las entradas, salidas y módulos de memoria.

El controlador de automatización programable EZ-ZONE RM y el servidor de control de procesos de producción (OPC) pueden comunicarse con el software LabVIEW, puesto que poseen el estándar para comunicar datos de planta en tiempo real entre dispositivos de control e interfaces de máquina humanos está establecido en este *software* y en el controlador recomendado para la comunicación del sistema.

Para crear una interfaz de LabVIEW al OPC, se necesita crear el llamado servidor de entrada y salida (I/O server), este servidor automáticamente actualiza a LabVIEW con los valores del OPC a la velocidad que se especifica.

#### **4.1.1. Protocolos de comunicación**

El protocolo de comunicación se describe como un intercambio de datos. Debido al tráfico (ancho de banda limitado) y la sensibilidad a la interferencia de la red, el protocolo definirá el número de bits en el paquete, la velocidad de transmisión de datos, si se debe realizar la verificación de errores, entre otros. Hoy en día, se utilizan varios protocolos de comunicación. El módulo EZ-ZONE RM puede equiparse con los siguientes protocolos presentados en la siguiente tabla.

Tabla VIII. **Protocolos de comunicación del controlador EZ-ZONE RM**

<b>Tipos de Protocolo de Comunicación</b>	<b>Descripción</b>
<b>Modbus</b>	Modbus es un protocolo de comunicación, basado en una arquitectura maestro / esclavo o cliente / servidor, diseñado por Modicon en 1979 para su serie de controladores lógicos programables (PLC).
<b>Ethernet</b>	Protocolo ideal para entornos industriales hostiles. Es un sistema que puede proporcionar velocidad, seguridad contra fallas y adaptabilidad. El Ethernet permite establecer una red entre dispositivos de manera funcional y en tiempo real.
<b>Profibus</b>	Este es un protocolo estándar abierto. Es conocido por su alta velocidad de transmisión de datos y su durabilidad en entornos hostiles, incluidos los riesgos de explosión. El protocolo tiene una trayectoria de más de 30 años en el ámbito industrial y sigue adaptándose al desarrollo de la industria manufacturera.
<b>DeviceNet</b>	Es un protocolo de comunicación que se utiliza para interconectar dispositivos de control para el intercambio de datos en la industria de la automatización. Utiliza el bus CAN como tecnología principal y define una capa de aplicación para cubrir una serie de archivos de configuración de dispositivos.

Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de Watlow. *Controlador de Procesos - EZ-ZONE-RM-Integrated-Controller.*

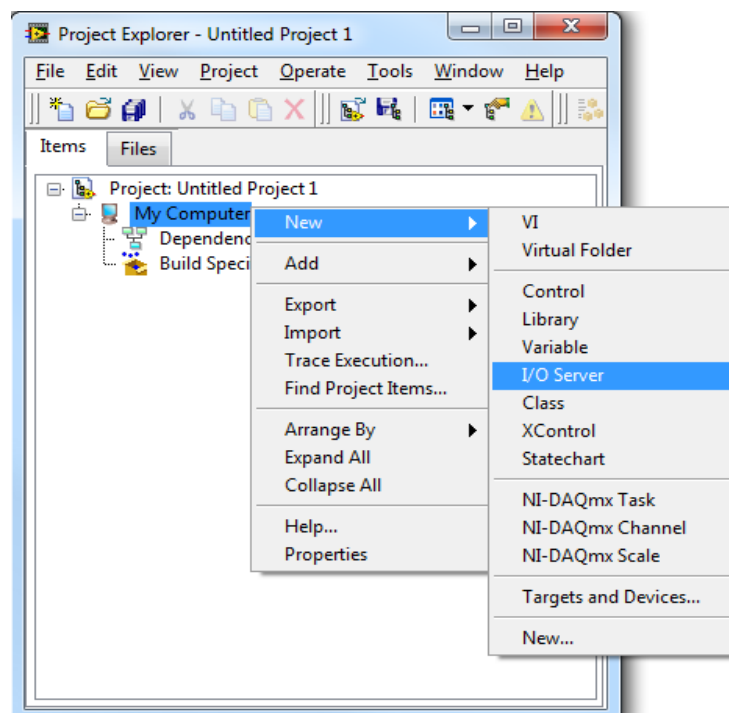
Debido a las características presentadas en la tabla anterior, el controlador EZ-ZONE RM se recomienda que sea utilizado con el protocolo de comunicación tipo Ethernet, debido a que este controlador tiene la flexibilidad de comunicarse con pantallas táctiles, PC y otros dispositivos para construir un sistema verdaderamente distribuido. La gran variedad de arquitecturas con las que se



pueden trabajar proporciona la flexibilidad en el diseño, facilitan la instalación y el mantenimiento.

La conexión del protocolo de comunicación Ethernet del controlador EZ-ZONE RM debe de realizarse siempre con la ayuda del manual de usuario. Para realizar el enlace de comunicación entre el controlador y el simulador se debe de hacer de la siguiente manera, en la ventana de inicio de LabVIEW se debe de hacer clic en “archivo” > “nuevo proyecto”, esto abrirá un nuevo proyecto de LabVIEW. En esta ventana nueva del proyecto se debe de hacer clic derecho en “Mi Computadora” y seleccionar “Nuevo” >> “I/O Server “. Tal y como se muestra en la siguiente figura.

Figura 29. **Ventana de inicio de LabVIEW**

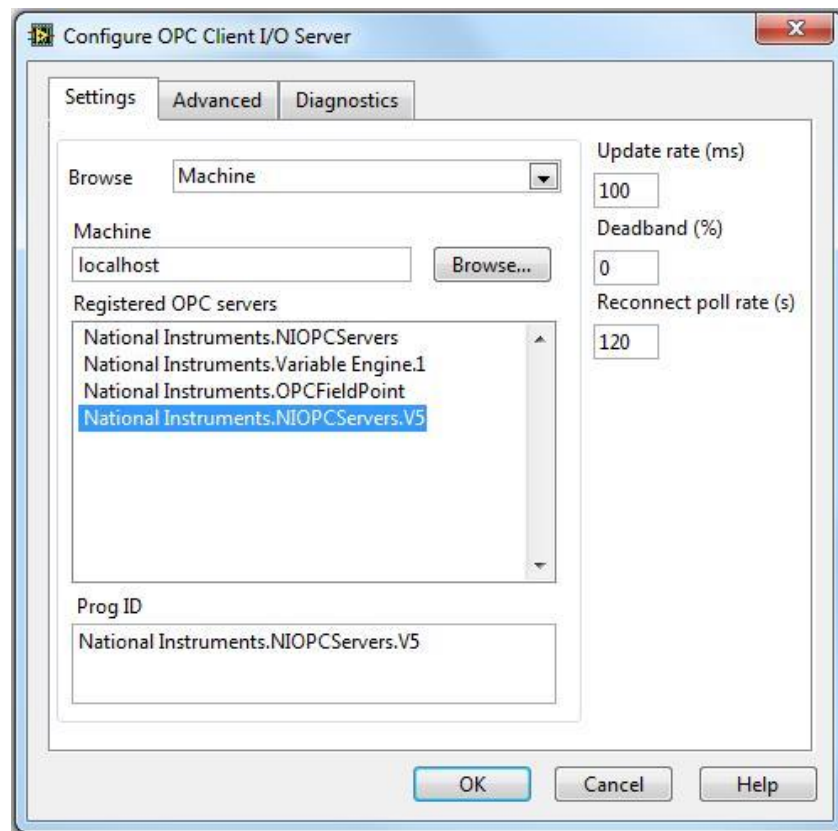


Fuente: National Instruments. *Conecte LabVIEW a cualquier PLC mediante OPC*. Consulta: 18 de enero 2021.

<https://knowledge.ni.com/KnowledgeArticleDetails?id=kA03q000000x0MPCAY&l=es-GT>

Se debe de seleccionar “Cliente OPC” en la ventana para crear un nuevo servidor de E/S a través del Proyecto LabVIEW. Luego se debe de elegir *National Instruments.NIOPCServers.V5* del campo *Registered OPC servers* y establezca *Update rate (ms)* en 100. Esto creará una conexión desde LabVIEW a las etiquetas OPC, que se actualiza cada 100 ms. En la siguiente figura se observa de mejor manera la selección que se realizó.

Figura 30. Configuración de OPC en LabVIEW



Fuente: National Instruments. *Conecte LabVIEW a cualquier PLC mediante OPC*. Consulta: 18 de enero 2021.

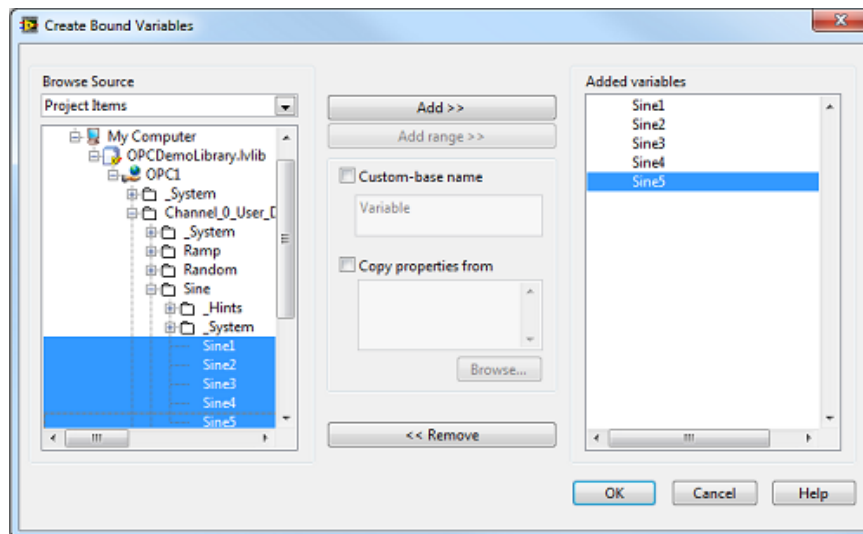
<https://knowledge.ni.com/KnowledgeArticleDetails?id=kA03q000000x0MPCAY&l=es-GT>

Seleccionar "Aceptar" y esto creará automáticamente una biblioteca en la ventana del explorador de proyectos para administrar el servidor E/S. Finalmente, se debe seleccionar "Archivo" >> "Guardar" en la ventana del navegador de proyectos para guardar el proyecto como OPCDemoProject y la biblioteca como OPCDemoLibrary.

LabVIEW permite compartir datos a través de una computadora o red, a través de variables compartidas, que se utilizan para extraer información de cada variable compartida vinculada a la etiqueta OPC, de modo que se pueda acceder a los datos del PLC de forma local.

En primer lugar, se crean nuevas variables compartidas que estén vinculadas a las variables OPC de los PLC. Lo anterior se realiza en la ventana del proyecto de LabVIEW, al hacer clic derecho en "Mi Computadora" y seleccionar "Nueva" >> "Biblioteca". Esto creará una nueva biblioteca para las variables compartidas, esto se utilizará para realizar la conexión a las variables OPC de los PLC. A continuación, se debe de hacer clic en el botón derecho en la biblioteca recién creada y seleccionar "Crear variables enlazadas". Como la ventana *Create Bound Variables*, se debe de seleccionar las etiquetas "OPC" para vincular las variables compartidas y navegar hacia los datos sinusoidales simulados desde el servidor OPC, como se muestra en la siguiente figura.

Figura 31. **Ventana para la creación de las variables**



Fuente: National Instruments. *Conecte LabVIEW a cualquier PLC mediante OPC*. Consulta: 18 de enero 2021.

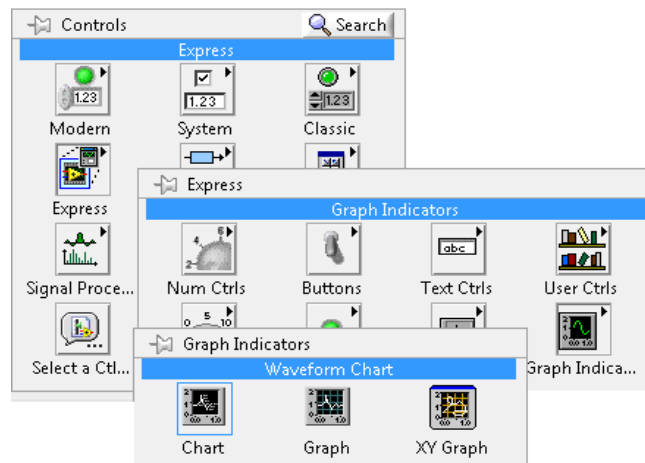
<https://knowledge.ni.com/KnowledgeArticleDetails?id=kA03q000000x0MPCAY&l=es-GT>

En este punto, debe seleccionar todas las variables requeridas, luego hacer clic en “Agregar” y luego presionar el botón “OK”. Esto creará variables compartidas, que están vinculadas a las variables OPC del PLC y se cargan en el editor de variables múltiples. En el editor de variables múltiples, seleccionar “Listo”. Esto agregará la nueva variable compartida a la biblioteca creada anteriormente.

Debe guardar la nueva biblioteca como *OPCItems.lvlib* en la ventana del explorador del proyecto al hacer clic con el botón derecho en la biblioteca y seleccionar “Guardar como”. Las variables compartidas deben implementarse al hacer clic con el botón derecho en la biblioteca *OPCItems* y seleccionar “Implementar”. Esto publicará las variables compartidas y las pondrá a disposición de otras computadoras en la red.

Una de las opciones de LabVIEW es crear un sistema de interfaz gráfica que lleve información de OPC al programa que se está programando para analizarla y mostrarla al usuario. Para establecer esta comunicación en el explorador de proyectos se debe de hacer clic con el botón derecho en “Mi PC” y seleccionar “Nuevo” >> “VI”. Esto creará un nuevo instrumento virtual o VI. El VI se utiliza para generar código gráfico ejecutable e interfaces de usuario. Por defecto, se verá el Panel frontal, que es la interfaz de usuario del VI. LabVIEW tiene muchos componentes de IU (interfaces de usuario) incorporados, como gráficos, diales, etc., que fácilmente pueden usarse para construir una IU intuitiva y poderosa. Se debe de seleccionar “Ver” >> “Paleta de controles”, acá se pasa el cursor sobre las diversas categorías para explorar los componentes de la interfaz de usuario en LabVIEW. Ejemplo: al seleccionar “Express” >> “Graph Indicators” >> “Chart”, se seleccionará un gráfico de forma de onda del panel de control y se colocará en el panel frontal. Se puede observar en la imagen siguiente.

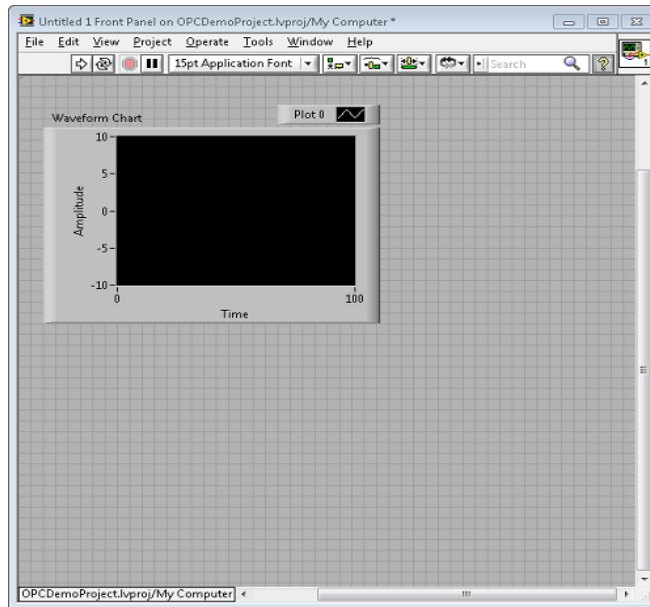
Figura 32. **Panel de control para la selección de componentes**



Fuente: National Instruments. *Conecte LabVIEW a cualquier PLC mediante OPC*. Consulta: 18 de enero 2021.

<https://knowledge.ni.com/KnowledgeArticleDetails?id=kA03q000000x0MPCAY&l=es-GT>

Figura 33. Panel frontal de LabVIEW



Fuente: National Instruments. *Conecte LabVIEW a cualquier PLC mediante OPC*. Consulta: 18 de enero 2021.

<https://knowledge.ni.com/KnowledgeArticleDetails?id=kA03q000000x0MPCAY&l=es-GT>

En el VI, se debe de seleccionar “Ventana” >> “Mostrar diagrama de bloques”, como se vio anteriormente, el diagrama de bloques es donde se construye el comportamiento de su aplicación. En el explorador de proyectos, se expande el OPCItem biblioteca y se selecciona el SINE1 s variables *hared*. Luego se arrastra y se suelta la variable compartida “Sine 1” desde el explorador del proyecto al diagrama de bloques del VI. Se selecciona la opción “Ver” > “Paleta de herramientas”, esto contiene varias herramientas para construir el diagrama de bloques. De forma predeterminada, se utiliza la herramienta "Selección automática de herramienta", que selecciona la herramienta adecuada en función de la posición del cursor. Se selecciona la herramienta de conexión de cables. Esta herramienta se utiliza para cablear el terminal al diagrama de bloques.

Figura 34. **Herramienta para conectar por medio de cable los gráficos**



Fuente: National Instruments. *Conecte LabVIEW a cualquier PLC mediante OPC*. Consulta: 18 de enero 2021.

<https://knowledge.ni.com/KnowledgeArticleDetails?id=kA03q000000x0MPCAY&l=es-GT>

Se utiliza la herramienta *Connect Wire* para conectar la variable compartida *Sine1* al “Gráfico de forma de Onda” hacer clic en la variable compartida *Sine1* y luego en el “Gráfico de forma de Onda”.

Figura 35. **Cableado de los terminales y conexión de forma de onda**



Fuente: National Instruments. *Conecte LabVIEW a cualquier PLC mediante OPC*. Consulta: 18 de enero 2021.

<https://knowledge.ni.com/KnowledgeArticleDetails?id=kA03q000000x0MPCAY&l=es-GT>

A partir de este punto, cuando se ejecuta el VI, los datos fluyen desde la variable compartida al gráfico de forma de onda. Seleccione la herramienta "Selección automática" de la paleta de herramientas, que se muestra en la figura siguiente.

Figura 36. **Paleta de herramientas e icono de selección automática**



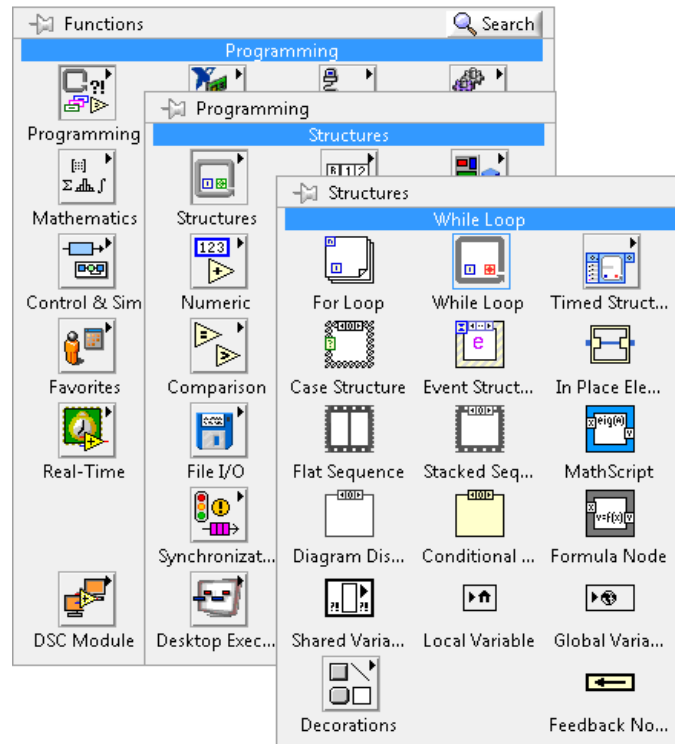
Fuente: National Instruments. *Conecte LabVIEW a cualquier PLC mediante OPC*. Consulta: 18 de enero 2021.

<https://knowledge.ni.com/KnowledgeArticleDetails?id=kA03q000000x0MPCAY&l=es-GT>

La paleta de funciones se puede abrir al seleccionar "Ver" >> "Paleta de funciones", esta última contiene cientos de funciones analíticas y de control, así como estructuras para programación gráfica. Se selecciona un bucle "while" de la paleta de funciones navegando a "Programación" >> "Estructuras" >> "bucle while". Cuando se selecciona el ciclo "while", el cursor se muestra como se muestra a continuación. Esto le permite envolver un ciclo "while" alrededor de una sección de código.



Figura 37. **Panel de funciones, programación y estructuras**

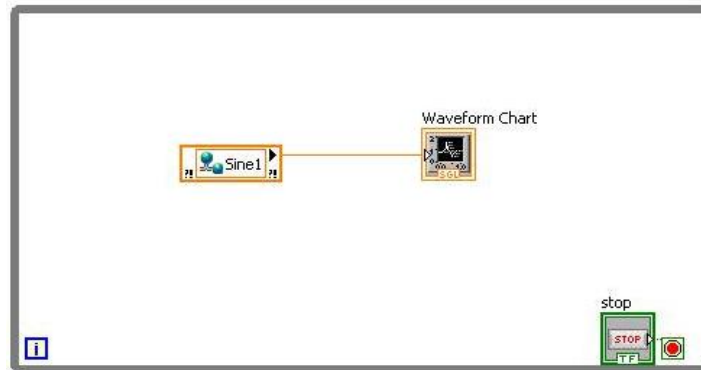


Fuente: National Instruments. *Conecte LabVIEW a cualquier PLC mediante OPC*. Consulta: 18 de enero 2021.

<https://knowledge.ni.com/KnowledgeArticleDetails?id=kA03q000000x0MPCAY&l=es-GT>

Teniendo el cursor de bucle *while*, se coloca alrededor de la variable compartida y el gráfico de forma de onda hacer clic y arrastrar el cursor. Ahora se creará un control de parada en el ciclo *while* hacer clic derecho en la condición del ciclo seleccionar “Crear Control”. Esto coloca un botón “Detener” en el panel frontal que permite al usuario detener el VI.

Figura 38. **Conexión del bucle *while* y botón “detener”**

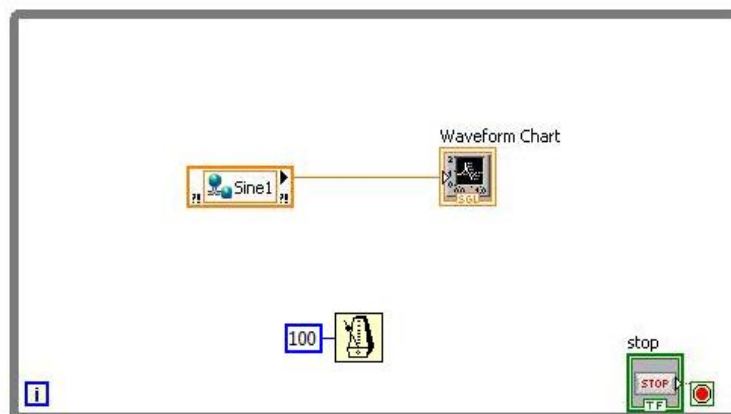


Fuente: National Instruments. *Conecte LabVIEW a cualquier PLC mediante OPC*. Consulta: 18 de enero 2021.

<https://knowledge.ni.com/KnowledgeArticleDetails?id=kA03q000000x0MPCAY&l=es-GT>

Básicamente el ciclo *while* hace que el código en él se ejecute continuamente hasta que el usuario u otra lógica en el VI lo detenga. Dado que el ciclo *while* ahora se encuentra, el código se ejecutará lo más rápido posible. Se debe agregar un VI múltiple *Wait until Next ms* al ciclo se ejecute cada número de segundos establecido (en este caso 100ms).

Figura 39. **Contador de ms para el ciclo *while***



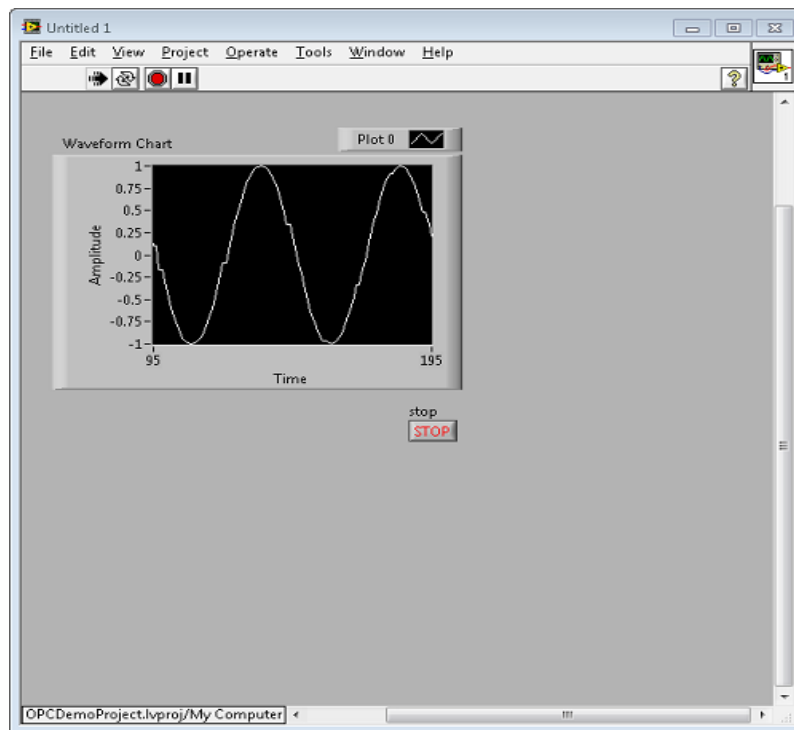
Fuente: National Instruments. *Conecte LabVIEW a cualquier PLC mediante OPC*. Consulta: 18 de enero 2021.

