



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

**PROPUESTA DE MEJORA DE CONTROL Y OPERACIÓN DEL SISTEMA DE
ENFRIAMIENTO DE GENERADORES GENERAL ELECTRIC DE 41,5 MW, POR
PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO POR ELECTRÓLISIS ALCALINA DEL AGUA
DESMINERALIZADA APLICANDO UN SISTEMA DE CONTROL DISTRIBUIDO**

Ferdi Giancarlo Rodriguez Carrillo

Asesorado por el Ing. Helmut Federico Chicol Cabrera

Guatemala, marzo de 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

PROPUESTA DE MEJORA DE CONTROL Y OPERACIÓN DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO DE GENERADORES GENERAL ELECTRIC DE 41,5 MW, POR PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO POR ELECTRÓLISIS ALCALINA DEL AGUA DESMINERALIZADA APLICANDO UN SISTEMA DE CONTROL DISTRIBUIDO

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

FERDI GIANCARLO RODRIGUEZ CARRILLO

ASESORADO POR EL ING. HELMUNT FEDERICO CHICOL CABRERA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRÓNICO

GUATEMALA, MARZO DE 2023

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 Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

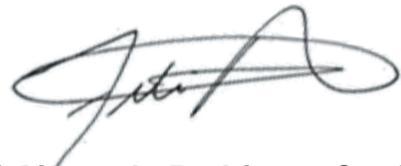
DECANO	Ing. Sidney Alexander Samuels Milson
EXAMINADOR	Ing. Manuel Fernando Barrera Pérez
EXAMINADOR	Ing. Marvin Marino Hernández Fernández
EXAMINADOR	Ing. Gustavo Adolfo Villeda Vásquez
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

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 MEJORA DE CONTROL Y OPERACIÓN DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO DE GENERADORES GENERAL ELECTRIC DE 41,5 MW, POR PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO POR ELECTRÓLISIS ALCALINA DEL AGUA DESMINERALIZADA APLICANDO UN SISTEMA DE CONTROL DISTRIBUIDO

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha Octubre 2015.



Ferdi Giancarlo Rodriguez Carrillo

Guatemala, 20 de noviembre del 2018

Ingeniero

Julio Cesar Solares Peñate

Coordinador del área de Electrónica

Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Solares:

Por medio de la presente me permito informarle que he revisado completamente el trabajo de graduación titulado:

“PROPUESTA DE MEJORA DE CONTROL Y OPERACIÓN DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO DE GENERADORES GENERAL ELECTRIC DE 41,5 MW, POR PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO POR ELECTRÓLISIS ALCALINA DEL AGUA DESMINERALIZADA APLICANDO UN SISTEMA DE CONTROL DISTRIBUIDO”, desarrollado por el señor FERDI GIANCARLO RODRIGUEZ CARRILLO, con numero de carnet 97-12180.

Puedo concluir que dicho trabajo cumple con los objetivos propuestos, por lo que me complace dar la aprobación respectiva e indicarle que el autor y mi persona somos responsables por el contenido y conclusiones del mismo.

Atentamente,



Ing. Helmut Federico Chicol Cabrera

Colegiado No. 7350.

Asesor

HELMUNT FEDERICO CHICOL CABRERA
INGENIERO ELECTRONICO
COLEGIADO No. 7350

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

REF. EIME 16. 2019.
30 de enero 2019.

Señor Director
Ing. Otto Fernando Andrino González
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:
PROPUESTA DE MEJORA DE CONTROL Y OPERACIÓN DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO DE GENERADORES GENERAL ELECTRIC DE 41.5 MW, POR PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO POR ELECTRÓLISIS ALCALINA DEL AGUA DESMINERALIZADA APLICANDO UN SISTEMA DE CONTROL DISTRIBUIDO, del estudiante; Ferdi Giancarlo Rodríguez Carrillo, que cumple con los requisitos establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,
ID Y ENSEÑAD A TODOS


Ing. Julio César Solares Peñate
Coordinador de Electrónica





REF. EIME 16. 2019.

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 de la estudiante: FERDI GIANCARLO RODRÍGUEZ CARRILLO titulado: PROPUESTA DE MEJORA DE CONTROL Y OPERACIÓN DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO DE GENERADORES GENERAL ELECTRIC DE 41,5 MW, POR PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO POR ELECTRÓLISIS ALCALINA DEL AGUA DESMINERALIZADA APLICANDO UN SISTEMA DE CONTROL DISTRIBUÍDO, procede a la autorización del mismo.

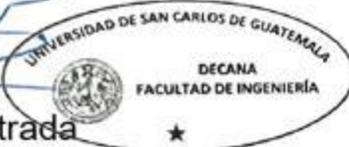

Ing. Otto Fernando Andrijo González



GUATEMALA, 26 DE MARZO 2019.

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 MEJORA DE CONTROL Y OPERACIÓN DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO DE GENERADOR GENERAL ELÉCTRICO DE 41.5 MW, POR PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO POR ELECTROLISIS ALCALINA DEL AGUA DESMINERALIZADA APLICANDO UN SISTEMA DE CONTROL DISTRIBUIDO.** Presentado por **Ferdinand Giancarlo Rodríguez Carrillo**, después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
Decana

Guatemala, marzo de 2023

AACE/gaoc

ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Por todas sus bendiciones.