<https://knowledge.ni.com/KnowledgeArticleDetails?id=kA03q000000x0MPCAY&l=es-GT>

Puede regresar al panel frontal seleccionar "Ventana" >> "Mostrar panel frontal" y luego hacer clic en el botón "Ejecutar" en la barra de herramientas para ejecutar el VI.

Finalmente, una vez que se complete la implementación, hacer clic en "Cerrar" en la ventana de implementación. Cuando la aplicación comience a ejecutarse, se verá la onda sinusoidal *Sine1* en el gráfico de forma de onda.

Figura 40. Ejecución de la onda sinusoidal



Fuente: National Instruments. *Conecte LabVIEW a cualquier PLC mediante OPC*. Consulta: 18 de enero 2021.

<https://knowledge.ni.com/KnowledgeArticleDetails?id=kA03q000000x0MPCAY&l=es-GT>

Siempre que se pueda acceder correctamente y con éxito a los datos del PLC a través del software LabVIEW, se pueden integrar potentes funciones de análisis y control en el sistema de instrumentación. Con estas configuraciones se

asegura la adquisición correcta de los valores generados por las variables críticas del sistema.

#### **4.2. Acercamiento de normas a la simulación de los lazos de control**

Previamente se había determinado el significado de la alarma, EEMUA describió las principales funciones que deben realizar las alarmas en el sistema. Primero, la alarma alerta, notifica y dirige. Las alarmas incluyen información que identifica la causa del problema e incluye instrucciones para responder a la advertencia, como pasos escritos para corregir la advertencia mostrada o ayudar en la elección del operador. Complementa la norma IEC 62682 e indica que las advertencias que se muestran a los técnicos son útiles y adecuadas. Esto es importante porque le ahorra tiempo al operador a la hora de decidir si ignorar la alarma. También muestra que las condiciones de alarma clave notifican al operador sobre condiciones anormales del proceso o fallas del equipo y ayudan a responder a ellas.

La respuesta de la alarma debe de disponer de respuestas claras y definidas, esto asegura la efectividad de la alarma. La respuesta definida para cada alarma se usa generalmente para redactar procedimientos de respuesta de alarma y sirve como material de capacitación para operadores y técnicos.

La Norwegian Petroleum Directorate (NPD) enfatizó en la publicación de sus principios de diseño del sistema de alarma, el sistema debe notificar al operador sobre la condición de la planta o proceso y evaluar las posibles acciones correctivas de manera oportuna para mantener los objetivos de la planta en términos de seguridad, productividad, entorno y eficiencia.

Para las normas IEC 62682 y la IEC 62241, el diseño de la presentación del sistema de alarmas debe de tener en cuenta las siguientes características adicionales:

- Proporcione al operador información sobre la causa y el efecto del evento.
- Guía eficazmente al operador en el diagnóstico de fallas, transitorios y condiciones anormales de funcionamiento.

En cuanto a las funciones primarias y secundarias de la alarma, se ha llegado a un consenso en la literatura, pues la función principal es ayudar al operador a detectar el estado anormal del equipo, en otras palabras, la función principal es atraer al operador y dirigir la atención del operador a la distorsión de las condiciones normales de la planta a las que es necesario responder. (1) Finalmente, las funciones secundarias se definen como registros de eventos y alarmas para el posterior análisis de sucesos.

El sistema no debe limitarse por advertir a los operadores de problemas o desviaciones en el proceso que dañan la planta si no que debe de ser capaz de proporcionar de una retroalimentación de lo sucedido para identificar que provoco la alarma y evitar que esto suceda nuevamente.

#### 4.2.1. Bases generales para el diseño del sistema de alarmas de las variables críticas

Las bases generales para el diseño del sistema de alarma reúnen los requisitos mínimos para el monitoreo, detección y operación del sistema de alarma para variables críticas de la caldera. Además, incluye los requisitos mínimos sobre la experiencia de los técnicos responsables de operar el sistema de alarma.

##### 4.2.1.1. Principios generales

“Un principio se basa en la forma de aprender y trabajar de las personas.”<sup>24</sup> Estos principios están basados principalmente en ideas de alto nivel, teniendo una aplicación muy general. La siguiente tabla describe cuatro principios clave para el diseño de las alarmas:

Tabla IX. Principios generales del diseño del sistema de alarma

<b>Principio</b>	<b>Descripción del Principio Clave del Sistema de Alarma</b>
<i>Facilidad de uso</i>	El sistema de alarma está diseñado para satisfacer sus necesidades y funcionar dentro de sus capacidades. Por lo tanto, la información que muestra el sistema de alarma debe tener en cuenta lo siguiente: 1) Siempre debe estar asociado al rol del usuario. 2) Explicar claramente la respuesta requerida 3) Debe presentarse a un nivel que los usuarios puedan afrontar. 4) Ser fácil de entender.
<i>Seguridad</i>	El sistema de alarma ayuda a proteger la seguridad de las personas, el medio ambiente y los equipos de la planta. Los requisitos de respuesta a las alarmas del operador deben basarse en datos y principios de factores humanos.
<i>Control del rendimiento</i>	Los sistemas de alarma deben evaluarse durante el diseño y la construcción para garantizar que sean útiles y eficaces en todas las condiciones de funcionamiento. Realizamos revisiones periódicas a lo largo de su ciclo de vida para asegurarnos de que funcione. Requiere la participación real y continua de los gerentes de planta con mayor experiencia.
<i>Inversión en ingeniería</i>	Tiene que cumplir los estándares. A medida que se desarrollan nuevos sistemas de alarma o se modifican los sistemas existentes, cada alarma se adapta a la metodología estructurada.

Fuente: EEMUA 191. *Alarm systems - a guide to design, management and procurement*.

<sup>24</sup> MARTÍNEZ, Ana Belén. *Curso de introducción a la interacción persona-ordenador*. p. 92.

Con la ayuda de estos principios, se puede obtener una base para simular sistemas de alarma. Para cumplir con la seguridad del propio panel de control, el sistema utiliza una clave y contraseña para cada técnico. Esto permite a los técnicos manipular las variables del sistema desde la consola.

#### **4.2.1.2. Anunciación de la alarma**

La anunciación de una alarma tiene un propósito y un objetivo, se pueden asociar con tareas operativas, y cada tarea está respaldada por varias funciones.<sup>25</sup> Las tareas operacionales, según la tarea predominante o la que demanda mayor atención, se dividen en cuatro: la detección, identificación, planificación y ejecución.

La detección se basa principalmente en la atención del usuario que acudió a una anomalía o suceso, en este caso se está generando una alarma. Luego la identificación donde recurre al análisis para identificar el estado de la planta, la causa de la alarma y la consecuencia de no resolver la causa de la alarma. En tercer lugar, en caso de alarma, planificar dónde establecer acciones correctivas y tomar las decisiones necesarias para ejecutar medidas de recuperación inmediatas o retardadas. Finalmente, la ejecución incluye planificar las acciones a tomar para resolver el evento que generó la alarma.

#### **4.2.1.3. Directrices**

Las directrices recomiendan acciones basadas en un conjunto de principios de diseño. Estas pautas son más específicas que los principios y requieren más experiencia para interpretarlas. Las directrices son importantes porque “estas

---

<sup>25</sup> DAVEY, E., GUO, K., RUSSOMANNO, S., POPOVIC, J., & ARCHER, P. *Towards defining the functional role for CANDU annunciation. Proceedings of the IEEE 5th Conference on Human Factors and Power Plants.* pp. 314-319.

permiten asegurar consistencia a través de las diferentes partes de un sistema y de una familia de sistemas.”<sup>26</sup>

Estas directrices se pueden resumir como:

(...) aproximaciones sistemáticas a usar la experiencia práctica, difundir e incorporar experiencia experimental, incorporar reglas de sentido común, promover la consistencia entre los diseñadores de las diferentes partes de la interfaz y aplicar las pruebas de facilidad de uso para tratar de resolver los conflictos que puedan surgir.<sup>27</sup>

Cuando se siguen unas directrices se están realizando operaciones en base a la experiencia personal, en este caso se refiere a la experiencia previa del técnico que controla la caldera, la experiencia previa es fundamental para solucionar problemas pues se conoce el funcionamiento de la maquina y de esta manera prevenir accidentes que puedan ocasionar peligros mecánicos en la caldera.

#### **4.2.1.4. Estándares**

Los estándares son requisitos, reglas o recomendaciones basadas en principios que han sido probados en la práctica, esto es para retroalimentar su efectividad y seguir una serie de recomendaciones o requisitos, puesto que en el ámbito industrial existen estándares basados principalmente en requisitos que indica lo que se debería de realizar, este asesoramiento basado en estándares proporciona consejos instructivos, esto como recomendación.

La Comisión Internacional de Electrotecnia (IEC – International Electrotechnical Commission) es una de las principales organizaciones

---

<sup>26</sup> TORRALBA, María Belén. *Análisis de incidentes operativos en sistemas complejos: actuación*. p. 72.

<sup>27</sup> BROWN, Marlin. *Human-computer interface design guidelines*. p.2.



dedicadas a la normalización, responsable de la elaboración y publicación de normas internacionales relacionadas con la energía eléctrica, la tecnología electrónica y tecnologías afines. Por lo tanto, se seleccionó la norma IEC 62682 para el diseño del lazo de control del sistema de alarmas

#### **4.2.2. Simulación de panel principal del sistema**

Anteriormente se mencionó que la seguridad que debe de presentar el panel de control de alarmas, por tal motivo en las siguientes imágenes se pueden apreciar los diferentes usuarios que se crearon para esta simulación. Es importante mencionar que se debe de identificar los puestos de trabajo y las funciones principales de cada operador y supervisor en turno del panel de control de alarma de la caldera, debido a que cada uno tendrá su acceso personalizado.

Figura 41. **Panel principal del sistema de alarmas**



Fuente: elaboración propia, realizado con LabVIEW 2020 SP1.

Como se puede apreciar en la imagen anterior, este sistema de alarmas se inicia con un panel principal, donde se debe de ingresar la contraseña y el usuario

que va a monitorear el sistema de alarmas, también se puede apreciar una luz indicadora y una barra de carga para ingresar al sistema, también puede apreciarse un botón de paro en dado caso se quiere salir del panel principal. Debido a que se realizaron tres simulaciones (control del nivel de agua, detección de llama y control de presión de vapor), se determinó crear tres usuarios, cada uno simula el operador de cada sistema. Estos usuarios pueden apreciarse en la siguiente figura.

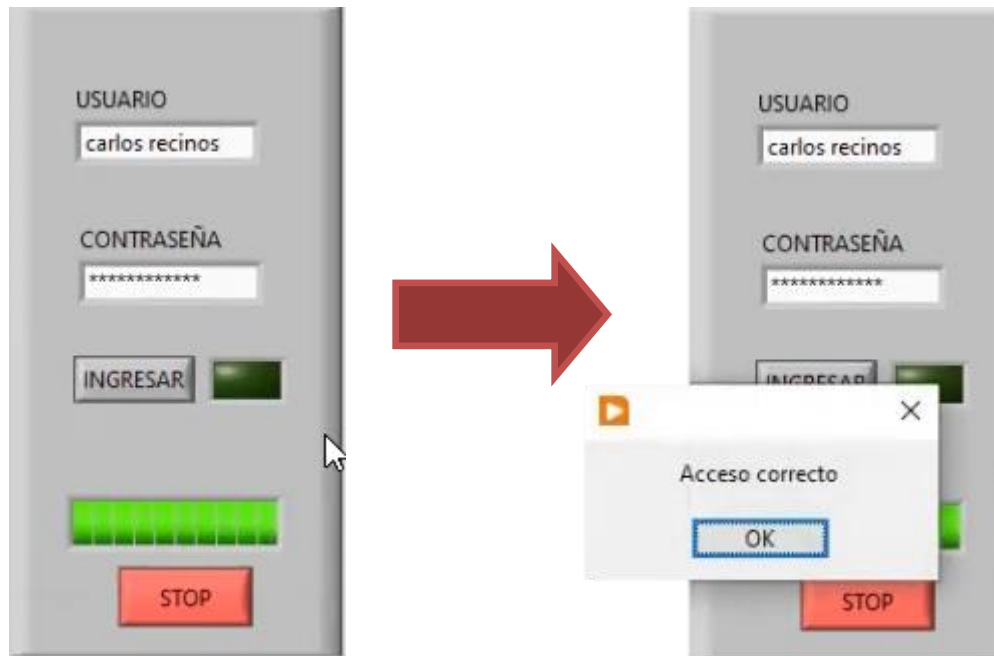
Figura 42. **Usuarios de operadores creados para las simulaciones**



Fuente: elaboración propia, realizado con LabVIEW 2020 SP1.

Cada uno de los usuarios tiene un panel asignado, al momento en el que cada uno ingresa de manera correcta sus credenciales, el sistema lo redirige exclusivamente al panel que tiene asignado para operar. Caso contrario se da con el usuario de supervisor, este usuario fue creado para que pueda monitorear cada uno de los paneles.

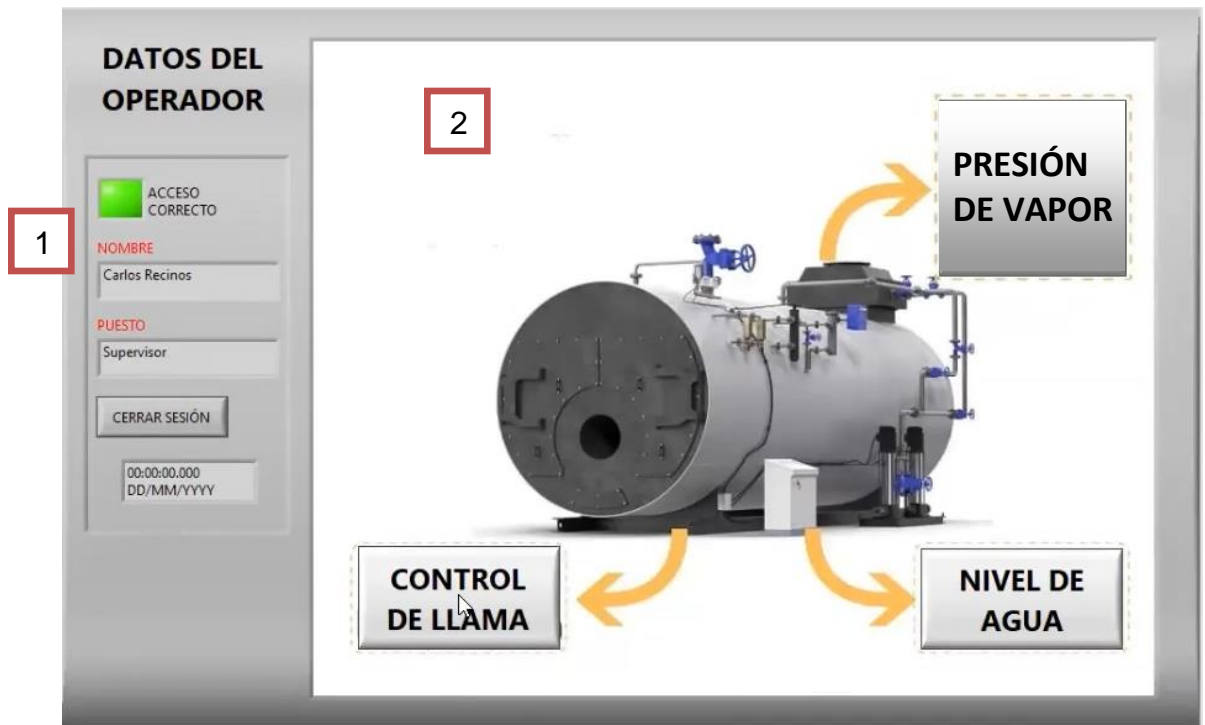
Figura 43. **Usuario de supervisor y confirmación de acceso correcto al sistema**



Fuente: elaboración propia, realizado con LabVIEW 2020 SP1.

En la imagen anterior se puede apreciar el usuario del “supervisor” del panel de alarmas y la confirmación del acceso correcto de las credenciales. Como se mencionó anteriormente, este es el único usuario que puede tener acceso a cualquiera de los paneles de control, esto se logra por medio del menú que se muestra luego de ingresar las credenciales.

Figura 44. **Menú del supervisor para monitoreo de los demás paneles del sistema de alarmas**



Fuente: elaboración propia, realizado con LabVIEW 2020 SP1.

En la figura anterior se muestra el menú al que el operador tiene acceso al momento de ingresar sus credenciales de manera correcta. En el 1 se observa la confirmación del acceso correcto al sistema, el cual es indicado por medio de un led. También se aprecia el nombre del supervisor y el puesto, además se encuentra un botón para cerrar la sesión y un recuadro en la parte inferior, el cual muestra la hora y fecha en la que se está ingresando al sistema.

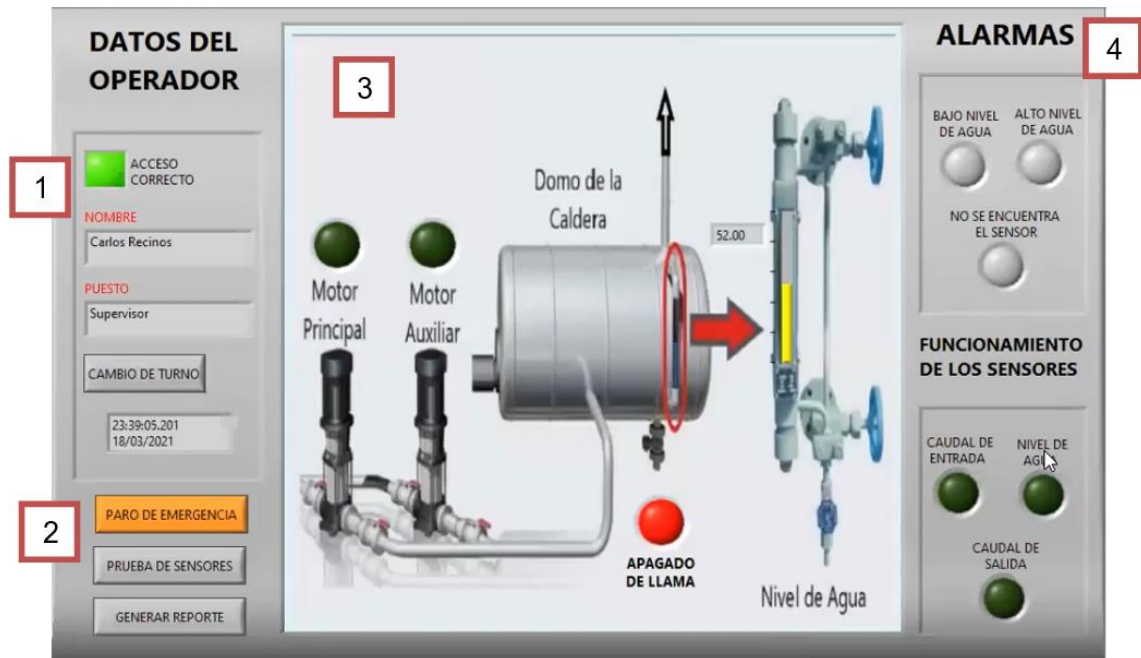
En la figura 44, en el 2 se encuentra el menú con el cual el supervisor puede ingresar a cada uno de los paneles, estos últimos serán analizados con mayor detenimiento en las secciones siguientes. Es oportuno mencionar que estas simulaciones cumplen con el principio de “facilidad de uso” y “seguridad” que son mencionados en la tabla VIII.

El usuario de “supervisor” es el único que puede ingresar al panel seleccionado en el menú y luego de verificar el funcionamiento del panel este puede regresar al menú principal para seleccionar otra opción en el menú. También fue mencionado anteriormente que la seguridad del panel se respalda con el uso de un sistema de llaves, las cuales activarán el panel para que este pueda ser utilizado.

#### **4.2.3. Simulación del lazo de control para el nivel de agua en la caldera**

Al momento en el que el operador ingresa de manera correcta las credenciales o el supervisor selecciona en el menú la opción de “nivel de agua”, serán redirigidos al panel específico para el monitoreo de esta variable.

Figura 45. **Panel del sistema de alarmas para el control del nivel de agua**



Fuente: elaboración propia, realizado con LabVIEW 2020 SP1.

En la figura 45 se aprecia el panel principal para el control del sistema de alarma. En el 1 se observa la confirmación del acceso correcto al sistema, el cual es indicado por medio de un led. También se aprecia el nombre de la persona que ingresa al sistema y el puesto que este ocupa, además se encuentra un botón para cambiar de turno y un recuadro en la parte inferior, el cual muestra la hora y fecha en la que se está ingresando al sistema.

En el 2 se observa el botón de paro de emergencia, un botón para determinar el estado de los sensores y un botón para generar un reporte de sucesos. En el 3 se encuentra el sistema que se monitorea en ese momento, en este caso es el sistema de control para el nivel de agua, se observa el monitoreo en tiempo real del nivel de agua, este de manera digital y analógica por medio de una barra amarilla. Se encuentra el motor principal y el motor auxiliar, el cual

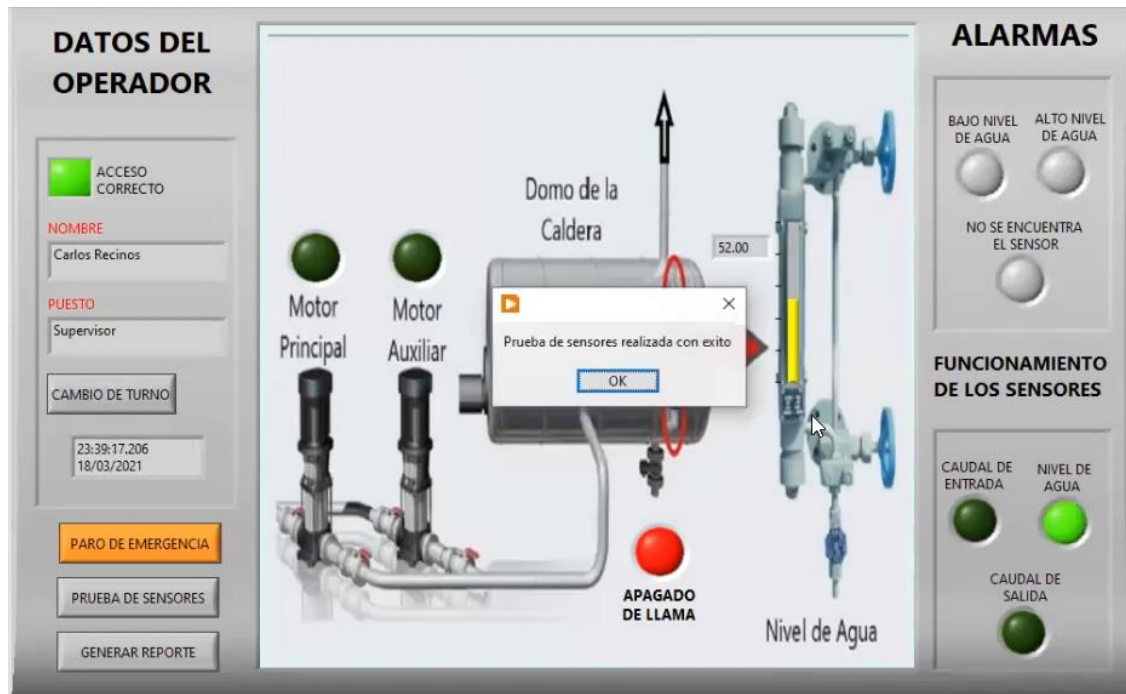
indican su funcionamiento con un led en la parte superior, por último, se encuentra un indicador de apagado de llama, este cambia de color cuando el sistema no puede regular el nivel de agua.

En el 4 se encuentran los indicadores de las diferentes alarmas que se pueden generar en el sistema, en la parte inferior se puede apreciar los indicadores del funcionamiento de los sensores instalados en la caldera, específicamente para el control del nivel de agua.

Como se menciona en la sección 2.4.1 el sistema de alarma para el control del nivel de agua tendrá dos alarmas para bajo nivel y una para el alto nivel, cada una con sus respectivas acciones recomendadas.

Como función principal para iniciar con el monitoreo adecuado de los parámetros, es recomendable realizar una prueba de los sensores que se encuentran en el sistema para el control del nivel de agua, con esto se asegurara el buen funcionamiento de los sensores o equipo. Se indicará que está corriendo la prueba de sensores al momento en el que se enciende un led para cada sensor y al finalizar la prueba arrojará un mensaje con el cual se confirma el buen funcionamiento de los sensores. Esto se puede apreciar en la siguiente figura.

Figura 46. Prueba de sensores del panel de control para el nivel de agua

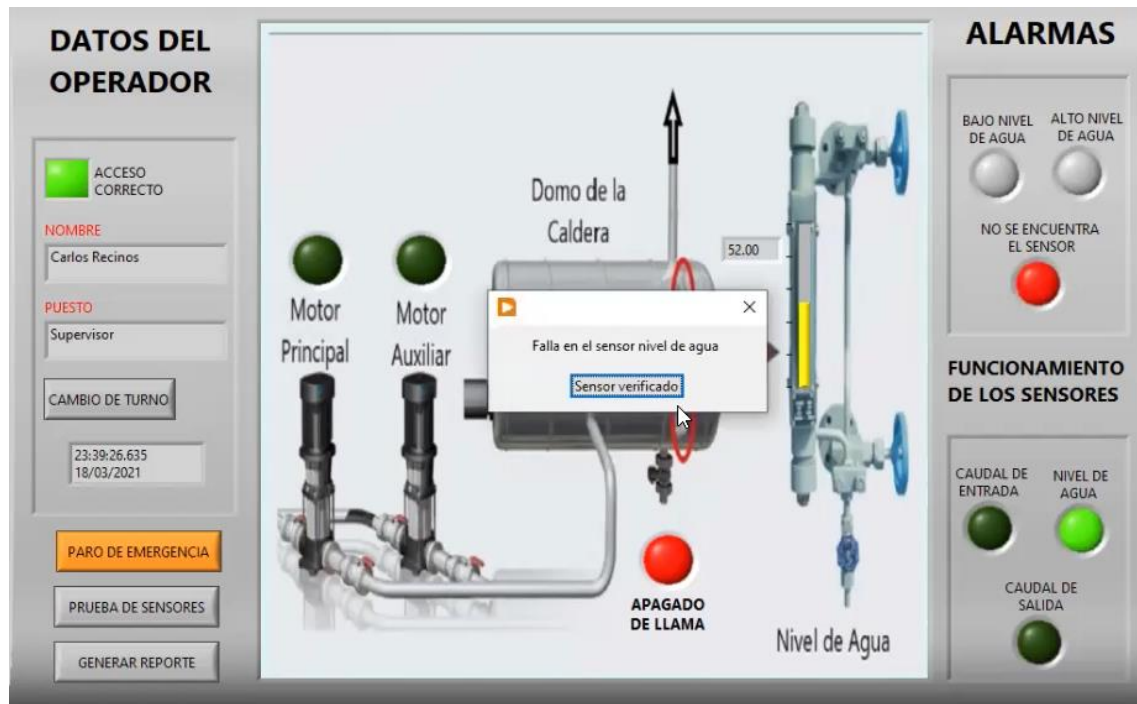


Fuente: elaboración propia, realizado con LabVIEW 2020 SP1.

Al momento en el que la prueba de sensores está siendo corrida y uno de estos se encuentra en mal estado o el sistema no es capaz de reconocerlo, el sistema arrojará una alarma en el panel y se indica de manera visual que sensor no está funcionando, también se muestra un mensaje de advertencia indicando la falta de un sensor y el nombre de este. Al momento de verificar el funcionamiento del sensor, se confirma su funcionamiento correcto en el mensaje de advertencia, esto permitirá seguir con el monitoreo normal del sistema. Esta situación se aprecia en la figura 47.



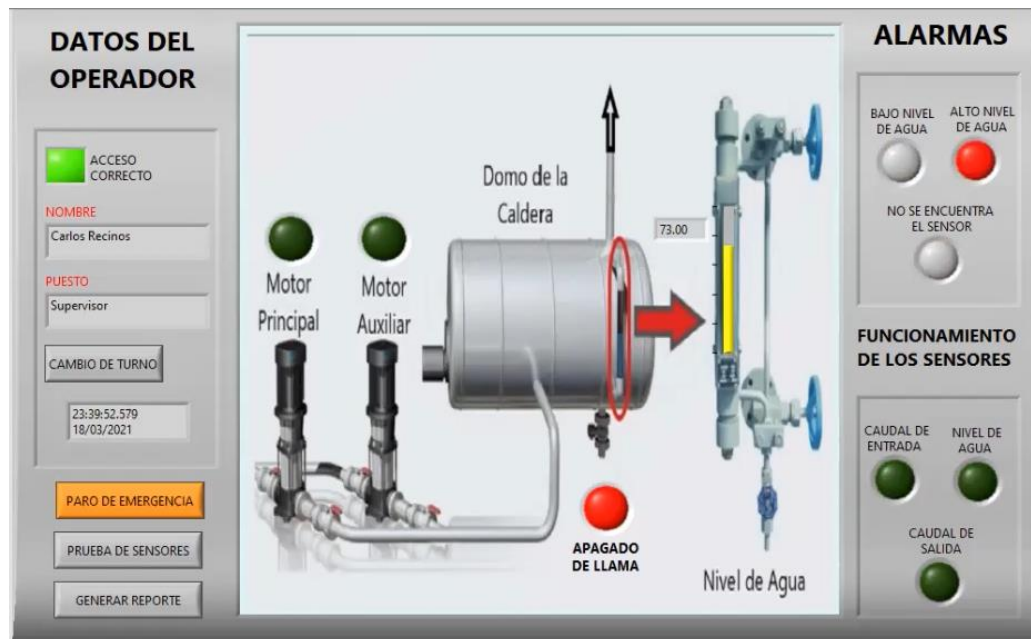
Figura 47. **Falla de sensor en prueba de sensores del sistema de control nivel de agua**



Fuente: elaboración propia, realizado con LabVIEW 2020 SP1.

El sistema de alarmas para el control del nivel de agua informa al operador cuando existe un nivel alto de agua. Al momento en el que se presenta esta situación, las bombas se apagan y se da el aviso al operador por medio de una luz indicadora, tal y como se observa en la figura 48.

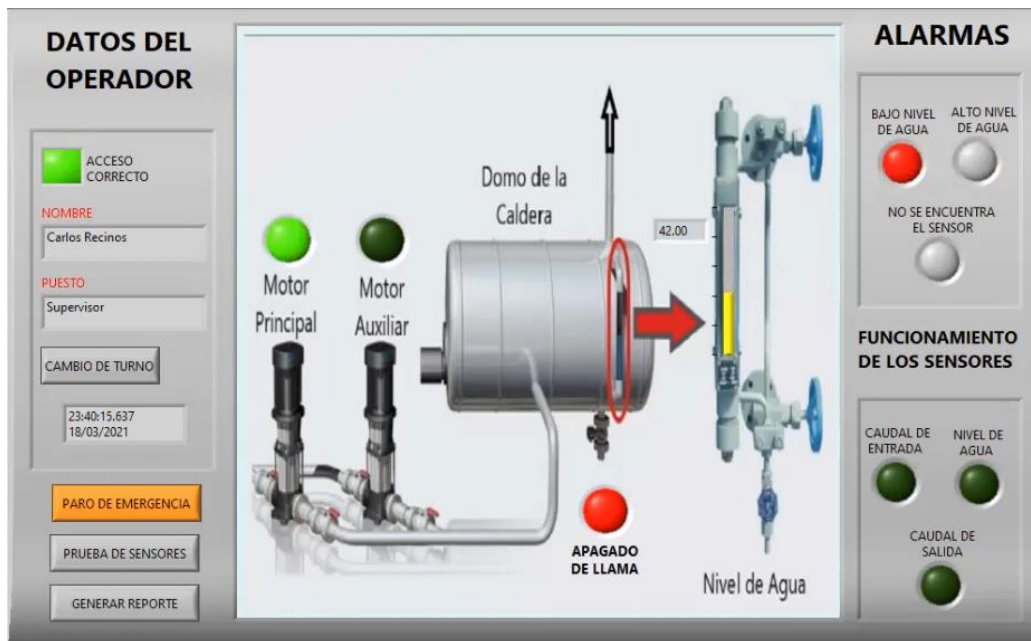
Figura 48. Alarma de alto nivel de agua en el sistema



Fuente: elaboración propia, realizado con LabVIEW 2020 SP1.

Otra situación de alarma que puede presentarse con el nivel de agua sucede cuando este nivel es inferior o comienza por descender de manera descontrolada, esto se detalla en la sección 2.4.1. Se presenta una alarma inicial al momento en el que el nivel sea inferior al 50 % del nivel de agua, el sistema evita que el agua siga descendiendo, por tal motivo este enciende el motor principal para que se regule el nivel de agua, esto se indica con un led en nuestro panel de control, tal y como se puede ver en la siguiente figura.

Figura 49. **Bajo nivel de agua – nivel inferior al 50 %**

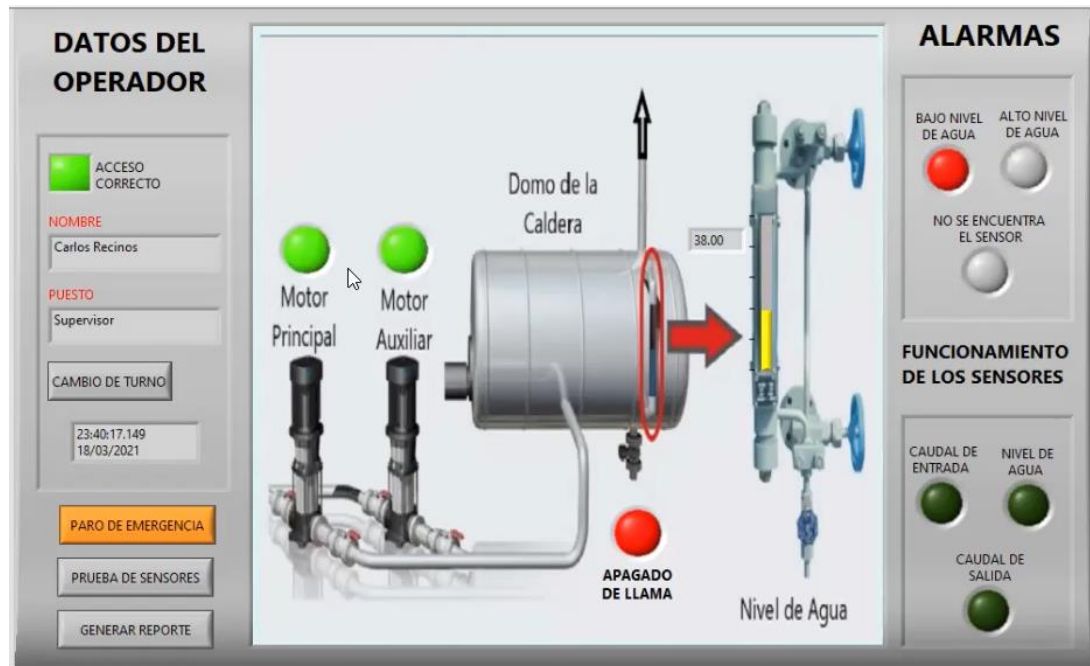


Fuente: elaboración propia, realizado con LabVIEW 2020 SP1.

Si el sistema no logra compensar la pérdida de agua y esta sigue descendiendo de manera desproporcionada llegando a un nivel inferior del 40 %, el sistema activa el motor auxiliar esto con el fin de evitar que el nivel siga descendiendo, como se puede apreciar en la figura 50.

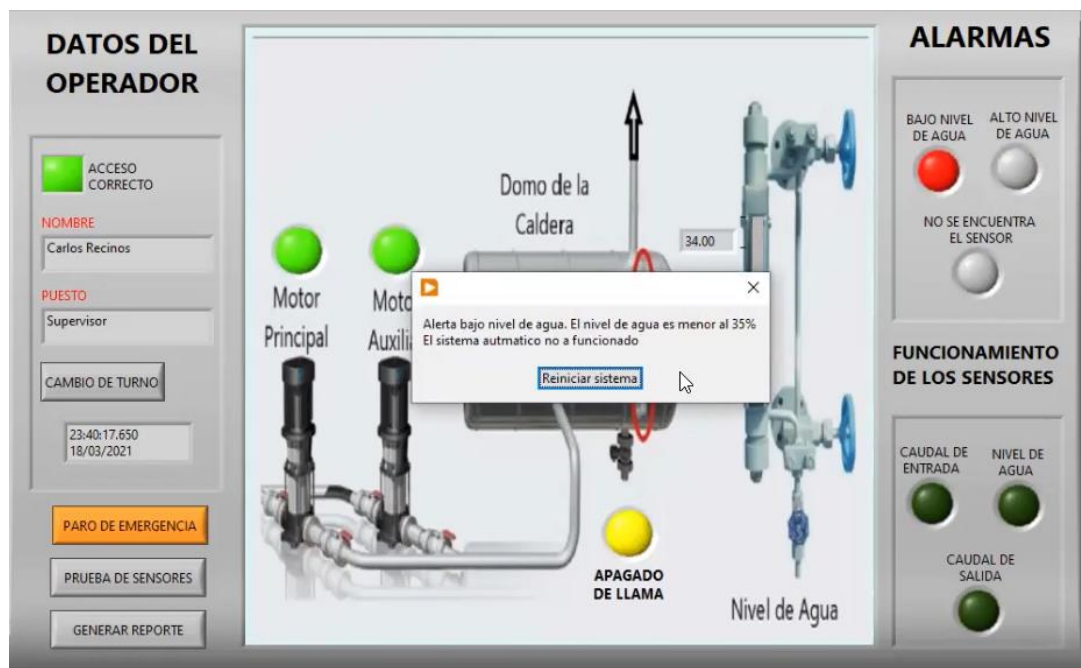
Si el sistema no logra compensar el descenso de agua en el domo y este es inferior al 35 %, el sistema de alarma emite una alarma visual por medio de un led en el panel de control y también se emite un mensaje de advertencia, esto para que se alerte al operador de la situación de emergencia que se está suscitando en ese momento. De igual forma siguen encendidos los motores (principal y auxiliar) para compensar la falla, junto con esto la llama se apaga, esto para evitar un incidente. Esto se puede observar en la figura 51.

Figura 50. **Bajo nivel de agua- nivel inferior al 40 %**



Fuente: elaboración propia, realizado con LabVIEW 2020 SP1.

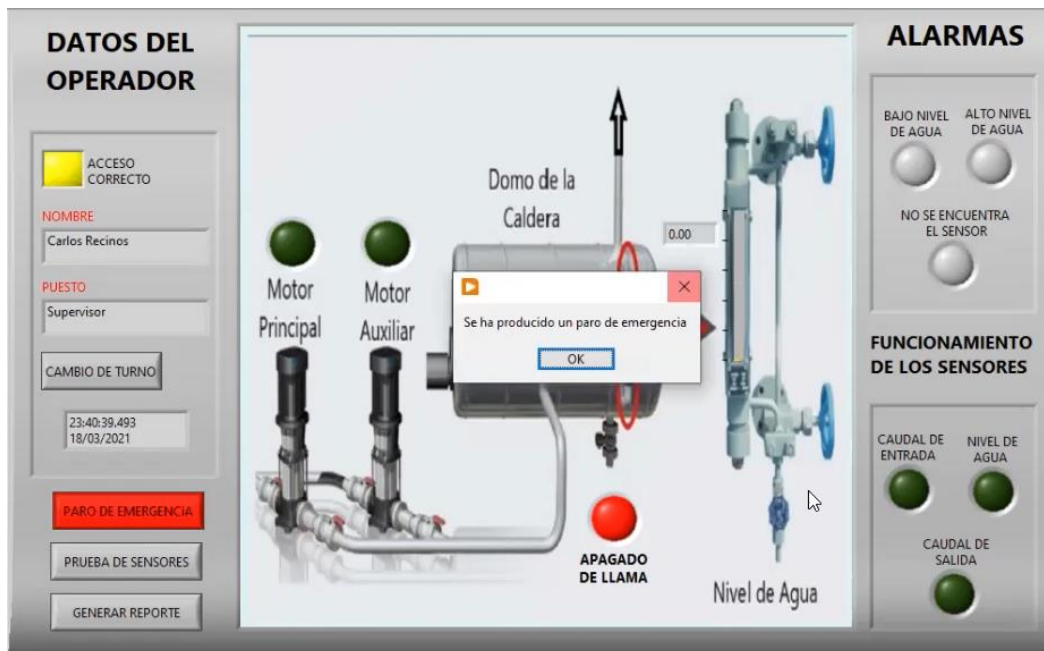
Figura 51. **Bajo nivel de agua- nivel inferior al 35 %**



Fuente: elaboración propia, realizado con LabVIEW 2020 SP1.

Si el operador del sistema para el monitoreo del nivel de agua ve prudente presionar el botón de paro de emergencia por cualquier situación que él crea relevante, el sistema informara sobre el paro de emergencia por medio de un mensaje en la pantalla y una intermitencia en el led de acceso correcto, esto para confirmar dicho paro.

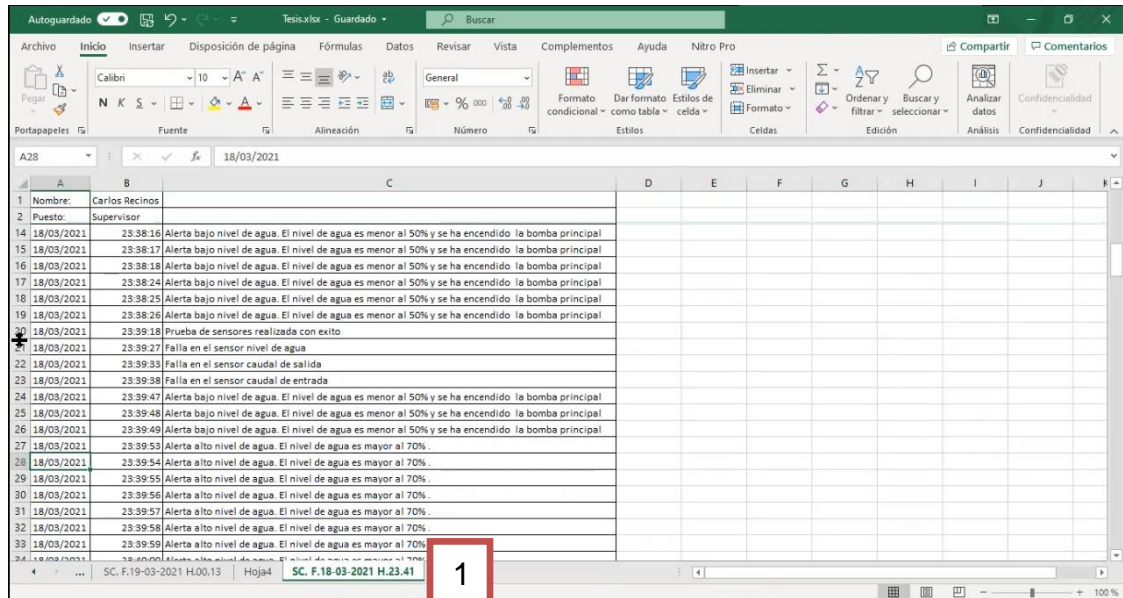
Figura 52. **Paro de emergencia en panel para el monitoreo del nivel de agua**



Fuente: elaboración propia, realizado con LabVIEW 2020 SP1.

Otra de las funciones que proporciona el panel de control para el nivel de agua, es la generación de un reporte al momento en el que el operador o supervisor presionan el botón del panel “generar reporte”, este es capaz de registrar los eventos que suceden en el panel, así también la hora, fecha, nombre de la persona encargada y puesto que desempeña. Este reporte es generado en una hoja de cálculo de Excel.

Figura 53. **Reporte de eventos generado por el sistema de control del nivel de agua**



A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Nombre:	Carlos Recinos							
2	Puesto:	Supervisor							
14	18/03/2021	23:38:16	Alerta bajo nivel de agua. El nivel de agua es menor al 50% y se ha encendido la bomba principal.						
15	18/03/2021	23:38:17	Alerta bajo nivel de agua. El nivel de agua es menor al 50% y se ha encendido la bomba principal.						
16	18/03/2021	23:38:18	Alerta bajo nivel de agua. El nivel de agua es menor al 50% y se ha encendido la bomba principal.						
17	18/03/2021	23:38:24	Alerta bajo nivel de agua. El nivel de agua es menor al 50% y se ha encendido la bomba principal.						
18	18/03/2021	23:38:25	Alerta bajo nivel de agua. El nivel de agua es menor al 50% y se ha encendido la bomba principal.						
19	18/03/2021	23:38:26	Alerta bajo nivel de agua. El nivel de agua es menor al 50% y se ha encendido la bomba principal.						
20	18/03/2021	23:39:18	Prueba de sensores realizada con éxito						
21	18/03/2021	23:39:27	Falla en el sensor nivel de agua						
22	18/03/2021	23:39:33	Falla en el sensor caudal de salida						
23	18/03/2021	23:39:38	Falla en el sensor caudal de entrada						
24	18/03/2021	23:39:47	Alerta bajo nivel de agua. El nivel de agua es menor al 50% y se ha encendido la bomba principal.						
25	18/03/2021	23:39:48	Alerta bajo nivel de agua. El nivel de agua es menor al 50% y se ha encendido la bomba principal.						
26	18/03/2021	23:39:49	Alerta bajo nivel de agua. El nivel de agua es menor al 50% y se ha encendido la bomba principal.						
27	18/03/2021	23:39:53	Alerta alto nivel de agua. El nivel de agua es mayor al 70%.						
28	18/03/2021	23:39:54	Alerta alto nivel de agua. El nivel de agua es mayor al 70%.						
29	18/03/2021	23:39:55	Alerta alto nivel de agua. El nivel de agua es mayor al 70%.						
30	18/03/2021	23:39:56	Alerta alto nivel de agua. El nivel de agua es mayor al 70%.						
31	18/03/2021	23:39:57	Alerta alto nivel de agua. El nivel de agua es mayor al 70%.						
32	18/03/2021	23:39:58	Alerta alto nivel de agua. El nivel de agua es mayor al 70%.						
33	18/03/2021	23:39:59	Alerta alto nivel de agua. El nivel de agua es mayor al 70%.						

Fuente: elaboración propia, realizado con LabVIEW 2020 SP1 y Microsoft Excel.

En la figura anterior se puede apreciar en el 1, el nombre con el cual se guardan las hojas de cálculo del reporte comienza con la inicial del puesto y la inicial del nombre de la persona que generó dicho reporte, este sigue con la fecha y hora en la que fue generado.

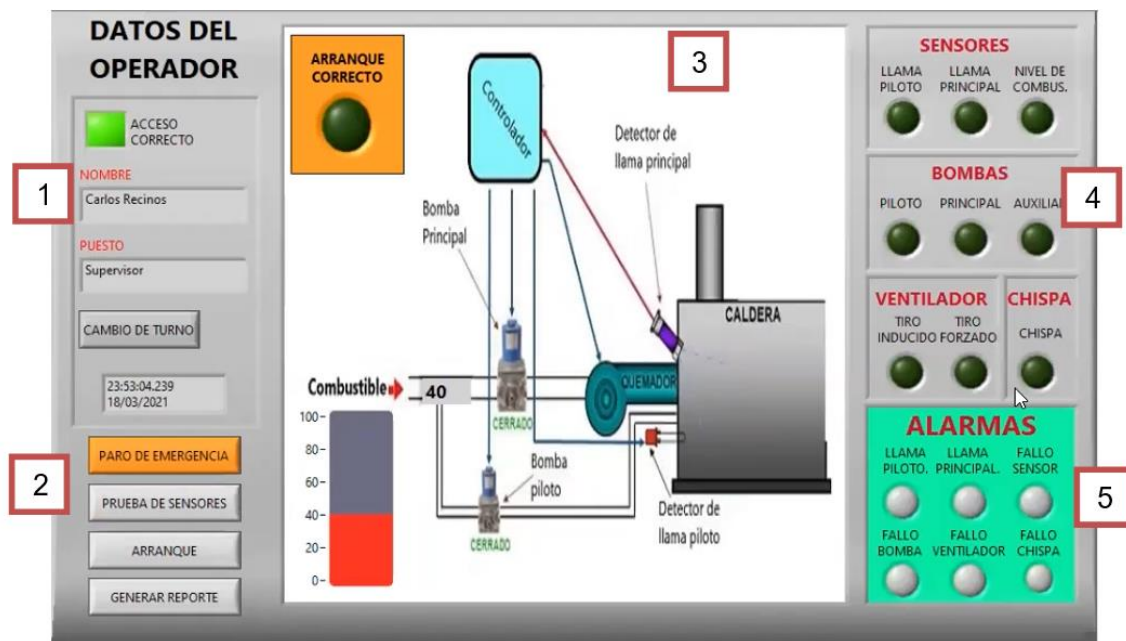
La mejora continua del sistema se facilita con la revisión periódica de los eventos registrados en el sistema, dicha revisión se puede realizar por medio del reporte que se genera al momento en el que se cambia de turno o el operador cierra sesión en el sistema.



#### 4.2.4. Simulación del lazo de control para la detección de llama

Al momento en el que el operador ingresa de manera correcta las credenciales o el supervisor selecciona en el menú la opción de “detector de llama”, serán redirigidos al panel específico para el monitoreo de esta variable.

Figura 54. Panel del sistema de alarmas para el control de la llama



Fuente: elaboración propia, realizado con LabVIEW 2020 SP1.

En la figura anterior se aprecia el panel principal para el control del sistema de alarma del detector de llama. En el 1 se observan las mismas características del panel de la sección 4.2.3.