Mis padres

Sandra y Mario por el apoyo en mi carrera.

Mi esposa

Lidia Por el soporte en mis metas.

Mis hijos

Milena y Giancarlo, por la motivación en mi vida.

Mis tíos

Por la orientación en mis objetivos.

Abuela

Modesta, por el gran ejemplo que me enseñó a no dejar de buscar las metas en la vida.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por dar la oportunidad de ser un profesional para el servicio de Guatemala.
Facultad de Ingeniería	Por ser el lugar de enseñanza por excelencia.
A mi asesor	Por el seguimiento y apoyo en mi trabajo de graduación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	IX
LISTA DE SÍMBOLOS	XV
GLOSARIO	XVII
RESUMEN.....	XXVII
OBJETIVOS.....	XXIX
INTRODUCCIÓN	XXXI
1. CONSIDERACIONES GENERALES DE LOS SISTEMAS INTEGRADOS AL PROYECTO	1
1.1. Características de operación y funcionamiento de generador eléctrico General Electric.....	1
1.1.1. Descripción de sistema de enfriamiento actual para el generador	4
1.1.2. Descripción de sistema de enfriamiento Aire- Agua e Hidrógeno.....	6
1.1.3. Procedimiento de inyección típico de hidrógeno para generadores eléctricos	7
1.1.4. Arranque del sistema de aceite de sellos	8
1.1.5. Purga del aire de la carcasa del generador eléctrico con CO2	9
1.1.6. Presurización de la carcasa del generador eléctrico con Hidrógeno	10
1.1.7. Purga o barrido de hidrógeno utilizando CO2 para eliminación de riesgo de explosividad en presencia de hidrógeno	12

1.2.	Clasificación de sistemas auxiliares para la operación de generadores eléctricos	14
1.2.1.	Sistema de enfriamiento con agua cruda por medio de intercambiadores de calor	15
1.2.2.	Sistema de aceite de sellos para minimizar fugas de hidrógeno	15
1.2.3.	Sistema de producción de agua desmineralizada o DM.....	17
1.2.3.1.	Plantas de osmosis inversa o RO	17
1.2.3.2.	Tren de anión, catión y lechos mixtos ..	18
1.3.	Sistemas de lubricación utilizados en los turbogeneradores....	19
1.4.	Sistemas de enfriamiento de los generadores en función de la mejora de su eficiencia.....	21
1.4.1.	Sistemas de enfriamiento para termoeléctricas.....	21
1.4.2.	Sistemas aire y agua.....	21
1.4.3.	Sistemas de enfriamiento por hidrógeno de alta pureza	22
1.5.	Curvas típicas de capacidad del generador eléctrico de potencia.....	24
1.5.1.	Curvas de capacidad específicas para generadores General Electric 197932 y 197933, y su correlación en función de la presión de hidrógeno de alta pureza.....	24
1.5.2.	Impacto de la eficiencia de enfriamiento en los intercambiadores de calor del generador utilizando hidrógeno de alta pureza.....	26
1.5.3.	Impacto de la eficiencia de enfriamiento en los intercambiadores de calor del generador utilizando hidrógeno de alta pureza.....	27

1.6.	Sistema de control distribuido.....	27
1.6.1.	Descripción general de un sistema de control distribuido o DCS por sus siglas en ingles.....	27
1.6.2.	Arquitectura del sistema de control distribuido, D/3®	28
1.6.3.	Red D/3®.....	29
1.6.4.	DCM	30
1.6.5.	CDCM.....	31
1.6.6.	Consola de Operación	31
1.6.7.	PCM.....	32
1.6.8.	Administrador de consola	34
1.6.9.	Redundancia.....	35
1.6.10.	Ventajas de la utilización de un sistema de control distribuido en la automatización industrial	36
1.6.11.	Integración de múltiples tecnologías de control.....	36
1.6.12.	Diseño de interfaz de usuario amigable.....	37
1.6.13.	Bases de datos de variables de proceso	38
1.6.14.	D/3® Manager	39
1.6.15.	Análisis de tendencias de variables de proceso y exportación de datos a hojas de cálculo	40
1.7.	Redundancia de comunicación y control	40
1.7.1.	Programación por rutinas predefinidas o personalizadas y mapeo de señales.....	41
1.7.2.	Declaración de variables de proceso.....	41
1.7.3.	Rutinas de programación predefinidas	44
1.7.4.	SABL® - Archivos	45
1.7.5.	Programación personalizada	46
1.7.6.	Mapeo de señales	46