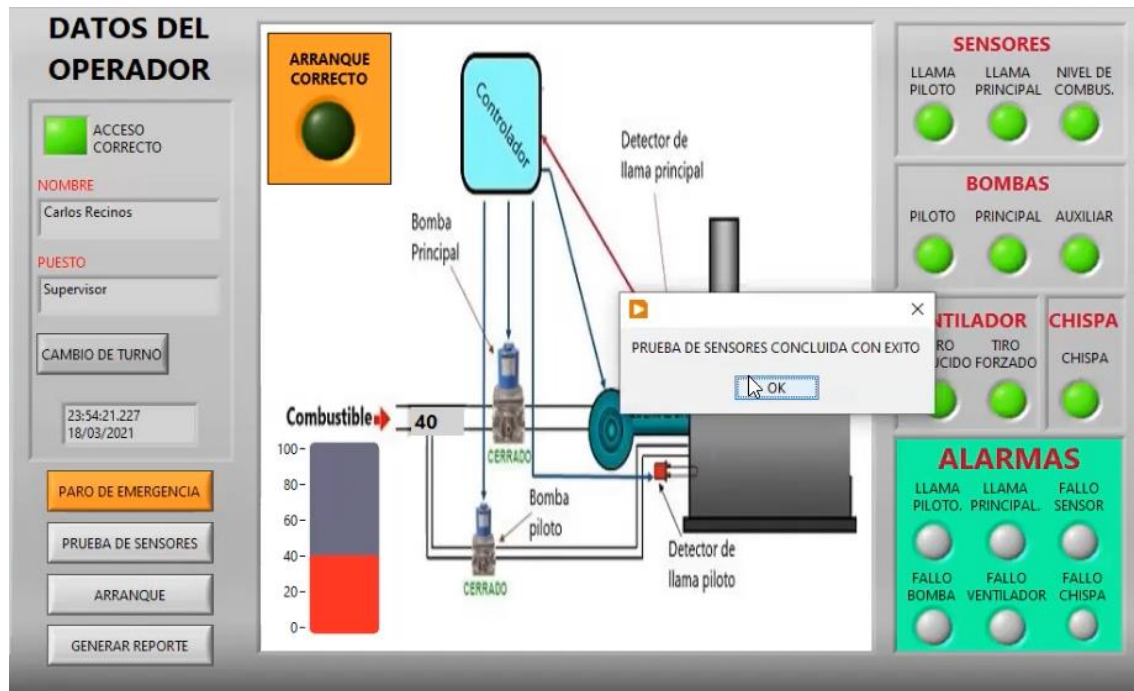
En el 2 se puede observar una variante respecto al panel de la sección anterior, puesto que este panel está diseñado para el control de la llama desde el momento en el que la caldera se arranca, este procedimiento de arranque se explica con detalle en la sección 2.4.2.

Se observa en el 3 de la figura 54, el panel principal y el esquema del funcionamiento del sistema, un nivel de combustible de manera análoga y acompañado de una barra. También se puede apreciar un indicador del arranque correcto de la caldera. En el 4 se encuentran una serie de indicadores visuales tales como bombas, sensores, ventiladores y chispa. Estos son de utilidad porque indican al operador el tipo de componente que falla al momento de presentarse una alarma. Por último, se puede notar en el 5 las alarmas que puede presentar este sistema al momento de que este se encuentre en funcionamiento.

Como primer paso y debido a la alta peligrosidad que representa la combustión en la caldera, se realiza una prueba en los sensores y componentes del sistema, estos para determinar el correcto funcionamiento antes de iniciar el procedimiento de arranque de la caldera. Al momento en el que se está realizando la prueba de sensores, los indicadores led de cada componente parpadean 2 veces, para luego confirmar su funcionamiento con el indicador encendido, esto se da en cada indicador hasta que se muestra un mensaje de confirmación de una prueba de sensores exitosa.



Figura 55. Prueba de sensores del panel de control del detector de llama



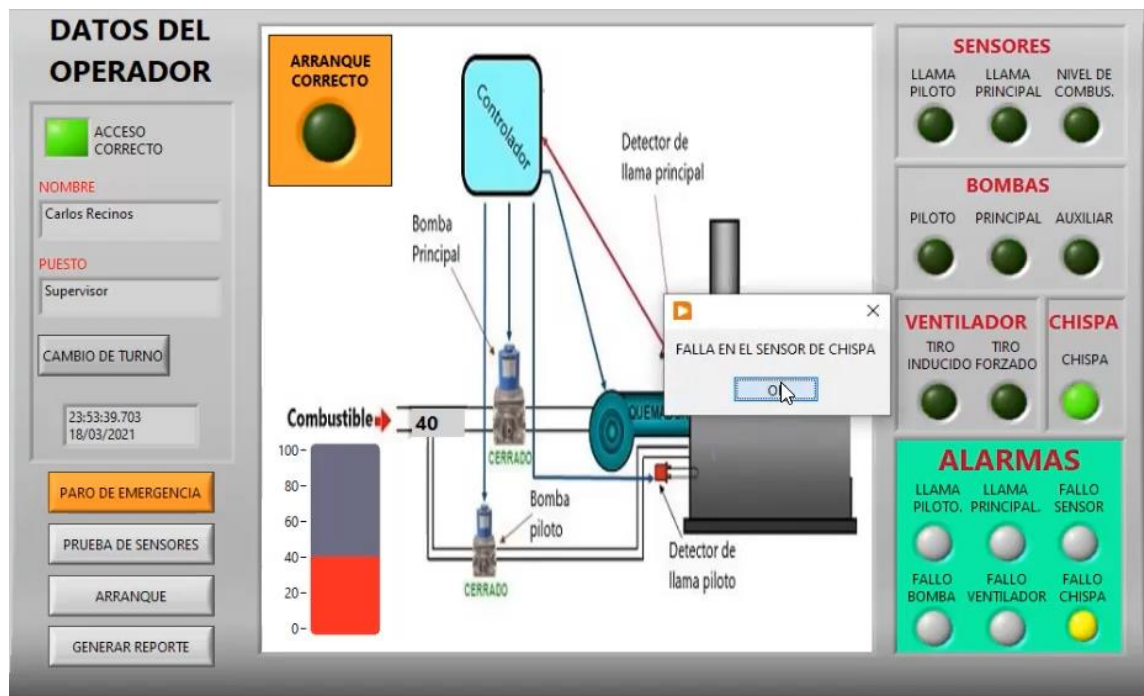
Fuente: elaboración propia, realizado con LabVIEW 2020 SP1.

Si se presenta una falla en un equipo al momento en el que se realiza la prueba de sensores, inmediatamente el sistema alerta al operador por medio de un mensaje de advertencia, adicionalmente se muestra un indicador visual en el área de alarmas donde se puede apreciar el tipo de alarma que se genera. De igual manera en el área de indicadores de equipo se puede apreciar el indicador del equipo que presenta la falla. Esto facilita que el operador encuentre el origen de la alarma provocada por una falla de los componentes. La situación anteriormente mencionada puede apreciarse en la figura 56.

Al momento de corregir la falla que provoco la alarma al momento de correr la prueba de sensores, por seguridad del sistema se debe de correr nuevamente dicha prueba. Con esto se asegura el correcto funcionamiento del equipo o

sensor dañado. Al momento de presentarse una falla en algún sensor o equipo del sistema en el funcionamiento normal de la caldera, se presentará una alarma de manera similar a la anteriormente descrita.

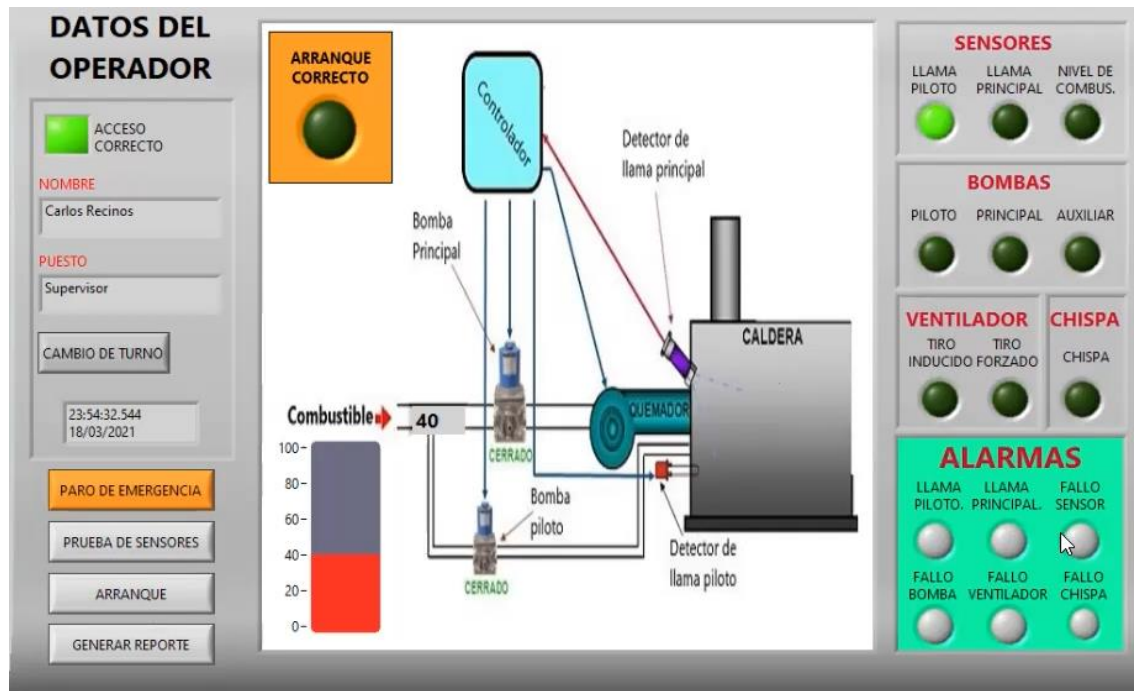
Figura 56. **Falla de equipo al momento de correr la prueba de sensores del panel de control del detector de llama**



Fuente: elaboración propia, realizado con LabVIEW 2020 SP1.

Después de realizada la prueba de sensores con éxito se procede al arranque de la caldera. Inicialmente se activa la bomba de la chispa piloto y la chispa para que se genere la llama piloto. El sensor de llama piloto se iluminará indicando la existencia de esta llama.

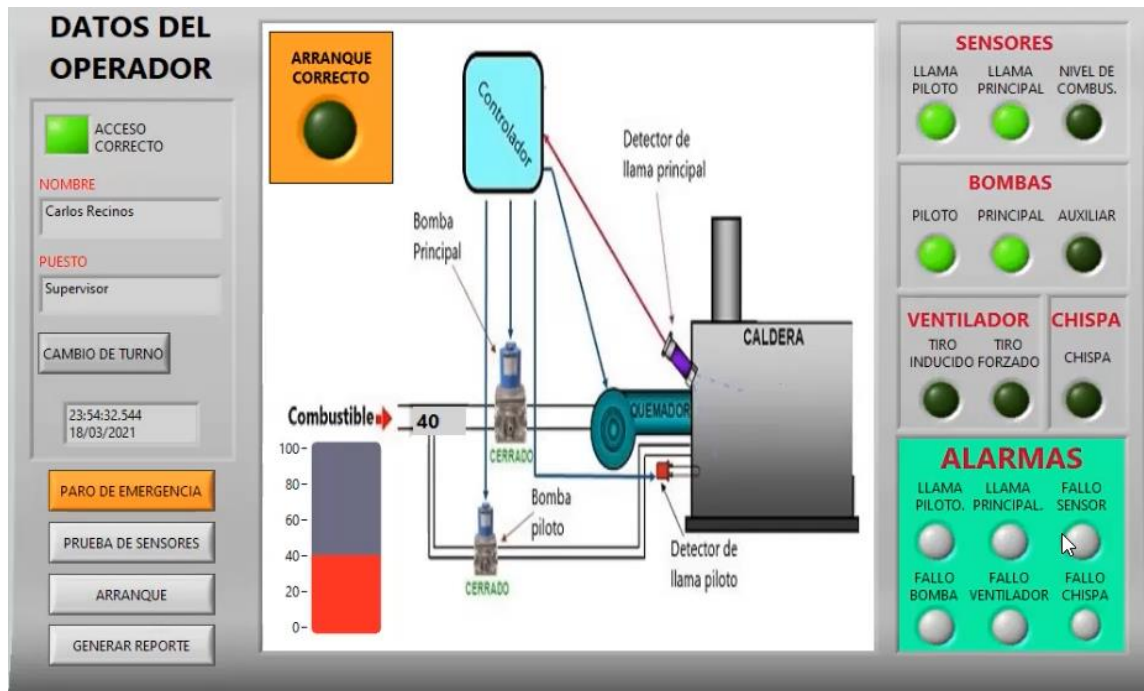
Figura 57. Funcionamiento del detector de llama piloto en panel de control del detector de llama



Fuente: elaboración propia, realizado con LabVIEW 2020 SP1.

Luego de estar encendida la llama piloto, se activa la bomba principal y se enciende la llama principal, estos permanecen encendidos de manera simultánea hasta estabilizar la llama principal. Esto puede apreciarse en la siguiente imagen.

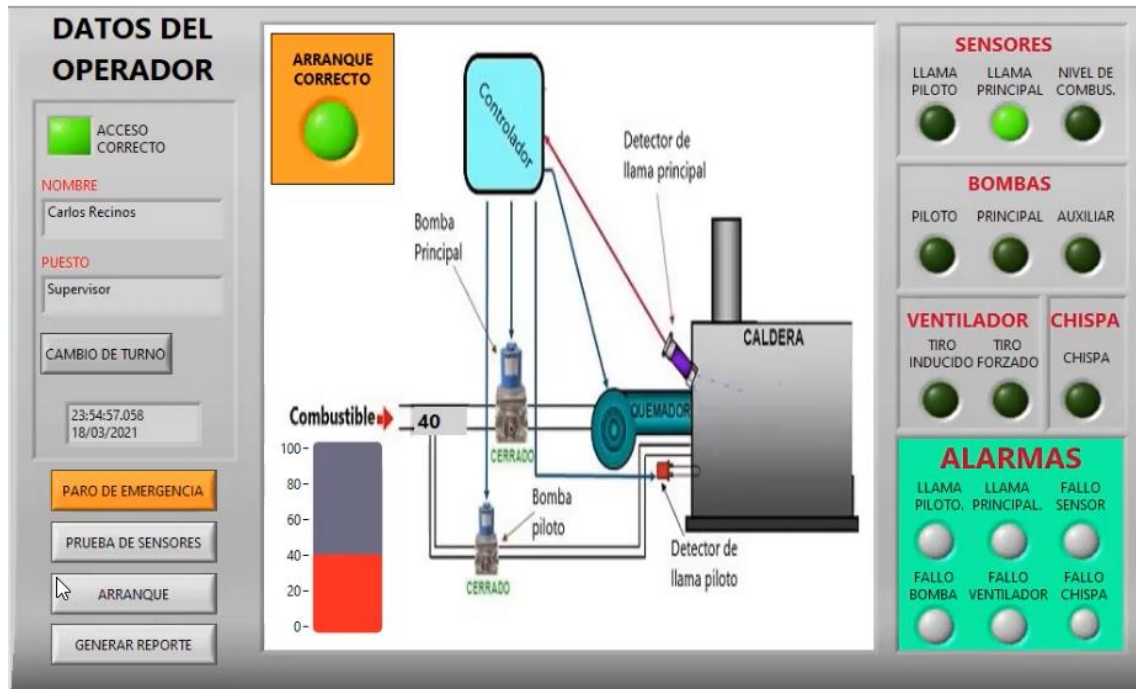
Figura 58. Indicador de encendido de llama principal en panel de control del detector de llama



Fuente: elaboración propia, realizado con LabVIEW 2020 SP1.

Al transcurrir 10 segundos aproximadamente, la llama piloto se apaga y permanece encendida la llama principal. Esto se indica en el led que se encuentra en la parte central del panel de control.

Figura 59. **Indicador de arranque correcto en el panel de control del detector de llama**

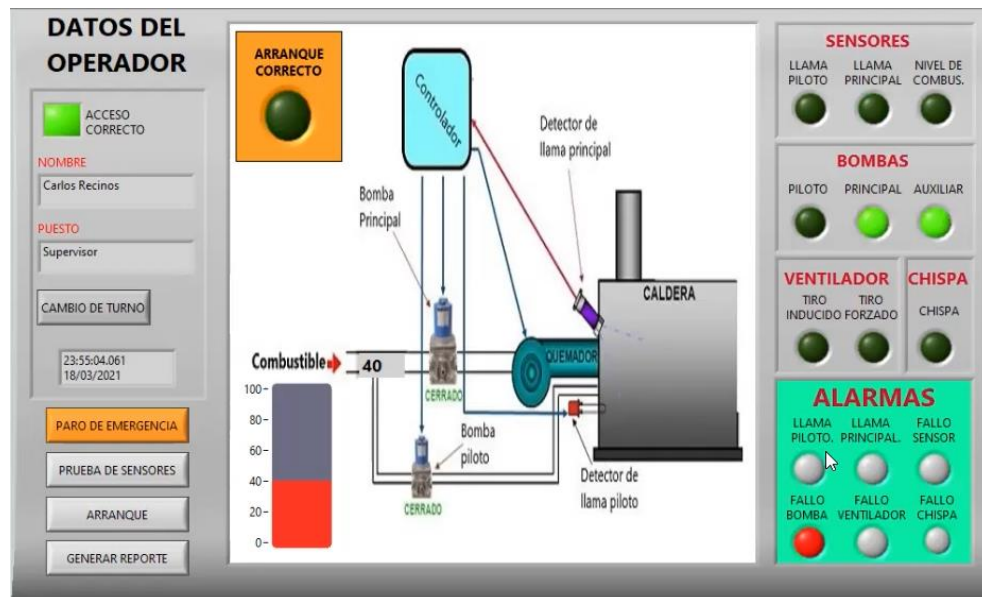


Fuente: elaboración propia, realizado con LabVIEW 2020 SP1.

Si se presenta una falla en la bomba principal o la bomba piloto al momento de realizar el arranque de la caldera, el sistema automáticamente alertará por medio de un indicador visual en el área de alarmas y comenzará a funcionar la bomba auxiliar para compensar la pérdida de una de las bombas, esta situación se presenta en la figura 60.

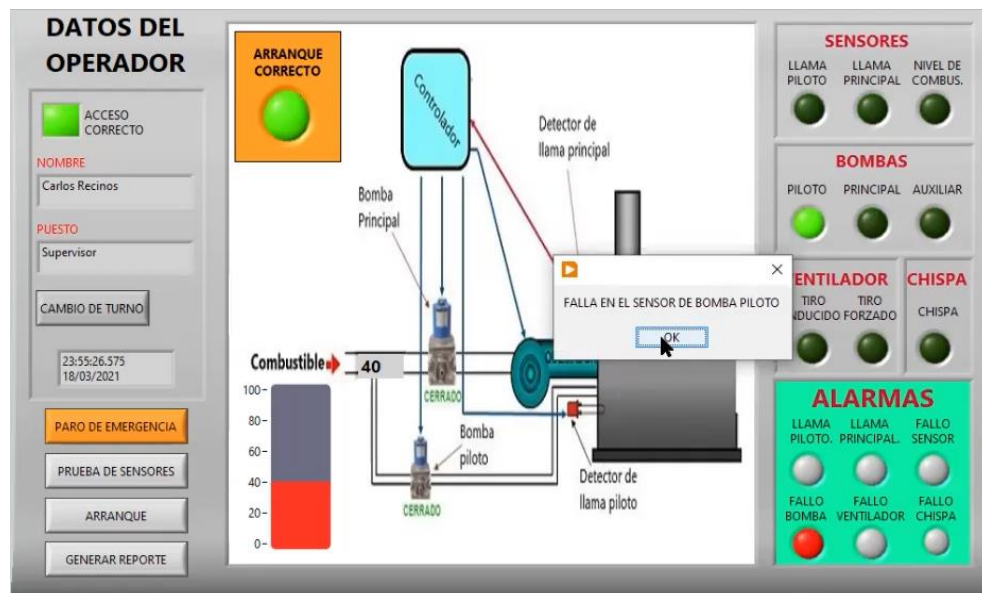
Al momento de concluir el arranque de la caldera de manera correcta, el sistema alertara al operador del fallo por medio de un mensaje de advertencia, el cual puede observarse en la figura 61 y 62.

Figura 60. Indicador de fallo de bomba en el arranque de la caldera



Fuente: elaboración propia, realizado con LabVIEW 2020 SP1.

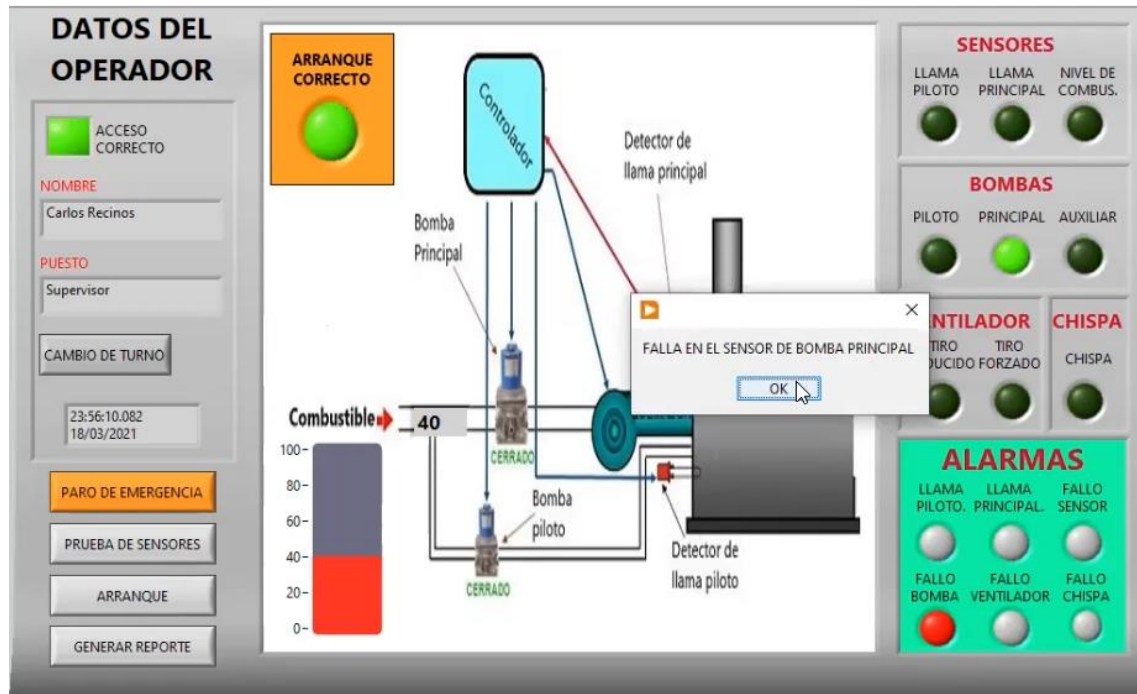
Figura 61. Mensaje de fallo de bomba piloto en el arranque de la caldera



Fuente: elaboración propia, realizado con LabVIEW 2020 SP1.



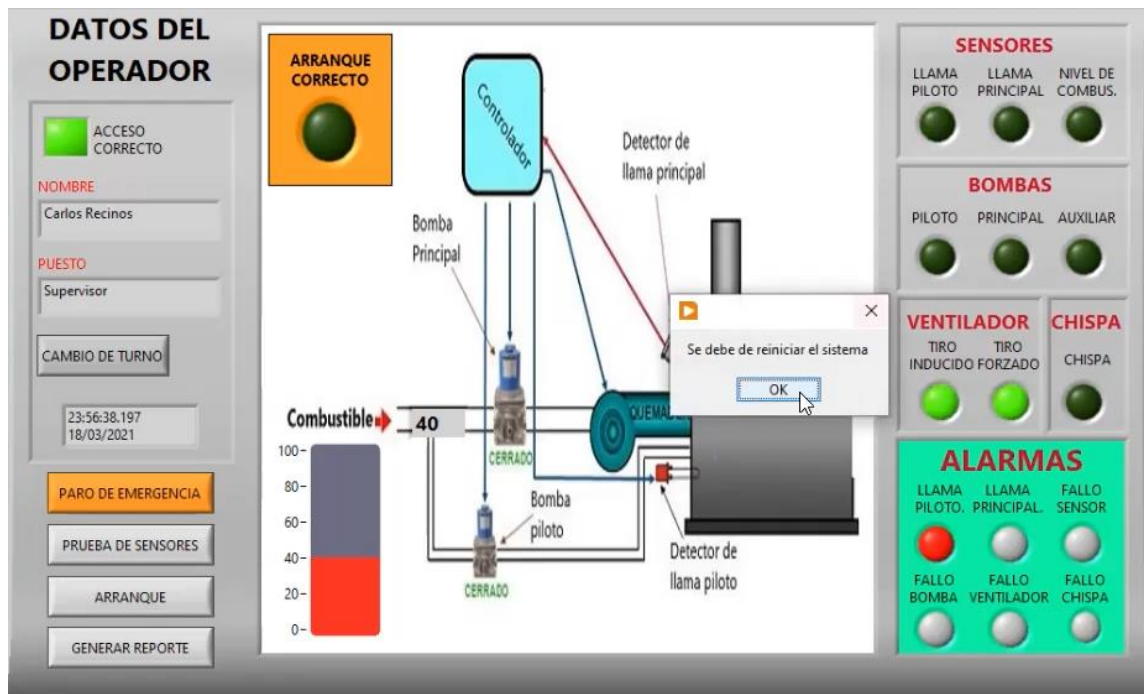
Figura 62. Mensaje de fallo de bomba principal en el arranque de la caldera



Fuente: elaboración propia, realizado con LabVIEW 2020 SP1.

Otra de las situaciones de fallo que pueden presentarse al momento en el que se arranca la caldera, se da al momento en el que la llama piloto no es detectada o esta no se enciende. El sistema arroja un mensaje de advertencia indicando que se debe de reiniciar el arranque, al mismo tiempo se presenta un indicador visual de la alarma que se presenta y se indica por medio de ledes el funcionamiento de los ventiladores, esto con fin de barrer con los inquemados que pudieron quedar en el hogar. Se finaliza por confirmar la falla en la llama piloto con otro mensaje de advertencia en la pantalla. Esta situación puede apreciarse en la figura 63.

Figura 63. Falta de llama piloto en el arranque de la caldera

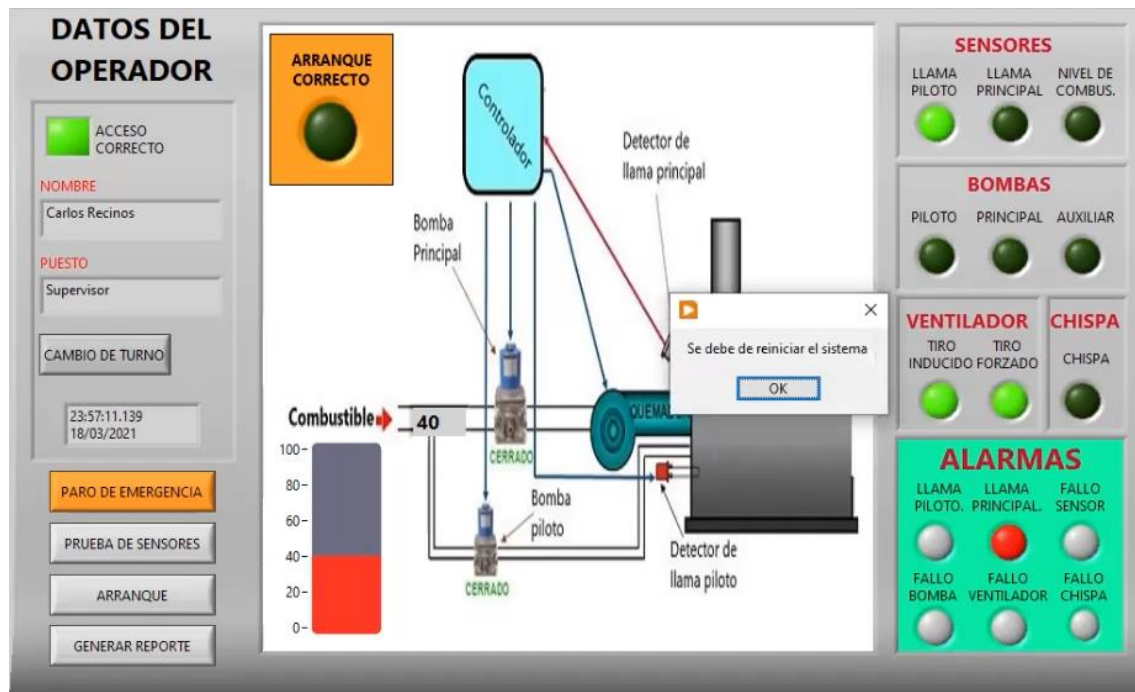


Fuente: elaboración propia, realizado con LabVIEW 2020 SP1.

Situación anteriormente descrita puede darse al momento del arranque con la llama principal, de igual manera el sistema alerta al operador de lo ocurrido, automáticamente se activan los ventiladores, el indicador de alarma y se advierte con un mensaje al operador. Esto puede presentarse de manera similar al momento en el que la caldera se encuentre en pleno funcionamiento, puesto que la llama puede perderse y se genera una alarma para que el operario revise las razones por las cuales se pierde la llama.



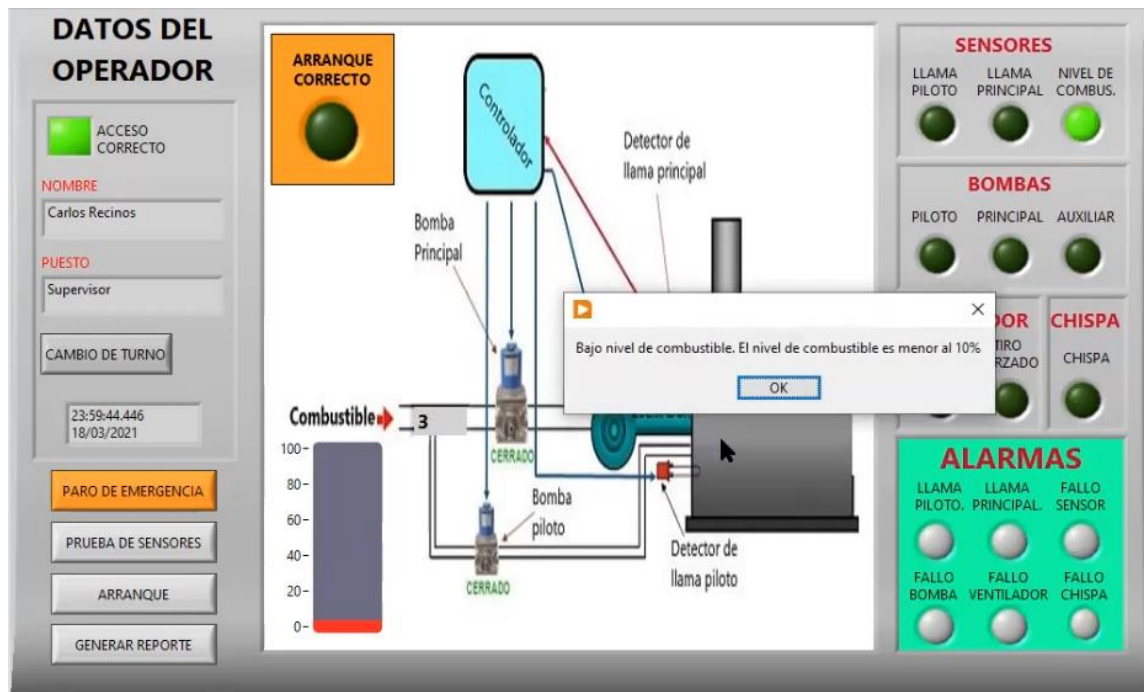
Figura 64. Falta de llama principal en el hogar



Fuente: elaboración propia, realizado con LabVIEW 2020 SP1.

Otra de las variables que se considera en este sistema, es el nivel de combustible, esto para que el operador pueda calcular la cantidad de arranques que puede realizar con el combustible que se encuentra en el depósito. Al momento en el que el nivel de combustible es menor al 20 % del nivel total, el sistema inicia parpadeando el led indicador de bajo nivel de combustible. Si esta situación no se corrige y el nivel de combustible es menor al 10% del nivel total, el sistema automáticamente genera una alarma con un mensaje de advertencia para el operador para que se corrija de inmediatamente dicha descompensación.

Figura 65. **Bajo nivel de combustible en los depósitos**

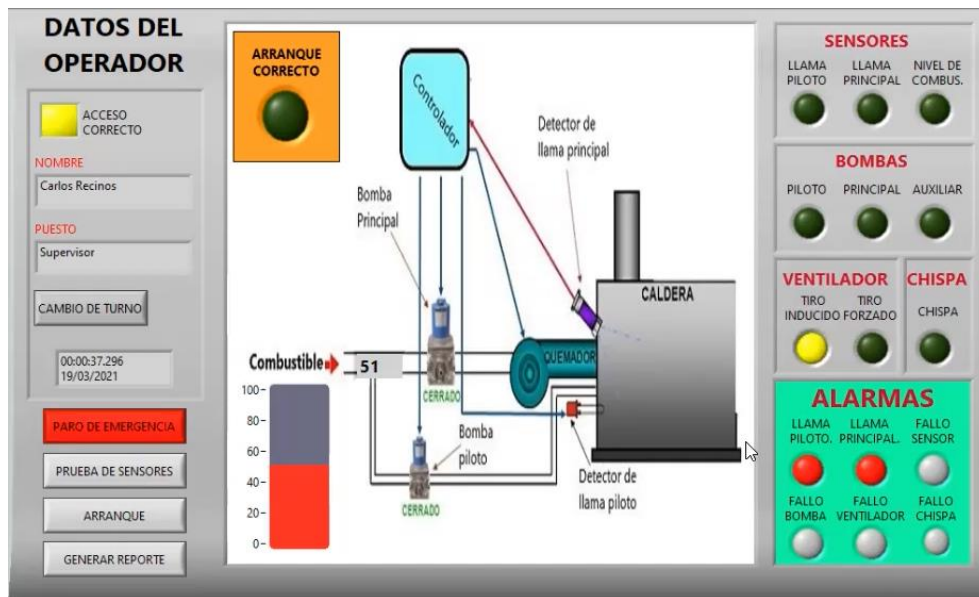


Fuente: elaboración propia, realizado con LabVIEW 2020 SP1.

Al momento de generarse un paro de emergencia en el sistema de detección de llama, se apaga de manera inmediata la llama principal, se observa el indicador del ventilador inducido al realizar un barrido de los inquemados en el hogar. Esto puede apreciarse de mejor manera en la figura 66.

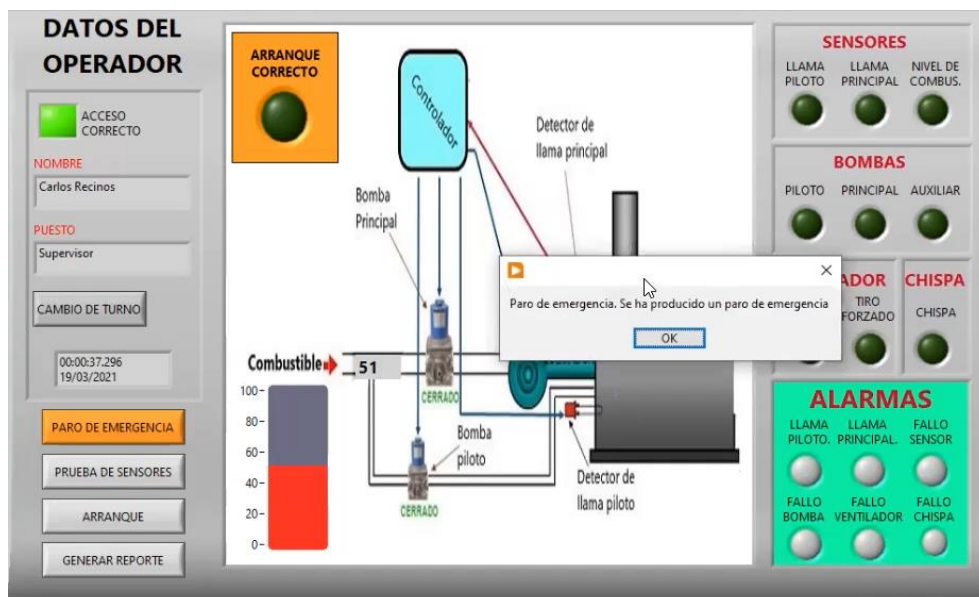
Por último, se presenta un mensaje de advertencia que indica el paro de emergencia que se acaba de realizar en la caldera.

Figura 66. Barrido de inquemados en paro de emergencia



Fuente: elaboración propia, realizado con LabVIEW 2020 SP1.

Figura 67. Mensaje de advertencia del paro de emergencia



Fuente: elaboración propia, realizado con LabVIEW 2020 SP1.

Otra de las funciones que proporciona el panel de control para la detección de llama, es la generación de un reporte al momento en el que el operador o supervisor presionan el botón del panel “generar reporte”, este funciona de la misma manera en que lo hace el reporte del panel anterior. Este reporte puede apreciarse en la figura 68.

**Figura 68. Reporte de eventos generado por el sistema de control del detector de llama**

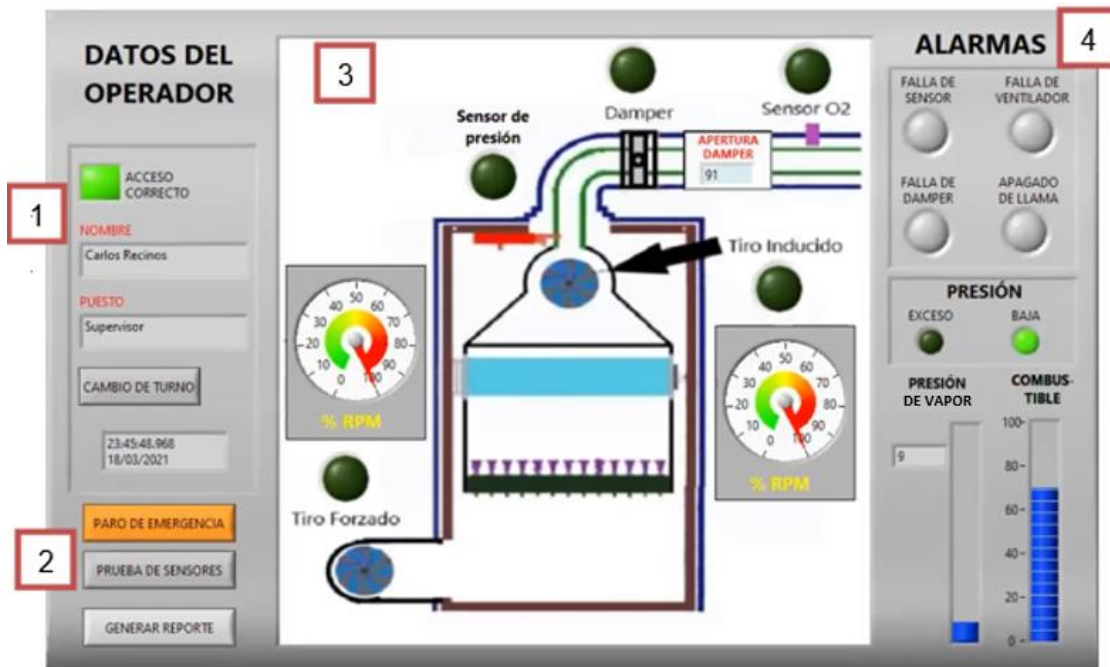
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Nombre:	Carlos Recinos										
2	Puesto:	Supervisor										
3	18/03/2021	23:53:40	FALLA EN EL SENSOR DE CHISPA									
4	18/03/2021	23:54:22	PRUEBA DE SENSORES CONCLUIDA CON EXITO									
5	18/03/2021	23:54:53	Arranque concluido correctamente									
6	18/03/2021	23:55:12	Arranque. Ha fallado la bomba piloto y se ha activado la bomba auxiliar									
7	18/03/2021	23:55:26	Arranque concluido correctamente									
8	18/03/2021	23:55:27	FALLA EN EL SENSOR DE BOMBA PILOTO									
9	18/03/2021	23:55:56	Arranque. Ha fallado la bomba principal y se ha activado la bomba auxiliar									
10	18/03/2021	23:56:09	Arranque concluido correctamente									
11	18/03/2021	23:56:11	FALLA EN EL SENSOR DE BOMBA PRINCIPAL									
12	18/03/2021	23:56:59	Arranque fallido. Se apago repentinamente la llama piloto									
13	18/03/2021	23:57:01	FALLA EN EL SENSOR DE LLAMA PILOTO									
14	18/03/2021	23:57:36	Arranque fallido. Se apago repentinamente la llama principal									
15	18/03/2021	23:57:37	FALLA EN EL SENSOR DE LLAMA PRINCIPAL									
16	18/03/2021	23:57:50	FALLA EN EL SENSOR DE LLAMA PILOTO									
17	18/03/2021	23:57:57	FALLA EN EL SENSOR DE LLAMA PRINCIPAL									
18	18/03/2021	23:58:05	FALLA EN EL SENSOR DE NIVEL DE COMBUSTIBLE									
19	18/03/2021	23:58:15	FALLA EN EL SENSOR DE BOMBA PILOTO									
20	18/03/2021	23:58:25	FALLA EN EL SENSOR DE BOMBA PRINCIPAL									
21	18/03/2021	23:58:34	FALLA EN EL SENSOR DE BOMBA AUXILIAR									
22	18/03/2021	23:58:43	FALLA EN EL SENSOR DE VENTILADOR DE TIRO FORZADO									
23	18/03/2021	23:58:44	FALLA EN EL SENSOR DE VENTILADOR DE TIRO FORZADO									

Fuente: elaboración propia, realizado con LabVIEW 2020 SP1 y Microsoft Excel.

#### 4.2.5. Simulación del lazo de control para el control de la presión de vapor

Al momento en que el operador ingresa de manera correcta las credenciales o el supervisor selecciona en el menú la opción de “presión de vapor”, serán redirigidos al panel específico para el monitoreo de esta variable.

Figura 69. Panel del sistema de alarmas para el control de la presión de vapor



Fuente: elaboración propia, realizado con LabVIEW 2020 SP1.

En la figura anterior se aprecia el panel principal para el control del sistema de alarma. En el 1 y 2 se observan las mismas características del panel de la sección 4.2.3.

En el 3 se encuentra el sistema que se monitorea en ese momento, en este caso es el sistema de control de la presión de vapor, se observa el monitoreo en

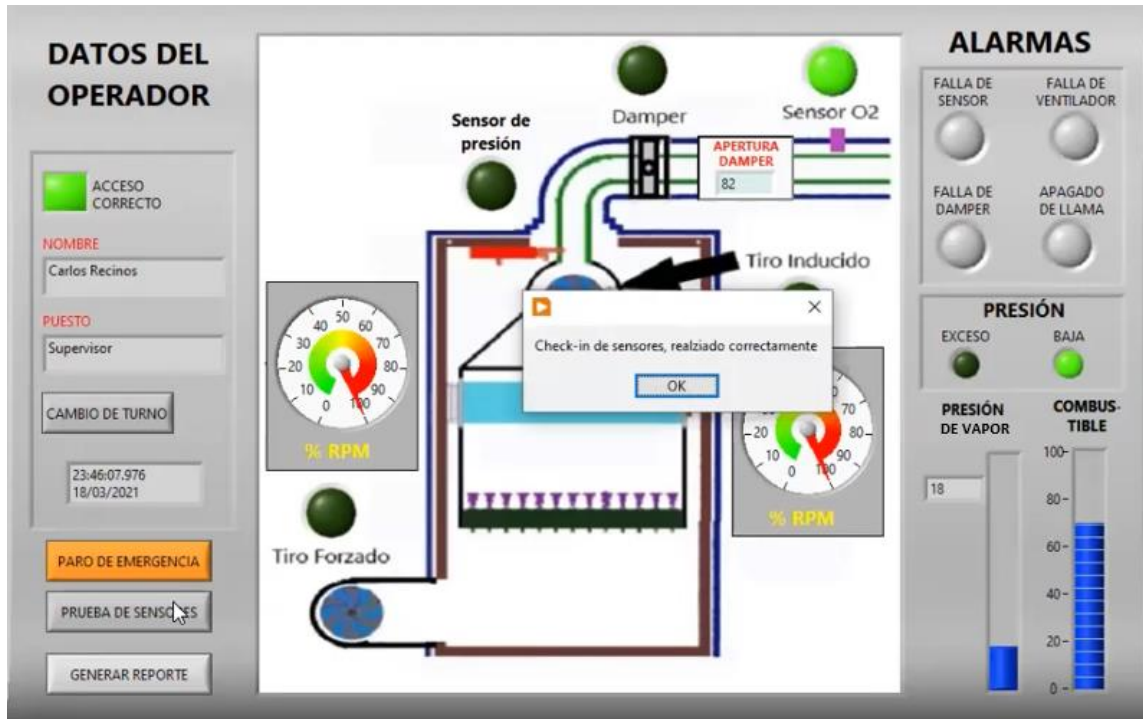
tiempo real la velocidad de cada uno de los ventiladores y el porcentaje de apertura de los dampers, el funcionamiento de estos se indica por medio de un led en la parte superior, por último, se encuentran los ledes indicadores para los sensores que trabajan en el sistema.

En el 4, inicialmente se encuentran los indicadores de las diferentes alarmas que se pueden generar en el sistema, en la parte media se observa un indicador visual de sobrepresión o de baja presión de vapor, en la parte inferior se puede apreciar los indicadores de la presión de vapor y la cantidad de combustible que los inyectores están aportando al hogar.

Como se menciona en la sección 2.4.3 el sistema de alarma para el control de la presión de vapor tendrá una alarma para sobre presiones y una para indicar baja presión en el sistema, cada una de ellas el sistema las compensará de la manera recomendada.

Como función principal para iniciar con el monitoreo adecuado de los parámetros, es recomendable realizar una prueba de los sensores que se encuentran en el sistema para el control de la presión, con esto se asegurara el operador del buen funcionamiento de estos. Se indicará que está corriendo la prueba de sensores al momento en el que se enciende un led para cada sensor y al finalizar la prueba arrojará un mensaje con el cual se confirma el buen funcionamiento de los sensores. Esto se aprecia en la siguiente figura.

Figura 70. Prueba de sensores del panel de control de la presión de vapor

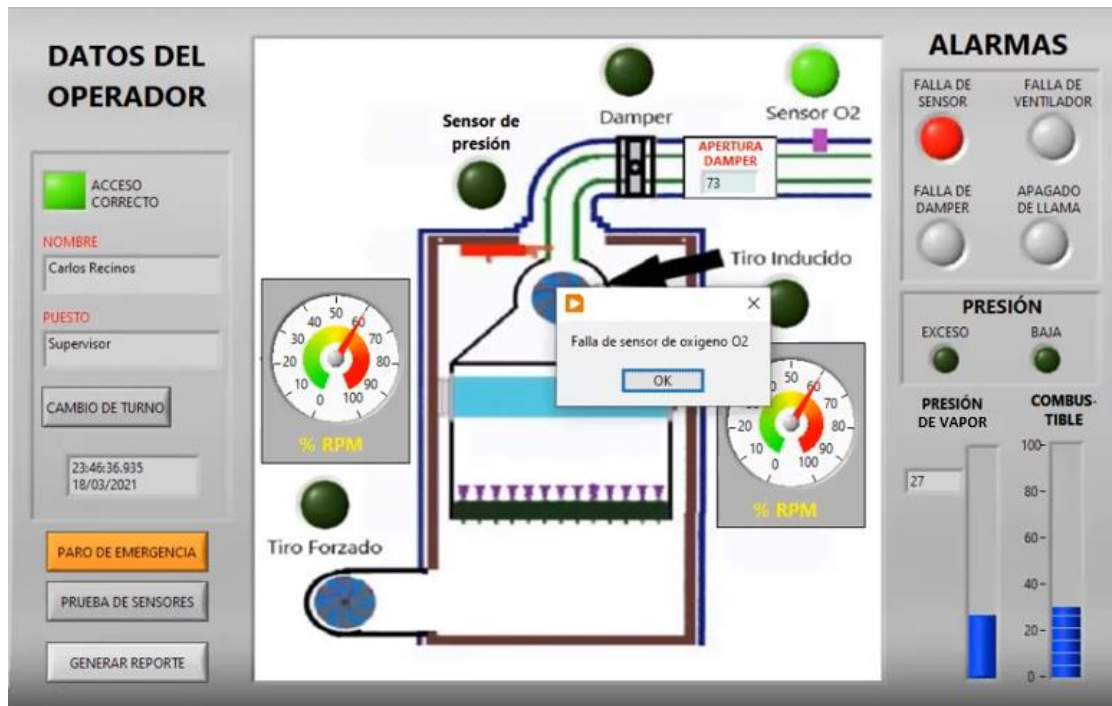


Fuente: elaboración propia, realizado con LabVIEW 2020 SP1.

Al momento en el que la prueba de sensores está siendo corrida y uno de estos se encuentra en mal estado o el sistema no es capaz de reconocerlo, el sistema arrojará una alarma en el panel y se indica de manera visual que sensor no está funcionando, también se muestra un mensaje de advertencia que indica la falta de un sensor y el nombre de este. Al momento de verificar el funcionamiento del sensor, se confirma su funcionamiento correcto en el mensaje de advertencia y esto permitirá seguir con el monitoreo normal del sistema.



Figura 71. **Falla de sensor en prueba de sensores del sistema de control de presión de vapor**

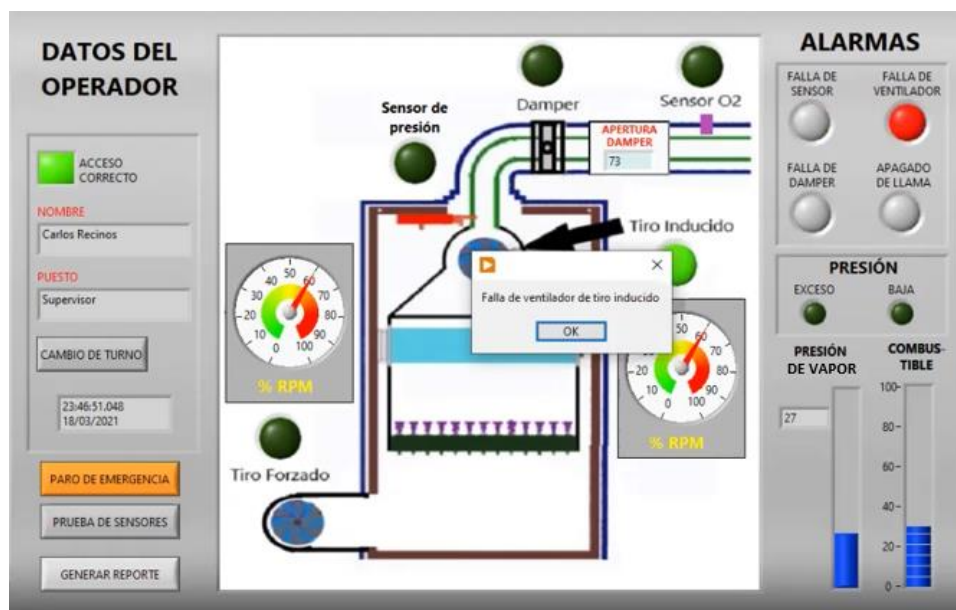


Fuente: elaboración propia, realizado con LabVIEW 2020 SP1.

La alarma anterior se comporta de la misma manera si los ventiladores o el dámper fallan por una u otra razón. Estas alarmas se pueden observar en las imágenes siguientes.

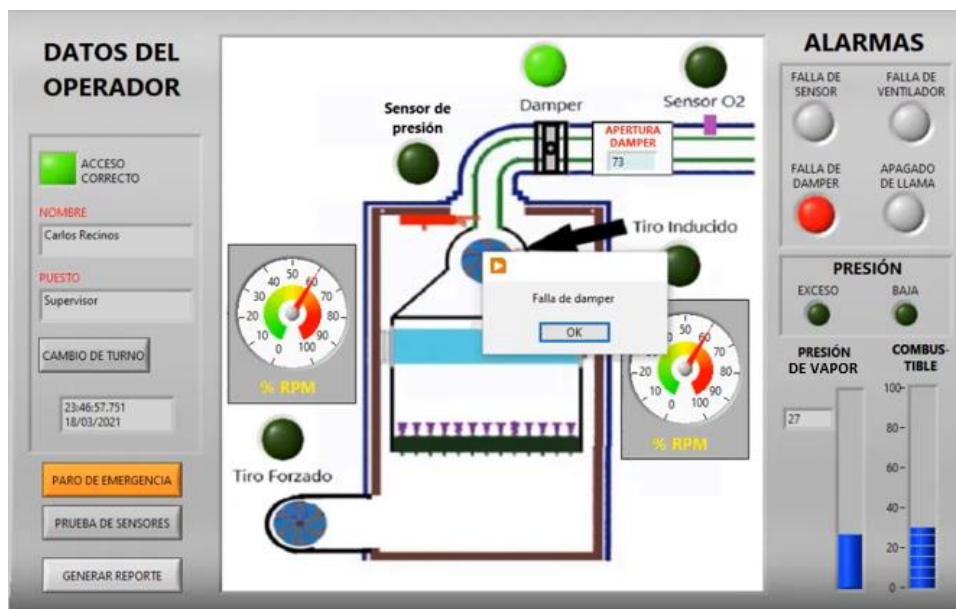


Figura 72. **Falla de ventilador en el sistema de control de presión de vapor**



Fuente: elaboración propia, realizado con LabVIEW 2020 SP1.

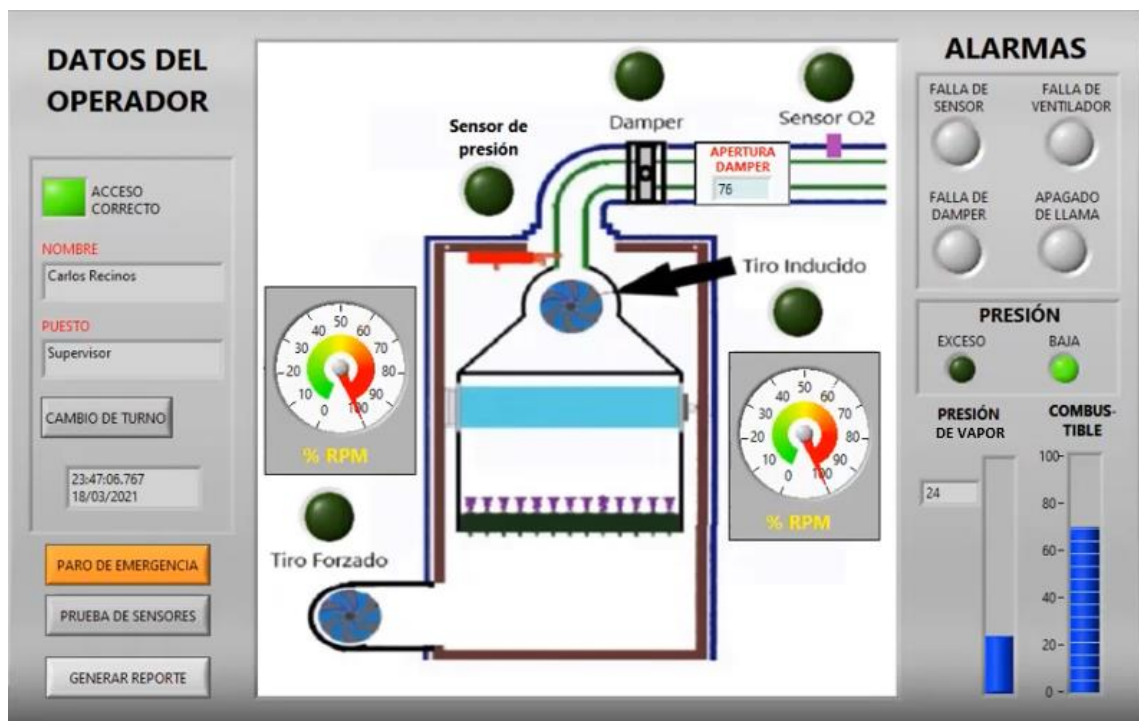
Figura 73. **Falla de dámper en el sistema de control de presión de vapor**



Fuente: elaboración propia, realizado con LabVIEW 2020 SP1.

Una situación de alarma que puede presentarse en el sistema para el control de la presión de vapor es cuando la presión desciende. Cuando esta presión llega un valor inferior al 25 % de presión recomendada por el fabricante, el sistema aumenta el aporte calorífico, esto con el fin de aumentar la presión de vapor. Esto se puede apreciar en la siguiente imagen, donde la velocidad de los ventiladores aumenta, al igual que la apertura en el dámper y el aporte de combustible, esto acompañado de un indicador visual de la situación que est  siendo registrada en ese momento.

Figura 74. Descenso de presión de vapor menor al 25 %

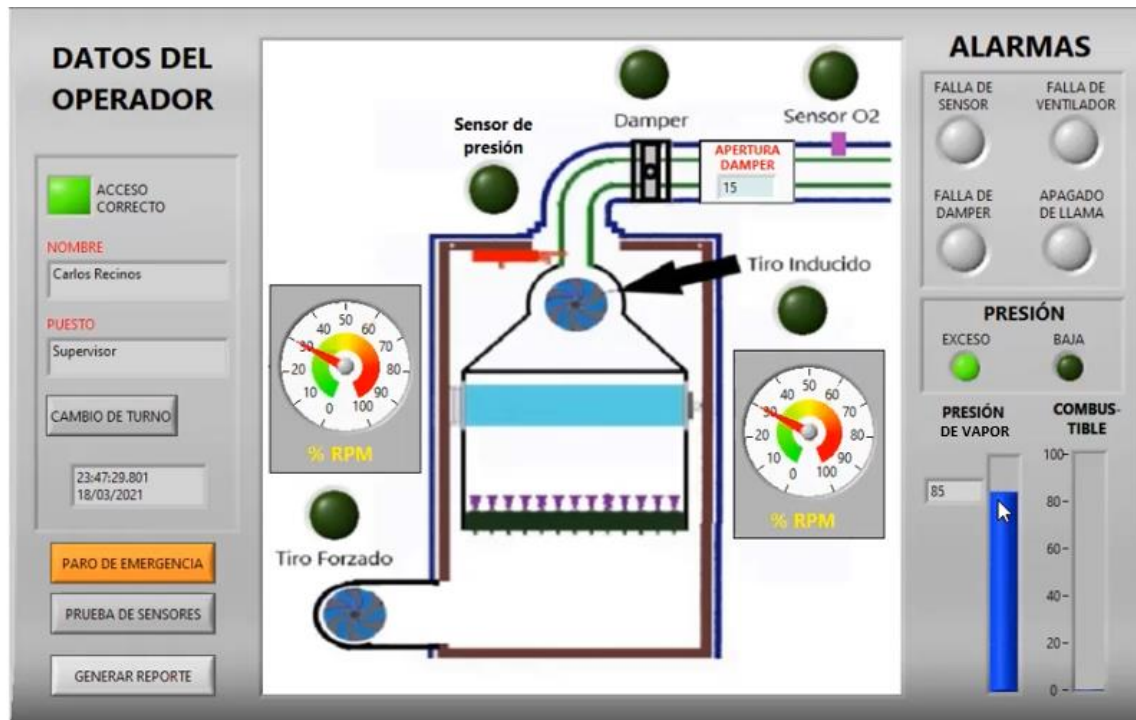


Fuente: elaboración propia, realizado con LabVIEW 2020 SP1.

Situación contraria se da al momento en el que la presión aumenta de manera descontrolada, si esta presión sobrepasa el 85 % de la presión recomendada por el fabricante, el sistema comienza con la reducción de la

velocidad de los ventiladores y cierre de dámper, del mismo modo se emite una alerta de manera visual por medio de un led.

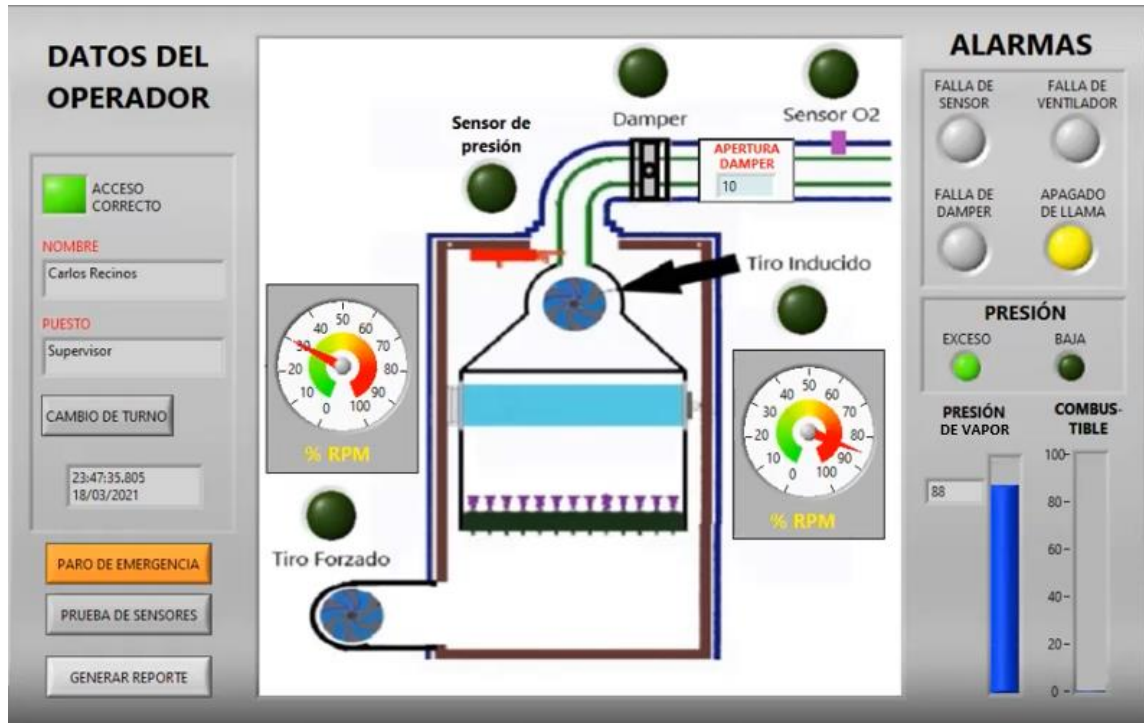
Figura 75. Aumento de presión de vapor mayor al 85 %



Fuente: elaboración propia, realizado con LabVIEW 2020 SP1.

Si dicha presión excede el 90 %, el sistema automáticamente apaga la llama reduciendo a cero el aporte de calor y combustible, posterior a esto realiza un barrido de los inquemados del hogar. También se apaga el ventilador del tiro forzado y se emite una alarma de manera visual.

Figura 76. Aumento de presión de vapor mayor al 90 %

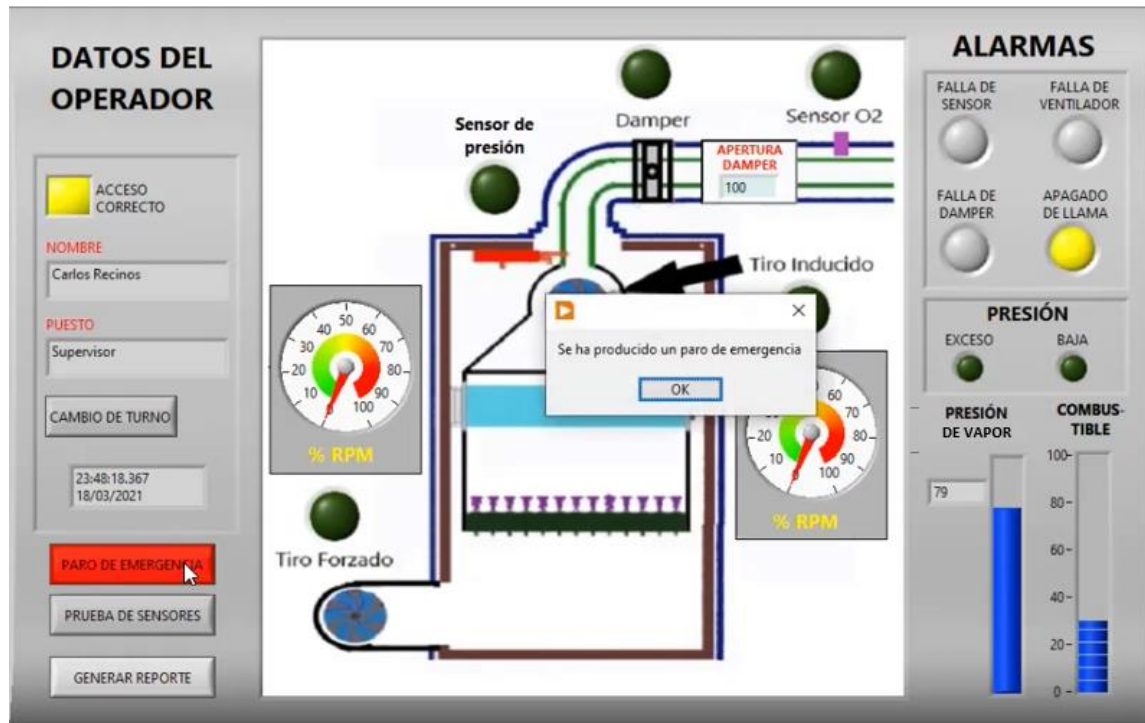


Fuente: elaboración propia, realizado con LabVIEW 2020 SP1.

Después de corregir la alarma, el sistema se regula de manera automática hasta encontrar el equilibrio nuevamente por medio de la variación de la velocidad de los ventiladores.

Si el operador del sistema para el monitoreo de la presión de vapor considera presionar el botón de paro de emergencia por cualquier situación que él crea relevante, el sistema informara sobre el paro de emergencia por medio de un mensaje en la pantalla y una intermitencia en el led de acceso correcto, esto para confirmar dicho paro.

Figura 77. **Paro de emergencia en panel para el monitoreo de la presión de vapor**



Fuente: elaboración propia, realizado con LabVIEW 2020 SP1.

Otra de las funciones que proporciona el panel de control para la presión de vapor, es la generación de un reporte al momento en el que el operador o supervisor presionan el botón del panel “generar reporte”, este funciona de la misma manera en que lo hacen los reportes de los paneles anteriores. Estos reportes le otorgan una confiabilidad mayor al sistema, puesto que se tendrá la evidencia necesaria sobre el comportamiento del sistema al momento de realizar una mejora.



**Figura 78. Reporte de eventos generado por el sistema de control de la presión de vapor**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
91	18/03/2021	23:47:26	Baja presión. El ventilador de tiro forzado y tiro inducido trabajan al 100% de su velocidad nominal							
92	18/03/2021	23:47:26	Baja presión. El nivel de combustible se reduce al 70%							
93	18/03/2021	23:47:27	Baja presión. La presión es menor al 25%							
94	18/03/2021	23:47:27	Baja presión. El ventilador de tiro forzado y tiro inducido trabajan al 100% de su velocidad nominal							
95	18/03/2021	23:47:27	Baja presión. El nivel de combustible se reduce al 70%							
96	18/03/2021	23:47:30	Sobre presión. La presión es mayor al 80%							
97	18/03/2021	23:47:30	Sobre presión. El ventilador de tiro forzado y tiro inducido trabajan al 30% de su velocidad nominal							
98	18/03/2021	23:47:30	Sobre presión. El nivel de combustible se reduce a 0%							
99	18/03/2021	23:47:31	Sobre presión. La presión es mayor al 80%							
100	18/03/2021	23:47:31	Sobre presión. El ventilador de tiro forzado y tiro inducido trabajan al 30% de su velocidad nominal							
101	18/03/2021	23:47:31	Sobre presión. El nivel de combustible se reduce a 0%							
102	18/03/2021	23:47:32	Sobre presión. La presión es mayor al 80%							
103	18/03/2021	23:47:32	Sobre presión. El ventilador de tiro forzado y tiro inducido trabajan al 30% de su velocidad nominal							
104	18/03/2021	23:47:32	Sobre presión. El nivel de combustible se reduce a 0%							
105	18/03/2021	23:47:33	Sobre presión. La presión es mayor al 80%							
106	18/03/2021	23:47:33	Sobre presión. El ventilador de tiro forzado y tiro inducido trabajan al 30% de su velocidad nominal							
107	18/03/2021	23:47:33	Sobre presión. El nivel de combustible se reduce a 0%							
108	18/03/2021	23:47:34	Sobre presión. La presión es mayor al 80%							
109	18/03/2021	23:47:34	Sobre presión. El ventilador de tiro forzado y tiro inducido trabajan al 30% de su velocidad nominal							
110	18/03/2021	23:47:34	Sobre presión. El nivel de combustible se reduce a 0%							
111	18/03/2021	23:47:35	Sobre presión. El sistema no se regula automáticamente después de un tiempo							
112	18/03/2021	23:47:35	Sobre presión. La presión es mayor al 80%							

Fuente: elaboración propia, realizado con LabVIEW 2020 SP1.

#### 4.2.6. Aplicación de la norma IEC 62682 en las simulaciones del sistema de alarma

Desde ya se tiene claro que el sistema de alarma es utilizado para notificar al operador de condiciones anormales en el equipo o proceso al cual se desea vigilar permanentemente. Estos sistemas no solo intentan lograr un funcionamiento seguro en condiciones normales, sino que también son capaces de responder de manera oportuna a situaciones de emergencia. Por tanto, el diseño cuidadoso y sistemático de estos sistemas es muy importante para lograr el funcionamiento seguro y eficaz de la caldera de vapor, esto también aumentará la competitividad de la empresa, debido a la reducción de las posibles fallas críticas que puedan suceder en la caldera.

Para optimizar los sistemas de manejo de las alarmas en el año 2013 fue creada la norma IEC 62682 basada en la norma ISA 18.2 creada en el 2009 y titulada como *Mantenimiento de Sistemas de Alarma para Procesos Industriales*. El origen de estas normas surge de la necesidad de tener una guía para el diseño y gestión de los sistemas de alarma.

Una alarma es una señal audible y visible que le indica al técnico operador que el equipo está funcionando de manera incorrecta, que el proceso se ha desviado de su funcionamiento normal o que existe una situación anormal en el sistema al que se debe de responder para regresar los parámetros a su condición de funcionamiento normal.<sup>28</sup>

En otras palabras, una alarma no solo le indica al operador sobre un evento que ocurre en el proceso, sino que también es capaz de requerir que el operador responda para solucionar dicha situación.

El ciclo de diseño del sistema de gestión de alarmas consta de diez pasos iterativos, que se pueden dividir en las siguientes cuatro etapas,<sup>29</sup> con las cuales se evaluara la aplicación de la norma IEC 62682 para las simulaciones realizadas.

#### **4.2.6.1. Optimización del sistema**

En esta etapa, se definieron los principios y requisitos del sistema de gestión de alarmas. Identificar posibles alarmas y su prioridad y registrarlas. En la sección 2.1 se definieron las variables que representan un riesgo latente para el proceso industrial y para el equipo técnico, esto al momento en el que estas variables se encuentren en valores críticos.

---

<sup>28</sup> International Electrical Commission (IEC). *Management of alarms systems for the process industries (IEC 62682)*. p.15.

<sup>29</sup> BASU, Swapan. *Plant hazard analysis and safety instrumentation systems*. p.665.

Diseñar correctamente el sistema, en esta etapa es la clave para evitar una inundación de alarmas, pues las alarmas se emiten para hacer frente a todas las situaciones críticas del proceso. En esta etapa, solo se deben identificar las alarmas indicativas, esto para evitar que generen ruido y distraigan al operador de la alarma de emergencia como podría ser la de falta de agua en el domo de la caldera, falta de llama en el hogar o alta presión de vapor. Si este tipo de alarma no se puede evitar, la norma recomienda mantenerlos como registros simples en el reporte de eventos. Después de reducir el número total de alarmas tanto como sea posible, se deben registrar las acciones recomendadas para restablecer el funcionamiento normal del sistema para cada alarma, en el caso de la simulación el sistema automáticamente se reestablece, en el caso que la alarma sea de un parámetro importante existe un aviso que el calderista debe de atender.

#### **4.2.6.2. Soporte avanzado al operador**

Se debe de evaluar la respuesta con la cual el operador reacciona ante una alarma, la norma nos sugiere la centralización de la totalidad de las alarmas activas, esto se puede visualizar en las diferentes simulaciones, puesto que cada una centraliza las variables críticas de cada uno de los sistemas que es monitoreado. En la pantalla donde se visualizan las alarmas debe de permitir una operación dinámica de la gestión de las alarmas por parte del operador.

Al momento de instalar el sistema de alarmas se debe de evaluar el tiempo de reacción del operador, esto para determinar su velocidad en la toma de decisiones con la ayuda del sistema de alarmas, las decisiones que se tomen serán también parte de la experiencia con la que el calderista actúe, dicha situación es mencionada en la sección 4.2.1.3.



#### 4.2.6.3. Evaluación del sistema

La norma propone los indicadores de desempeño detallados en la figura siguiente:

Figura 79. Indicadores de performance de un sistema de alarmas

Indicador	Valor aceptable	Máx. admitido
Cantidad de alarmas por día	Menor o igual a 144	288
Cantidad de alarmas por hora	Promedio inferior a 6	12
Cantidad de alarmas por minuto	Promedio inferior a 1	2

Fuente: IEC 62682. *Management of alarms systems for the process industries*

Estos parámetros pueden ser monitoreados al momento en el que el sistema es puesto en marcha en la caldera, porque esta información se puede monitorear fácilmente a través del registro de las alarmas que ocurrieron durante el período de evaluación, se puede evaluar el funcionamiento de las alarmas determinando de esta manera si el sistema funciona de manera correcta y se encuentra bien desarrollado. Los registros se pueden encontrar en los reportes generados a lo largo del turno de trabajo.

#### 4.2.6.4. Mejora continua del sistema de alarmas

Después que el sistema de alarmas se encuentre en pleno funcionamiento es necesario realizar un plan de mejora continua del sistema y gestión de las alarmas, esto debido a los cambios dinámicos del proceso y la vida útil de un dispositivo determinado. Al analizar los indicadores propuestos previamente (incluidos los informes periódicos de la fábrica y el análisis de estos informes), dichos planes se pueden implementar como una forma de evaluar el rendimiento del sistema a lo largo del tiempo.

Es importante recordar que la mejora continua del sistema debe de ser uno de los pilares básicos de la empresa, puesto que el sistema de alarmas será el encargado de resguardar el equipo y las vidas de los técnicos encargados del funcionamiento de la caldera. Por tal motivo es importante mencionar que la búsqueda y el afán por parte de la empresa de seguir mejorando el sistema de alarmas, es la única manera de alcanzar la máxima calidad, confiabilidad y excelencia en el proceso industrial. Esto le aportará a la empresa competitividad respecto a otras empresas, debido a la continuidad en el funcionamiento de las máquinas y resguardo de estas.

#### **4.2.7. Análisis de rendimiento**

La optimización del rendimiento de una máquina o planta industrial puede mejorar la disponibilidad, reducir los costos de mantenimiento o incluso evitar fallas en la caldera. En el mundo de hoy, todo gira alrededor de los datos por tal motivo la visualización de estos en el sistema de alarma es importante, porque el técnico encargado del manejo de este parámetro podrá decidir de manera eficaz las acciones correctivas y preventivas antes que suceda un desastre.

Esta visualización de los datos de la caldera crea transparencia sobre el uso, la producción y la disponibilidad. Con esta información, los calderistas pueden ayudar a reducir los costos operativos y aumentar la eficiencia de la producción a través del mantenimiento predictivo.

La eficiencia de una máquina se puede definir como el parámetro entre el rendimiento máximo realizado en un período de tiempo y el rendimiento máximo que el nuevo sistema de automatización instalado en la máquina puede lograr en el mismo período de tiempo, cada uno de los cuales debe dividirse por el

parámetro de eficiencia máxima teórica de la caldera.<sup>30</sup> Estos parámetros deben medirse en la caldera donde se instalará el sistema de alarma, ya que todas las calderas tienen diferentes funciones en términos de rendimiento antes y después de la automatización del sistema de alarma.

En el momento de conocer el valor del rendimiento de la maquinaria antes y después de la automatización podemos comparar los valores con la siguiente tabla.

Tabla X. **Porcentajes de rendimiento en equipos con sistemas de automatización instalados**

<b>Porcentaje</b>	<b>Detalle</b>
<b>Menor al 60 %</b>	Equipos sin sistemas de automatización instalados
<b>60 % - 79 %</b>	Equipos con sistemas básicos de automatización instalados
<b>80 % - 89 %</b>	Equipos con sistemas bien gestionados y muy sencillas
<b>Mayor al 90 %</b>	Equipos instalados específicamente para la mejora de la eficiencia.

Fuente: Tecnología para la Industria. *Aumentar la eficiencia de las máquinas con tres acciones para maximizar la capacidad de producción*. Consulta: 4 de junio 2021.

<https://tecnologiaparalaindustria.com/aumentar-la-eficiencia-de-las-maquinas-con-tres-acciones-para-maximizar-la-capacidad-de-produccion-2/>

Según el análisis con la tabla anterior se puede mencionar que el sistema de alarmas instalado en una caldera sin ningún equipo de automatización que se haya instalado anteriormente, puede obtener una mejora en el porcentaje de

<sup>30</sup> Tecnología para la Industria. *Aumentar la eficiencia de las máquinas con tres acciones para maximizar la capacidad de producción*. Consulta: 4 de junio 2021. <https://tecnologiaparalaindustria.com/aumentar-la-eficiencia-de-las-maquinas-con-tres-acciones-para-maximizar-la-capacidad-de-produccion-2/>

rendimiento, este porcentaje aumentara en proporción con la complejidad que presente dicho sistema. Es importante recalcar que este tipo de mediciones debe de realizarse a cada una de las calderas donde se desee instalar un sistema de alarma, de esta manera se podrán obtener datos reales al momento en el que se realice el cálculo de rendimiento.

#### **4.3. Equipo mecánico de respaldo**

Es importante mencionar que, para una seguridad activa en el funcionamiento de la caldera, es importante utilizar un sistema de respaldo, en dado caso el sistema eléctrico / electrónico falle. Junto con esto se deben de tener diferentes consideraciones extras, como lo pueden ser la sala de calderas porque es la sala donde se ubican estos equipos. Distribuirlos correctamente puede facilitar las operaciones de conducción y mantenimiento de los equipos instalados en el interior, afectando así su seguridad. Es importante que la caldera esté separada de otras instalaciones. Esto logra la división de riesgos y dificulta la entrada de personal ajeno a la operación del equipo.

Otro punto importante para considerar es la correcta ventilación de la habitación donde se encuentra la caldera, porque esta debe estar adecuadamente ventilada. A medida que el aire llega, se obtiene uno de los componentes para que arda el quemador. Sin embargo, además, se evita la formación de atmósferas peligrosas por la posible acumulación de gas y humo.

Para facilitar la conducción y el mantenimiento de la caldera, la habitación debe estar bien iluminada. Sin embargo, como medida de seguridad, el indicador de nivel de líquido y el manómetro deben estar completamente iluminados para que pueda comprobarlos en cualquier momento. En algunos casos, puede haber una fuente de luz separada para iluminar estos dispositivos. Este es otro de los

factores a tomar en cuenta para que en conjunto se obtenga una seguridad robusta en el manejo de la caldera.

Hasta el momento se han descrito una serie de operaciones para garantizar la seguridad, en otras palabras, operaciones de diseño y construcción. Sin embargo, esta seguridad debe seguir garantizándose mediante el funcionamiento normal del equipo en dado caso falle el sistema principal de alarmas. Para ello, es necesario dotarles elementos de seguridad de respaldo, donde la función es prevenir presiones peligrosas. Estos elementos son básicamente indicadores de presión, indicador de temperatura, indicador de nivel de líquido, estos mismos reguladores variables y dispositivos de alivio de presión.

#### **4.3.1. Indicadores de presión**

Para garantizar la seguridad del equipo que contiene un fluido a presión, es importante utilizar un manómetro. En cualquier momento, es importante determinar el valor que se utilizará para la presión, de modo que se puedan tomar las medidas adecuadas si es necesario. En la sección 2.1.2 se pueden encontrar los diferentes tipos de manómetros que pueden ser utilizados en la caldera.

#### **4.3.2. Válvulas de seguridad y válvulas de alivio**

La norma ANSI B95 contiene una larga lista de términos relacionados con las válvulas de seguridad. Este es el dispositivo de seguridad más importante de la caldera y puede ser la última línea de defensa contra explosiones por sobrepresión.

Las válvulas de seguridad y las válvulas de alivio de presión son dispositivos diseñados para evitar sobrepresiones peligrosas, como se describe anteriormente. La principal diferencia entre ellos está en su uso. Las válvulas delanteras son válvulas de seguridad para gas y vapor, mientras las válvulas traseras para líquidos. Esta diferencia se puede ver en la apertura de la válvula, pero cuando se excede la presión de disparo de la válvula, la válvula frontal tiene una apertura completa y la válvula de alivio tiene una apertura proporcional a la presión. La válvula de seguridad tiene una boquilla conectada directamente a la parte receptora de presión, la boquilla está sellada por un disco y recibe fuerza hacia abajo de un resorte. El desequilibrio entre estas fuerzas favorecerá la presión interna, provocando que la trampilla de la válvula se levante, lo que permite que el fluido drene y por tanto elimina la sobrepresión hasta que se restablezca el equilibrio inicial de fuerzas.

Es necesario el correcto mantenimiento de la válvula, por ejemplo, la limpieza regular de la tubería de drenaje es necesaria porque la condensación de agua u otras sustancias pueden dañar el disco de la válvula o su asiento. Una de las incidencias más comunes en estos dispositivos es una pequeña fuga, generalmente provocada por algún tipo de impurezas, partículas, polvo, entre otros, ubicada entre el disco y el asiento de la válvula.

#### **4.3.3. Termómetros**

Estos equipos son importantes para conocer de manera exacta la temperatura en la que está trabajando la caldera y de esa forma trasladar la información de manera certera y rápida al calderista. Los diferentes tipos de termómetros para medir la temperatura se encuentran detallados en la sección 2.1.1.

#### **4.3.4. Nivel de agua**

Se deben utilizar columnas de agua, niveles de cristal y grifos de manómetros, porque estos son los accesorios de código básicos que se utilizan para indicar el nivel de agua en la caldera. La columna de agua se instala entre el nivel del cristal y el nivel del agua. Esto se usa para eliminar fluctuaciones excesivas en la indicación del nivel de agua causadas por la circulación rápida o la ebullición en la caldera, por lo que puede usarse como un medio para relajar el agua y tener un valor de medición del nivel de agua más preciso y verdadero.

Debe haber una válvula de drenaje en la parte superior e inferior de la columna de agua. La válvula de mariposa y la válvula de drenaje se utilizan para eliminar los sedimentos. Si es necesario, se debe usar una válvula de bola en el lado sin presión de la válvula de compuerta para aumentar el sellado. El uso de válvulas de compuerta permite el uso de alambres para limpiar válvulas obstruidas sin detener la caldera o ponerla fuera de funcionamiento.

Estos niveles serán el respaldo necesario para evitar que el agua de la caldera descienda de manera peligrosa, esto en dado caso los sistemas de instrumentación fallen y no proporcionen la información clara al operador.

## 5. EVALUACIÓN TÉCNICO-FINANCIERA

### 5.1. Determinación de presupuesto necesario

Para realizar el presupuesto del sistema se asumió que la empresa de producción de leche que será utilizada como ejemplo, ya cuenta con sensores, variadores de frecuencia para los motores, niveles, equipo de seguridad mecánico.

A continuación, se especifican los costos que produce el sistema de alarma propuesto.

#### 5.1.1. Equipo de cómputo

Se necesita un equipo de cómputo capaz de soportar los requisitos necesarios por el software. Dichos requisitos se presentan en la siguiente tabla.

Tabla XI. **Requisitos del sistema para la instalación de LabVIEW 2020 SP1**

Requisitos del sistema			
Procesador Pentium III/Celeron 866 MHz o equivalente mínimo, Pentium 4/M o equivalente recomendado.			
RAM 256 MB mínimo, 1 GB recomendado			
Resolución de Pantalla 1024 x 768 píxeles mínimo, 1024 x 768 píxeles recomendado			
Sistema Operativo	Windows 8.1/8/7/Vista/XP SP3	mínimo, Windows 8.1/8/7/Vista recomendado	
Espacio en Disco 500 MB - 5 GB (instalación completa)			

Fuente: Universidad de Cantabria. *LabVIEW*. Consulta: 6 de febrero 2021.

<https://sdei.unican.es/Paginas/servicios/software/LabVIEW.aspx>



De igual manera se recomienda el uso de una computadora tipo industrial, debido que estas nos ofrecen una solución resistente diseñada para saciar requisitos extremos del ambiente de trabajo, como protección contra líquidos y polvo, temperaturas extremas, vibración y golpes fuertes. En un ámbito empresarial que evoluciona velozmente, esta es una virtud competitiva en relación con otras organizaciones industriales.<sup>31</sup> En comparación con los sistemas de control habituales, las computadoras de tipo industrial ofrecen una mayor capacidad de personalización, fiabilidad y escalabilidad, además de un periodo de vida más prolongado.

Con la utilización de dichos conjuntos se previene la obsolescencia tecnológica ya que tienen la posibilidad de tener actualizaciones de programa de forma más inmediata y segura.

**Tabla XII. Especificaciones de una computadora industrial**

<i>Componente</i>	<i>Detalle</i>
<i>LCD Panel</i>	19" SXGA TFT LCD 250 nits 1280 x 1024 pixels
<i>CPU</i>	LGA1151 socket 7th/6th generation Intel® Core™ i7/i5/i3, Celeron® & Pentium® processors
<i>Chipset</i>	Intel® H110
<i>Sistema de memoria</i>	2 x 288-pin DDR4-2133 Long-DIMM, up to 32GB
<i>BIOS</i>	AMI
<i>Ethernet</i>	2 x 10/100/1000 Mbps (Intel® i219-LM/i211-AT)
<i>Panel frontal</i>	Aluminio con IP65/NEMA 4 protección de uso rudo
<i>Fuente de poder</i>	100 o 240 VAC, 200W

<sup>31</sup> Intel. *La transformación digital comienza con una PC industrial moderna*. Consulta 4 de junio 2021. <https://www.intel.la/content/www/xl/es/internet-of-things/industrial-iot/industrial-pc.html>

Continuación de la tabla XII.

<i>Componente</i>	<i>Detalle</i>
<i>Temperatura de operación</i>	0 °C a 45°C
<i>Humedad relativa</i>	10% a 90% a 40°C
<i>Vibración</i>	Variable entre 5 – 500Hz
<i>EOS</i>	Windows® 10, Windows® 10 IoT Enterprise

Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de AXIOMTEK. *P1197E-500*  
*19" SXGA TFT Expandable Industrial Touch Panel Computer with 7th/6th Gen Intel® Core™*  
*i7/i5/i3, Celeron® & Pentium® Processor, PCI/PCIe Slot.* Consulta: 6 de junio de 2021.  
<https://www.axiomtek.com/>

### 5.1.2. Software

El software necesario para el sistema y panel de control es el LabVIEW 2020 SP1, puesto que en la tabla I se puede encontrar una comparación con otros softwares. LabVIEW 2020 SP1 proporciona una licencia de edición completa la cual nos da el respaldo necesario para el funcionamiento correcto del panel.

### 5.1.3. Equipo complementario del sistema

El sistema utilizará un controlador multilazo EZ - ZONE RM, dos llaves de seguridad para los operadores del control de la caldera, tres luces estroboscópicas que serán instaladas en lugares visibles de la sala de control y de máquinas, esto junto con dos sirenas de 50 Watts.

#### 5.1.4. Servicios asociados

La instalación del sistema debe ser realizada por un instalador de equipos de detección y seguridad, el instalador tendrá un aproximado de 20 horas de trabajo, junto con un ayudante el cual tendrá 12 horas de trabajo.

A continuación, se presenta el detalle de los costos

Tabla XIII. Costo de componentes para el sistema de alarmas

Componente	Cantidad	Costo unitario	Costo total	
Computadora industrial	1	Q 26 487,00	\$ 3 419,28	Q 26 487,00
Controlador multilazo EZ - ZONE RM	1	Q 9 614,64	\$ 1 238,00	Q 9 614,64
Llave de seguridad para panel	4	Q 212,5	\$ 54,72	Q 850,00
Licencia del software LabVIEW 2020 SP1 edición completa	1	Q 30 676,77	\$ 3 950,00	Q 30 676,77
Costo por hora de instalador de redes y equipos de detección y seguridad.	20	Q 42,94	\$ 5,53	Q 858,80
Costo por hora de ayudante instalador de redes y equipos de detección y seguridad.	12	Q 30,95	\$ 3,99	Q 371,40
Luz roja estroboscópica para alarma	3	Q 160,00	\$ 20,60	Q 480,00
Sirena de 50 Watts	2	Q 97,00	\$ 12,49	Q 194,00
<b>Total</b>			\$ 8 953,15	Q 69 532,61

Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de Mercado Libre. *PC industrial*. <https://www.articulo.mercadolibre.com>. National Instruments. *Seleccione su edición de LabVIEW Completo*. <https://www.ni.com/>. Generador de Precios. Guatemala. *Generador de precios de canalización principal*. Consulta: 6 de febrero 2021. <http://www.guatemala.generadordeprecios.info/>

En el presupuesto se consideró el tiempo del instalador de redes y equipos de detección y seguridad y su ayudante. El instalador tiene una diferencia mayor en las horas debido a que este será el encargado de realizar las pruebas necesarias en el sistema para determinar su adecuado funcionamiento.

## **5.2. Análisis financiero**

El análisis financiero consiste principalmente en la identificación de los beneficios y costos del resultado de diferenciar los efectos generados por la instalación de un sistema de control de alarma, teniendo presente que este sistema principalmente será de utilidad para resguardar de manera principal la integridad física de los operarios y técnicos de la empresa que sean los encargados de manipular la caldera. También está diseñado para preservar los activos de la empresa, en este caso el de la caldera acuatubular.

También se realizará un análisis al utilizar la tasa interna de rendimiento o TIR, que es la tasa de interés o tasa de ganancia que proporciona una inversión. Por tanto, se puede decir que la tasa interna de retorno es el porcentaje de ganancias y pérdidas que traerá cualquier inversión. Es una medida muy utilizada para evaluar proyectos de inversión. Además, está estrechamente relacionado con el VAN o el valor de actual neto. De hecho, su relación es tal que la tasa interna de rendimiento también se define como el valor de la tasa de descuento cuando el valor neto realizado de un proyecto de inversión específico y determinado obtiene un valor igual a 0.

Se utiliza como ejemplo práctico a una empresa encargada de la producir leche envasada para ser distribuida en supermercados, tiene una producción de 24 horas continuas, para el proceso de producción de la leche es necesario el uso de vapor, este es utilizado principalmente para la etapa de pasteurización de

la leche, el proceso se realiza de manera obligatoria puesto que “consiste en un tratamiento donde se eliminan las bacterias patógenas y reducir la actividad enzimática contenidas en la leche.” <sup>32</sup>

Los detalles técnicos y los respectivos costos de la caldera que se utiliza actualmente se presentan en la siguiente tabla

Tabla XIV. **Datos técnicos de la caldera utilizada para la pasteurización**

DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO	COSTO	
Caldera de pellet, capacidad nominal 4,8-16 kW, cuerpo de acero soldado y probado a presión, 1130x590x865 mm, aislamiento interno, cámara de combustión con sistema de limpieza automática de quemador con rejilla inclinada, elevador con mecanismo de autolimpieza del intercambiador de calor, extracción de humos controlada proporcionalmente, recogida y extracción de cenizas de los módulos de combustión, aprovechamiento del calor residual, equipos de limpieza, control de combustión con transductor integrado, sistema de control integrado con pantalla táctil, control de combustión y depósito de agua caliente sanitaria.	Q 94 998,04	\$ 12 232,13
Base de apoyo antivibraciones, para caldera.	Q 407,58	\$ 52,48
El limitador térmico de seguridad fijado a 95 ° C incluye válvula y sensor de temperatura.	Q 903,27	\$ 116,31
El sistema para elevar la temperatura de retorno por encima de 55 ° C incluye una válvula eléctrica de tres vías con un diámetro de 1 pulgada y una bomba de circulación para evitar la condensación y la acumulación de hollín en el tanque de almacenamiento.	Q 6 300,89	\$ 811,31
Regulador de tiro de 150 mm de diámetro, con claveta antiexplosión, para caldera.	Q 3 524,97	\$ 453,88
Extractor flexible básico de pellet, compuesto por un tubo de extracción de 1 m y un motor de accionamiento de 0,55 kW, que suministra energía monofásica de 230 V a la alimentación de la biomasa de la caldera.	Q 11 357,02	\$ 1 462,35
Tubo de ampliación para la conexión extractor de pellet.	Q 2 081,94	\$ 268,07
Tubo de conexión extractor de pellet flexible para sistema de suministro de biomasa a caldera.	Q 407,58	\$ 52,48

<sup>32</sup> Tetra Pak. *Tetrapak - Protege lo bueno: Procesamiento – Pasteurización*. Consulta: 10 de febrero 2021. <https://www.tetrapak.com/es-mx/solutions/processing/main-technology-area/pasteurization>

Continuación tabla XIV.

DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO	COSTO	
Transportador helicoidal sinfín flexible	Q 484,68	\$ 62,41
Kit básico para accionamiento de los transportadores helicoidales sinfín, formado por 3 motores de 1,5 kW cada uno, tornillo sinfín sin eje de 180 mm de diámetro y tubo de 220 mm de diámetro, interruptores finales de carrera y pieza de conexión para el sistema de descarga.	Q 76 227,56	\$ 9 815,21
Transportador sinfín de 1 m de longitud, que consta de un tubo con un diámetro de 220 mm y un tornillo sinfín de 180 mm de diámetro.	Q 17 955,35	\$ 2 311,97
Transportador helicoidal sinfín de 1,5 m de longitud, formado por tubo de 220 mm de d.y tornillo sinfín de 180 mm de d.	Q 16 303,00	\$ 2 099,21
Tubería que conecta el sistema de suministro de biomasa de la caldera.	Q 892,26	\$ 114,89
Conexión de tubo de 195 mm de diámetro, para sistema de alimentación de caldera de biomasa.	Q 2 676,78	\$ 344,67
Brida para conexión de tubo vertical de 195 mm de diámetro para sistema de alimentación de caldera de biomasa.	Q 1 586,24	\$ 204,25
Tubo de 195 mm de diámetro, para sistema de alimentación de caldera de biomasa.	Q 2 401,38	\$ 309,21
Tablero eléctrico para 3 motores	Q 21 777,73	\$ 2 804,14
Motor para transportador helicoidal sinfín, de 5,5 kW de potencia, con protección contra explosiones.	Q 42 244,61	\$ 5 439,50
Tablero eléctrico para motor.	Q 8 955,64	\$ 1 153,15
Tornillo sinfín de 230 mm de diámetro.	Q 10 927,44	\$ 1 407,04
Soporte intermedio para tornillo sinfín.	Q 3 932,55	\$ 506,36
Contenedor para caldera de biomasa con silo para pellets de 45 m³ de capacidad, dimensiones exteriores 6000x2980x2710 mm.	Q 504 195,53	\$ 64 921,20
Compuerta hidráulica de llenado de 2000x2000 mm para silo de almacenaje de biomasa, compuesta por plancha de aluminio, marco y rejilla de protección de acero galvanizado; con drenaje para agua de lluvia	Q 131 272,23	\$ 16 902,87
<b>COSTO TOTAL</b>	Q 961 814,27	\$123 845,07

Fuente: Generador de Precios. *Generador de precios de caldera para la combustión de pellets*  
[http://www.guatemala.generadordeprecios.info/obra\\_nueva/Instalaciones/IC\\_Calefaccion\\_\\_climatizacion\\_y\\_a/Calderas\\_de\\_biomasa/Caldera\\_para\\_la\\_combustion\\_de\\_pellets.html](http://www.guatemala.generadordeprecios.info/obra_nueva/Instalaciones/IC_Calefaccion__climatizacion_y_a/Calderas_de_biomasa/Caldera_para_la_combustion_de_pellets.html). Consulta: 6 de febrero 2021

El costo aproximado de la caldera que se utiliza para pasteurizar es de \$123,845.07, con el tipo de cambio proporcionado por el Banco de Guatemala,

este costo es de aproximadamente Q961,814.27. El vapor generado por esta caldera es capaz de pasteurizar un aproximado de 1 200 litros de leche por hora.

### **5.3. Evaluación del proyecto**

Es importante entender que las fallas en las calderas surgen principalmente por la falta de mantenimiento preventivo y predictivo. Esto sin mencionar los problemas aunados que existen de los equipos auxiliares de la caldera, puesto que estos problemas suponen paros inesperados en la producción del vapor. Es significativo considerar la corrosión y el deterioro eventual de la caldera, tal como se menciona en el manual de calderas, estos deterioros se producen durante las paradas como durante los periodos de trabajo.<sup>33</sup>

Se atribuye el precio de la caldera generalmente a su rendimiento, disponibilidad y a la operación segura. Esto con relación a las paradas forzadas en las que puede incurrir la caldera por falta de mantenimiento. La posibilidad de una parada forzada se vuelve más significativa al momento en el que el tamaño y las capacidades de la caldera aumentan, porque la falta de mantenimiento o de control pueden desencadenar en una rotura de tubos o escalar en gravedad y acabar con una explosión de la caldera.

Con el ejemplo de la productora de leche, en la investigación realizada para el cálculo del costo de la producción de un litro de leche, se indica que el precio de venta medio anual por litro de leche producido es del \$0,23<sup>34</sup>, a este valor está incluida la ganancia neta que equivale a un 52,64 % que son \$0,12. Con los datos anteriores se puede determinar que el costo para la empresa por producir un litro

---

<sup>33</sup> KOHAN, Anthony Lawrence. *Manual de Calderas*. p. 449.

<sup>34</sup> BOTERO, Luz. *Costo de producción de un litro de leche en una ganadería del sistema doble propósito*. p. 150.

de leche equivale al 47,36 % o bien \$ 0,11, incluidos en estos costos se encuentran los gastos fijos que representa producir un litro de leche, tales como el gasto de la energía eléctrica, el pago de operadores y técnicos, el agua que se utiliza para el proceso, el mantenimiento de la caldera, entre otros. Con los datos anteriores se puede determinar que en una hora la empresa percibe una ganancia de \$146,72 y unos costos de producción de \$132,00 al pasteurizar 1 200 litros de leche.

Los paros de la caldera producen pérdidas para la empresa, porque se tienen gastos fijos, como los mencionados anteriormente, que deben ser pagados, también son ganancias que la empresa deja de percibir respecto al producto que se beneficia del vapor generado de la caldera. A estos costos no se le consideraron las reparaciones puesto que estas son proporcionales al tamaño de la caldera y al tipo de falla que ocasionó el paro. Se asume entonces que la empresa productora de leche percibe una pérdida de \$0,23 entre costos y ganancias no percibidas por litro de leche no producido. En la tabla siguiente se pueden apreciar las pérdidas que puede tener la productora de leche por un determinado tiempo que se encuentre detenida la caldera.



Tabla XV. **Pérdidas por hora de paro en caldera**

<b>HORAS DE PARO FORZADO</b>	<b>PÉRDIDA (COSTO/ GANANCIA) DE NO PRODUCIR 1 200 LITROS DE LECHE EN UNA HORA</b>	
<b>1 HORA</b>	\$ 278,72	Q 2 164,59
<b>2 HORAS</b>	\$ 557,43	Q 4 329,17
<b>5 HORAS</b>	\$ 1 393,58	Q 10 822,93
<b>8 HORAS</b>	\$ 2 229,73	Q 17 316,68
<b>12 HORAS</b>	\$ 3 344,59	Q 25 975,02
<b>1 DÍA</b>	\$ 6 689,19	Q 51 950,05
<b>2 DÍAS</b>	\$ 13 378,38	Q 103 900,10
<b>5 DÍAS</b>	\$ 33 445,95	Q 259 750,25
<b>10 DÍAS</b>	\$ 66 891,89	Q 519 500,49

Fuente: elaboración propia.

Para prevenir los paros forzosos es importante contar con una inspección visual adecuada con la ayuda de un sistema de instrumentación o bien un sistema de alarma el cual ayudará a evitar daños permanentes a los activos de la empresa. También es importante contar con un mantenimiento adecuado a las exigencias del proceso.

Con los datos anteriormente presentados se puede realizar un cálculo del costo beneficio que conllevaría a la productora de leche invertir en un sistema de alarma que ayude a evitar fallas en el sistema y de esta manera evitar un paro forzoso. Con este sistema implementado se puede tener un mejor control de las variables que representen un riesgo al momento en el que la caldera está funcionando. Para determinar la viabilidad de la inversión se realiza el análisis de costo - beneficio, dicho análisis se calcula al dividir los beneficios que se tendrán de la inversión sobre los costos.

Para determinar si los beneficios son mayores que los costos, la relación entre estos dos tendrá que ser mayor que 1<sup>35</sup>, lo que indica que la inversión debe ser considerada. Si la relación es igual a 1 indica que no existe ningún beneficio y por último si la relación beneficio/costo es menor a 1 la inversión no debe ser considerada puesto que se registrarían pérdidas. Establecido lo anterior, se utiliza el valor de las pérdidas por un paro forzoso en la caldera como el beneficio en el análisis, porque este será el ahorro que la empresa percibirá por utilizar el sistema de alarmas y prevenir un fallo que obligue a un paro forzado. El costo lo representará el costo del sistema de alarma, pues esta sería la inversión necesaria para proteger la caldera.

Tabla XVI. **Análisis costo – beneficio**

<b>Descripción del costo</b>	<b>Beneficio</b>	<b>Costo</b>	<b>B/C</b>
Costo de paro por fallo de 1 hora	\$278,72	\$8 953,15	0,03
Costo de paro por fallo de 2 horas	\$557,43	\$8 953,15	0,06
Costo de paro por fallo de 5 horas	\$1 393,58	\$8 953,15	0,16
Costo de paro por fallo de 8 horas	\$2 229,73	\$8 953,15	0,25
Costo de paro por fallo de 12 horas	\$3 344,59	\$8 953,15	0,37
Costo de paro por fallo de 1 día	\$6 689,19	\$8 953,15	0,75
Costo de paro por fallo de 2 días	\$13 378,38	\$8 953,15	1,49
Costo de paro por fallo de 5 días	\$33 445,95	\$8 953,15	3,74
Costo de paro por fallo de 10 días	\$66 891,89	\$8 953,15	7,47
Costo por explosión de caldera y paro de 15 días	\$224 182,91	\$8 953,15	25,04

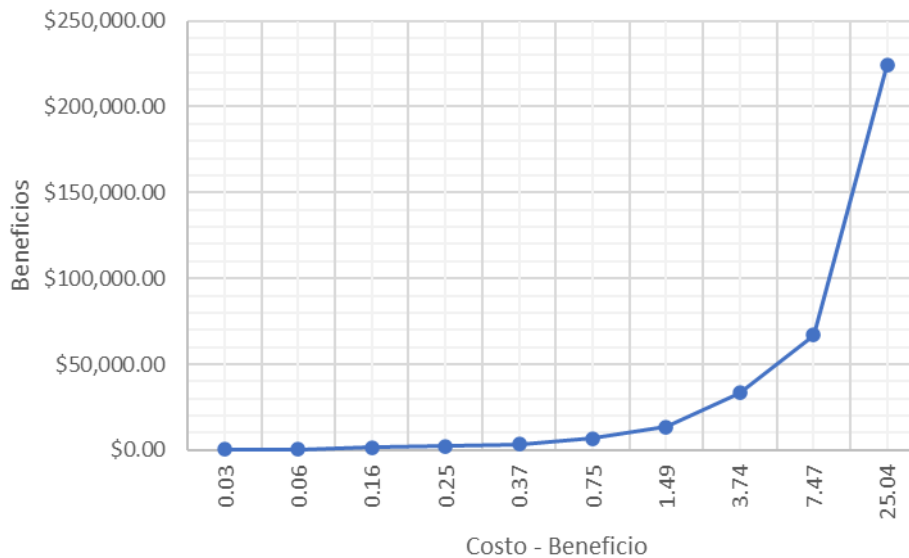
Fuente: elaboración propia.

Se puede distinguir que el análisis se realizó al considerar el escenario menos catastrófico, como lo puede ser un paro de una hora o bien, el caso

<sup>35</sup> SANTA CRUZ, Enrique. *Conexión Esan - El índice beneficio/costo en las finanzas corporativas*. Consulta: 8 de diciembre 2020. <https://www.esan.edu.pe/apuntes-empresariales/2017/01/el-indice-beneficiocosto-en-las-finanzas-corporativas/>

opuesto de una explosión y daño permanente en la caldera que obligue a comprar una nueva caldera y los días aproximados de paro que tendría la caldera. En la columna de B/C se nota la relación beneficio - costo, donde por un paro de un día el beneficio es mayor al costo de inversión. Esto se ejemplifica de mejor manera en la siguiente figura.

Figura 80. **Gráfica costo – beneficio**



Fuente: elaboración propia.

Se determinó que el beneficio aumentará respecto al costo y este es viable para evitar daños permanentes o paros mayores a dos días. De forma trimestral se puede determinar que el beneficio es mayor al costo puesto que si se agrupan las horas totales de paro en la caldera y si de forma agrupada sobrepasa las 48 horas se puede confirmar el análisis anterior, debido a que el sistema ayudará para que se registre la menor cantidad de paros innecesarios o por emergencia de la caldera.

Como se mencionó en la sección 5.2, se realizará un análisis con la tasa interna de retorno (TIR) y el valor actual neto (VAN). El cálculo de la TIR al igual que el cálculo del VAN permitirá comprender la viabilidad del proyecto. Aunque el VAN cuantifica el beneficio absoluto que generará una inversión en unidades monetarias, la TIR proporciona un porcentaje del rendimiento de la inversión. Para realizar el cálculo se utiliza la siguiente fórmula:

Figura 81. **Fórmula para el cálculo de la TIR**

$$VAN = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1 + TIR)^t} = -I_0 + \frac{F_1}{(1 + TIR)} + \frac{F_2}{(1 + TIR)^2} + \dots + \frac{F_n}{(1 + TIR)^n} = 0$$

Fuente: SEVILLA ARIAS, Andrea. *Tasa interna de retorno (TIR)*. Consulta: 6 de junio 2021.

<https://economipedia.com/definiciones/tasa-interna-de-retorno-tir.html>.

Si la TIR de la inversión es igual o superior a la tasa de interés más baja que queremos lograr, se recomienda hacerlo. Por otro lado, si es menor, la inversión no es recomendable realizar dicha inversión.

Se realiza el cálculo con un tiempo de 12 meses, con una tasa de interés del 10 %, los ingresos serán las ganancias que se tienen de la venta de leche y los costos que se generan de producir la leche, por último, la inversión inicial es el costo del equipo de alarma. Con estos parámetros se realiza el cálculo de la TIR y se obtiene un resultado de 118,34 %. Con este valor se determina la viabilidad del proyecto, debido a que esta es mayor de la tasa de interés que se quiere lograr.

El valor actual neto (VAN) es un criterio de inversión que incluye la actualización de los ingresos y gastos de un proyecto o inversión para

comprender cuánto ganará o perderá la inversión. Para ello, trae todos los flujos de caja al momento actual y los descuenta a un tipo de interés específico. El VAN utilizará el valor neto absoluto para medir la rentabilidad del proyecto. Al momento de realizar el análisis del VAN se hace uso de la siguiente fórmula.

Figura 82. **Fórmula para el cálculo del VAN**

$$VAN = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+k)^t} = -I_0 + \frac{F_1}{(1+k)} + \frac{F_2}{(1+k)^2} + \dots + \frac{F_n}{(1+k)^n}$$

Fuente: VELAYOS MORALES, Víctor. *Valor Actual Neto (VAN)*. Consulta: 6 de junio 2021.  
<https://economipedia.com/definiciones/valor-actual-neto.html>.

Si el resultado del VAN es positivo, significa que la inversión es rentable. Por otro lado, si el resultado es negativo, se tendrá que reconsiderar invertir porque no será beneficioso. Si el VAN es 0, significa que la inversión no importa. Para realizar el cálculo correspondiente, se deben de considerar los valores de la inversión inicial que es el costo del equipo de alarma, Como ingresos se tienen las ganancias que se tienen de la venta de leche y los costos que se generan de producir la leche. El cálculo se realiza para un periodo de 12 meses con una tasa de interés del 118,34 % que es el valor calculado en la TIR.

Con estos datos se realiza el cálculo del VAN usando la fórmula anterior, se obtiene como resultado \$ 89 256.95. Según lo mencionado anteriormente, se tiene una inversión altamente rentable según el VAN.

Es importante recordar que la vida y la integridad física de los técnicos, calderistas e ingenieros es invaluable.

## CONCLUSIONES

1. Se evidenció la importancia de un sistema de alarma, esto con el propósito de reducir los paros en las calderas por fallas. Para realizar el diseño de la alarma se consideraron los principios generales de la norma que se mencionan en la sección 1.4.1 y se detallan en la tabla VIII, la cual es una colección de los criterios y principios relevantes que se deben cumplir.
2. Con ayuda de la teoría referente a los sistemas de vapor, se pudo identificar las variables críticas que pueden afectar a una caldera en su funcionamiento. Dichas variables críticas se identificaron en la tabla IV, estas variables se deben monitorear de manera permanente al momento en el que la caldera se encuentra en funcionamiento.
3. Con el uso de las normas, se logró establecer la adquisición de los datos causados por las variables críticas de la caldera, las cuales pueden ser vigiladas y monitoreadas por el sistema de alarmas incluso por el calderista, para que este tome las decisiones relacionadas para el cuidado tanto de la caldera como del personal.
4. El uso del software LabVIEW 2020 SP1 resultó útil para la simulación de las condiciones y regulaciones que establece la norma IEC 62682. Esta norma evalúa el sistema de alarmas en cuatro etapas, de las cuales dos son específicamente para la simulación (optimización del sistema y soporte avanzado al operador) las que se cumple en los lazos de control realizados.

5. Se determinó la viabilidad técnica y económica del sistema de alarmas. La viabilidad técnica se determinó por medio de la simulación en el software LabVIEW 2020 SP1, debido a que se evaluó en las condiciones críticas de la caldera. La viabilidad económica se evaluó respecto al costo - beneficio que tiene el sistema, el cálculo de la TIR y VAN.

## RECOMENDACIONES

1. Realizar una inversión en un sistema de alarmas, específicamente para los equipos potencialmente peligrosos, estos sistemas deben ser diseñados con la guía de una normativa, debido a que la detección oportuna de fallas ayudará al operador a tomar las decisiones necesarias y la empresa evitará costos imprevistos.
2. Hacer una simulación de los sistemas de alarma que serán instalados en las máquinas que se quieren proteger o que son potencialmente peligrosas, es fundamental, pues estas simulaciones son primordiales para identificar las variables críticas que el sistema de alarma debe monitorear y así determinar las acciones necesarias en el diseño del lazo de control para asegurar su correcto funcionamiento.
3. Capacitar al personal en el uso adecuado de los sistemas de detección de fallas, esto con el fin de que el técnico encargado del sistema de alarmas pueda interpretar los datos presentados en el panel de alarmas, de esta manera podrá reaccionar de la forma correcta y aplicar el protocolo de mitigación de fallas de manera adecuada y oportuna.
4. Realizar procedimientos donde se asegure la mejora continua del sistema de alarma, así como los protocolos de respuesta del personal ante una alarma, porque esto proporcionará alta confiabilidad en el sistema de alarma y del equipo en el cual este sistema se encuentra instalado.



5. Realizar los mantenimientos preventivos y predictivos en las calderas donde funcionará el sistema de alarma, esto con el fin de evitar fallas y de esta manera aumentar la confiabilidad de la máquina al momento del funcionamiento.

## BIBLIOGRAFÍA

1. ABB Technology Ltd. *Descubrimientos alarmantes. ABB Review*. [en línea].  
<[https://library.e.abb.com/public/0233cb039738494c9988044c4c1d9008/Revista%20ABB%201-2016\\_72dpi.pdf](https://library.e.abb.com/public/0233cb039738494c9988044c4c1d9008/Revista%20ABB%201-2016_72dpi.pdf)> [Consulta: 26 de agosto 2020].
2. Área Tecnología. *Área Tecnología PC Simu – Simulador*. [en línea].  
<<https://www.areatecnologia.com/programas/pc-simu.html>> [Consulta: 8 de septiembre 2020].
3. autoSim 200. *SMC International Training - Simulador de automatización*. [en línea].  
<<https://www.smctraining.com/es/webpage/indexpage/108>>. [Consulta: 8 de septiembre 2020].
4. BASU, Swapan. *Plant hazard analysis and safety instrumentation systems*. London Wall, Londres, Reino Unido: Academic Press, 2016. 1062 p.
5. BOTERO, Luz. *Costo de producción de un litro de leche en un a ganadería del sistema doble propósito Magangué, Bolívar*. Sucre, Colombia: MVZ Córdoba, 2006. 815 p.
6. BROWN, Marlin. *Human-computer interface design guidelines*. Norwood, New Jersey: Ablex Publishing Corp, 1998. 248 p.

7. CISTERNA - CABRERA, Francisco. *Categorización y triangulación como procesos de validación del conocimiento en investigación cualitativa*. Chillán, Chile: Theoria, 2005. 71 p.
8. Consejería de Economía y Hacienda comunidad de Madrid. *Guía Básica de Calderas Industriales Eficientes*. Madrid, España: Gráfica Arias Montano S.A., 2012. 159 p.
9. Cosmo Palasio. *Riesgo Lab - de Calderas: Riesgos de explosiones*. [en línea] <<https://riesgolab.com/index.php/component/k2/item/1054-calderas-riesgo-de-explosiones>> [Consulta: 23 de noviembre 2020]
10. CYPE Ingenieros, S.A. *Software para Arquitectura, Ingeniería y Construcción: Generador de Precios Guatemala*. [en línea]. <[http://www.guatemala.generadordeprecios.info/obra\\_nueva/Instalaciones/IC\\_Calefaccion\\_\\_climatizacion\\_y\\_a/Calderas\\_de\\_biomasa/Caldera\\_para\\_la\\_combustion\\_de\\_pellets.html](http://www.guatemala.generadordeprecios.info/obra_nueva/Instalaciones/IC_Calefaccion__climatizacion_y_a/Calderas_de_biomasa/Caldera_para_la_combustion_de_pellets.html)> [Consulta: 6 de febrero 2021].
11. DAVEY, E., GUO, K., RUSSOMANNO, S., POPOVIC, J., & ARCHER, P. *Towards defining the functional role for CANDU annunciation. Proceedings of the IEEE 5th Conference on Human Factors and Power Plants*. Monterey, CA, USA.: IEEE, 1992. 569 p.
12. EEMUA, E. E. *Alarm systems. A guide to design, management and procurement*. London, UK.: EEMUA, 1999. 256 p.

13. ENRÍQUEZ, Gilberto. *El ABC de la instrumentación en el control de procesos industriales*. Ciudad de México, México: Editorial Limusa, 2000. 292 p.
  
14. ESTEBAN TALAYA, Águeda, MOLINA COLLADO, Arturo, ALARCÓN DEL AMO, María del Carmen, CORDENTE RODRÍGUEZ, María, GÓMEZ BORJA, Miguel, BLÁZQUEZ RESINO, Juan José, MILLÁN CAMPOS, Ángel, DÍAZ SÁNCHEZ, Estrella & MARTÍN-CONSUEGRA NAVARRO, David. *Investigación de mercados*. Madrid, España: ESIC Editorial. 2014. 210 p.
  
15. Fundacion for Pro. *Introducción a Zelio Soft*. [en línea] <<https://www.fundacionforpro.org/blog/introduccion-a-zelio-soft/#:~:text=Aut%C3%B3matas%20Programables%20y%20Zelio%20Soft,%2C%20interruptores%2C%E2%80%A6%2Cetc>> [Consulta: 8 de septiembre 2020]
  
16. GUTIÉRREZ, Marllelis del Valle, e ITURRALDE, Sadi. *Fundamentos Básicos de Instrumentación y Control*. Quito, Ecuador: Serie de Textos Académicos de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería de la Universidad Estatal Península de Santa Elena, 2017. 137 p.
  
17. HOLLENDER, Martin & BEUTHEL, Carsten. *Sistema inteligente de alarmas*. Zúrich, Suiza: Revista ABB. 2007. pp 20-23.
  
18. Iguren.es. *¿Qué es y cómo funciona un Variador de Frecuencia?* [en línea] <<https://iguren.es/blog/como-funciona-un-variador-de-frecuencia/>> [Consulta: 26 de agosto 2021]

19. Instituto Guatemalteco de Seguridad Social (IGSS). *Reglamento General Sobre Higiene y Seguridad en el Trabajo*. Ciudad de Guatemala, Guatemala: IGSS. 1957. 31 p.
20. Intel. *La transformación digital comienza con una PC industrial moderna*. [en línea] <<https://www.intel.la/content/www/xl/es/internet-of-things/industrial-iot/industrial-pc.html>> [Consulta 4 de junio 2021]
21. International Electrical Commission (IEC). *Nuclear power plants – Main control room – Alarm functions and presentation (IEC 62241)*. Geneva, Switzerland: IEC. 2004. 108 p.
22. International Electrical Commission (IEC). *Management of alarms systems for the process industries (IEC 62682)*. Geneva, Switzerland: IEC. 2014. 165 p.
23. Instrument Society of America (ISA). *Management of alarm systems for the process industries (ISA-18.2)*. Carolina del Norte, Estados Unidos: ISA. 2009. 82 p.
24. Instrumentacionycontrol.net. *Los posicionadores de válvulas: conceptos claros y definitivos*. [en línea] <<https://instrumentacionycontrol.net/los-posicionadores-de-valvulas-conceptos-claros-y-definitivos/>> [Consulta: 26 de agosto 2021]
25. KOHAN, Anthony Lawrence. *Manual de Calderas*. Madrid, España: McGraw - Hill Interamericana de España, 2000. 747 p.

26. MANGOSIO, Jorge. *Investigación de accidentes*. Buenos Aires, Argentina: Universidad Católica de Argentina, Facultad de Ciencias Fisicomatemáticas e Ingeniería. 2002. 154 p.
27. MARTÍNEZ, Ana Belén. *Curso de introducción a la interacción persona-ordenador*. Oviedo, Asturias, España: Estándares y guías. In J. Lorés. 2001. 85 p.
28. Ministerio de Trabajo y Previsión Social. *Acuerdo Gubernativo 229-2014: Reglamento de Salud y Seguridad Ocupacional*. Ciudad de Guatemala, Guatemala: MINTRAB. 2014.
29. MORÁN, Michael. *Fundamentos de termodinámica técnica*. Loreto, Barcelona, España: Reverté. 2018. P 888.
30. Norwegian Petroleum Directorate (NPD). *Petroleum Safety Authority Norway Principles for alarm system design*. [en línea] <[http://www.ptil.no/getfile.php/Regelverket/Alarm\\_system\\_design\\_e.pdf](http://www.ptil.no/getfile.php/Regelverket/Alarm_system_design_e.pdf)> [Consulta: 13 de noviembre 2020]
31. Omega.com. *Sensores de nivel*. [en línea] <<https://es.omega.com/prodinfo/sondas-de-nivel-medicion.html>> [Consulta: 26 de agosto 2020]
32. ORELLANA LÓPEZ, Dania. & SÁNCHEZ GÓMEZ, Cruz. *Revista de Investigación Educativa: Técnicas de recolección de datos en entornos virtuales más usadas en la investigación cualitativa*. Salamanca, España: Universidad de Salamanca. 2006. pp 205 – 222

33. OZAETA, María. *Prensa Libre: Estos son los sectores con más accidentes laborales en Guatemala*. 2019. [en línea] <<https://www.prensalibre.com/economia/estos-son-los-sectores-con-mas-accidentes-laborales-en-guatemala/>> [Consulta: 9 de septiembre 2020]
34. RAFFINO, María. *Concepto de Leyes de Termodinámica*. [en línea] <<https://concepto.de/leyes-de-la-termodinamica/>> [Consulta: 10 de septiembre 2020]
35. \_\_\_\_\_ María. *Concepto de entropía*. [en línea] <<https://concepto.de/entropia>> [Consulta: 10 de septiembre 2020]
36. RIVAS PERÉZ, Raul, FELIU BATLLE, Vicente. & SOTOMAYOR MORIANO, Javier. *Sistema de detección de fallos en PC en calderas pirotubulares*. Madrid, España: Revista Iberoamericana de ingeniería Mecánica. 2005. 78 p.
37. RODRÍGUEZ ESTEVA, Agustín Eduardo. *Simulación y Control de Sistema de Saneamiento*. Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería, Universidad de la República. Uruguay: Universidad de la República. 2020. 144 p.
38. ROLLE, Kurt *Google Books- Termodinámica*. [en línea] <<https://books.google.es/books?id=1rIBBXQhmCwC&lpg=SA1-PA31&ots=ikYYC72a8g&dq=leyes%20de%20termodinamica&lr&hl=es&pg=SA1-PA31#v=onepage&q&f=false>> [Consulta: 23 de julio 2020]

39. SANCHIS, Julio. *Medidor de nivel de agua*. [en línea] <<https://www.calderasformacion.com/medidor-de-nivel-de-agua/#:~:text=El%20medidor%20de%20nivel%20de,pueda%20realizar%20las%20operaciones%20correspondientes>> [Consulta: 4 de junio 2021]
40. SANTA CRUZ, Enrique. *Conexión Esan-El índice beneficio/costo en las finanzas corporativas*. [en línea] <<https://www.esan.edu.pe/apuntes-empresariales/2017/01/el-indice-beneficiocosto-en-las-finanzas-corporativas/>> [Consulta: 8 de diciembre 2020]
41. SANZ DEL AMO, Manuel, & PATIÑO MOLINA, Rosario. *Manual práctico del operador de calderas industriales 2.<sup>a</sup> edición*. Madrid, España: Paraninfo. 2018. 240 p.
42. Secure Week. *NFPA 85-2019 Código de riesgos de sistemas de combustión y calderas* [en línea] <<https://www.secureweek.com/nfpa-85-2019-codigo-de-riesgos-de-sistemas-de-combustion-y-calderas/>> [Consulta: 8 de septiembre de 2020]
43. SEPÚLVEDA, Diego y RAMÍREZ, Jairo. *Condiciones de seguridad en calderas de vapor de empresas afiliadas a una administradora de riesgos profesionales en Antioquia, 2009*. Revista Facultad Nacional de Salud Pública [en línea]. <<https://revistas.udea.edu.co/index.php/fnsp/article/view/6268>> [Consulta: 13 de octubre 2020].



44. Sistemas industriales de calderas. *Calidad del agua de calderas*. [en línea] <<http://www.sincal.es/descargas/calidad-de-agua-de-calderas.pdf>> [Consulta: 4 de junio 2021]
45. \_\_\_\_\_ *Conceptos básicos del vapor*. [en línea] <<https://sincal.es/conceptos-basicos-del-vapor/>> [Consulta: 4 de junio 2021]
46. SOLÉ, Antonio Creus. *Instrumentación Industrial*. Barcelona, España: Marcombo, 2012. 792 p.
47. SOTO VÁSQUEZ, Lilly. *Investigación y tipos de investigación*. [en línea] <<https://es.slideshare.net/lili369/investigacin-y-tipos-de-investigacin>> [Consulta: 12 de julio 2020]
48. Tetra Pak. *Tetrapak - Protege lo bueno Procesamiento - Pasteurización*. [en línea] <<https://www.tetrapak.com/es-mx/solutions/processing/main-technology-area/pasteurization>> [Consulta: el 10 de febrero 2021]
49. Tecnología Para La Industria. *Aumentar la eficiencia de las máquinas con tres acciones para maximizar la capacidad de producción*. [en línea] <<https://tecnologiaparalaindustria.com/aumentar-la-eficiencia-de-las-maquinas-con-tres-acciones-para-maximizar-la-capacidad-de-produccion-2/>> [Consulta: 4 de junio 2021]
50. TORRALBA, María Belén. *Análisis de incidentes operativos en sistemas complejos: actuación*. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de

Madrid, Facultad de Psicología - Departamento de Metodología de las Ciencias del Comportamiento. Madrid, España: Universidad Complutense de Madrid. 2016. 482 p.

51. Universidad de Cantabria. *Servicio de Informática - LabVIEW*. [en línea] <<https://sdei.unican.es/Paginas/servicios/software/LabVIEW.aspx>> [Consulta: 8 de septiembre de 2020]
52. VALOR, Francisco. *Blog donde hablamos de la bolsa - Rentabilidad Financiera: Concepto y Cálculo*. [en línea] <<https://www.difbroker.com/es/articulos/rentabilidad-financiera-concepto-y-calculo/>> [Consulta: 12 de febrero 2021]
53. VAPOR PARA LA INDUSTRIA. *Medición de caudal de vapor con transmisores de presión diferencial*. [en línea] <<https://vaporparalaindustria.com/medicion-de-caudal-de-vapor-con-transmisores-de-presion-diferencial/>> [Consulta: 26 agosto 2021]
54. WATLOW. *Manual del Usuario: Modelos de controladores de límite*. [en línea] <<https://es.watlow.com/products/Controllers/Temperature-and-Process-Controllers/EZ-ZONE-RM-Integrated-Controller>> [Consulta: 18 enero 2021]
55. \_\_\_\_\_ *Sensores - Termocuplas*. [en línea] <<https://es.watlow.com/products/Sensors/Thermocouples/High-Temperature-Thermocouples>> [Consulta: 26 agosto 2021]

56. ZURITA FUENTES, Ana Cecilia, & ROSITO MONZÓN, Juan Carlos, *Perfil energético de Guatemala: Bases para el entendimiento del estado actual y tendencias de la energía*. Ciudad de Guatemala, Guatemala: Universidad Rafael Landívar. 2018. 194 p.