1.7.7.	Instrumentación industrial y controladores electrónicos para el monitoreo de señales de campo.....	47
1.7.8.	Sensores y actuadores.....	48
1.7.9.	Sensores	48
1.7.10.	Tipos de sensores	49
1.7.11.	Características de un sensor.....	50
1.7.12.	Rango de medida	50
1.7.13.	Linealidad	51
1.7.14.	Precisión.....	56
1.7.15.	Sensibilidad	58
1.7.16.	Exactitud.....	59
1.7.17.	Repetitividad.....	60
1.7.18.	Actuadores	61
1.7.19.	Actuadores Eléctricos.....	62
1.7.20.	Actuadores neumáticos	63
1.7.21.	Actuadores hidráulicos	64
2.	EVALUACIÓN DE LA INSTALACIÓN DE UN GENERADOR DE HIDRÓGENO.....	67
2.1.	Generadores de hidrógeno operando mediante electrólisis alcalina.....	67
2.2.	Principios de operación de la electrólisis alcalina	68
2.3.	Sistemas auxiliares del generador de hidrógeno	71
2.4.	Separador de fase de oxígeno	71
2.5.	Control del sistema eléctrico del generador de hidrógeno	71
2.6.	Separador de fase de hidrógeno	72
2.7.	Purga de gas.....	73
2.8.	Aplicaciones típicas de esta tecnología.....	74

2.9.	Generadores de hidrógeno operando mediante membrana de intercambio protónico o PEM.....	75
2.10.	Principios de operación de las membranas de intercambio protónico.....	75
2.11.	Manejo adecuado del Hidróxido de Potasio como potenciador de la electrólisis	77
2.12.	Selección de la tecnología a implementar y dimensionamiento	77
2.13.	Definición de parámetros para la selección del equipo	78
2.14.	Estimación de consumo de agua desmineralizada o DM, para la generación del hidrógeno	79
2.15.	Estimación del consumo eléctrico en auxiliares para la generación de hidrógeno	79
2.16.	Comparación técnica entre tecnologías consideradas para la implementación	80
3.	IMPLEMENTACION DEL GENERADOR DE HIDRÓGENO POR ELECTRÓLISIS ALCALINA MEDIANTE EL CONTROL ELECTRONICO	81
3.1.	Desarrollo del proyecto.....	81
3.1.1.	Elaboración de diagrama, proceso e instrumentación para el generador de hidrógeno ...	81
3.2.	Elaboración de las listas de mapeo de señales analógicas y digitales para monitores en DCS.....	82
3.3.	Diseño de red de comunicación para el control y monitoreo del sistema de producción de hidrógeno y control del enfriamiento del generador eléctrico	89
3.4.	Esquemas de conexiones de los módulos 8000 I/O.....	90
3.5.	Terminales de campo	96

3.6.	Implementación de comunicación entre DCS y PLC.....	101
3.7.	Diseño de la Instalación del equipo.....	107
3.8.	Punto de conexión para la alimentación de agua desmineralizada	107
3.9.	Selección de protecciones	108
3.10.	Pasos para la elaboración de una conexión intrínsecamente segura	109
3.11.	Diseño eléctrico.....	111
3.12.	Mecanismos de cerramientos y protecciones de la máquina de producción de hidrógeno	111
3.13.	Punto de conexión de descarga de hidrógeno	113
3.14.	Diseño de sistema de altermo de inyección con botellas por caída de presión.....	115
3.15.	Diseño de puntos de venteo de oxígeno e hidrógeno	115
3.16.	Implementación de funcionabilidad operativa o sistemas de gestión de procesos	116
3.17.	Diseño de rutas operativas y listas de rutinas de chequeo	117
3.18.	Propuesta de rutinas de mantenimiento periódicas de sistema.....	118
4.	DESARROLLO DE LOS PROGRAMAS DE MONITOREO Y CONTROL DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO DE HIDRÓGENO E INTERFAZ DE USUARIO EN EL SISTEMA DE CONTROL DISTRIBUIDO.....	121
4.1.	Diseño de Diagramas de flujo del control y monitoreo del sistema de control distribuido, DCS	121
4.1.1.	Evaluación de señales para el control y monitoreo del sistema de producción y control de hidrógeno para el generador	121

4.1.2.	Evaluación de señales para el control y monitoreo del sistema de producción y control de hidrógeno para el generador	122
4.1.3.	Diseño de rutinas de control para implementación de señales de alarmas y disparo	122
4.1.3.1.	Despliegue de Alarma	122
4.1.3.2.	Ventana Alarma	123
4.1.3.3.	Filtros de alarmas	124
4.1.3.4.	Tipos de alarmas	126
4.2.	Implementación de interfaces de usuario para el monitoreo y control de sistema de producción de hidrógeno	126
4.3.	Implementación de graficas de control y manejo de alarmas	127
4.3.1.	Diseño de rutinas de disparo seguro para el sistema de producción de hidrógeno y enfriamiento del generador eléctrico.....	130
4.3.2.	Diseño de parámetros de trazabilidad, selección de variables y gráficas de control de hidrógeno de alta pureza en base de datos en servidores del sistema de control distribuido	139
4.3.3.	Selección de variable de control para ser monitoreadas y almacenadas en base de datos de servidores del DCS.....	140
5.	ANÁLISIS ECONÓMICO Y FINANCIERO DE LA PREFACTIBILIDAD DEL PROYECTO	145
5.1.	Análisis de costos operacionales previo a la implementación	145
5.1.1.	Costos del hidrógeno.....	145
5.1.2.	Costo de insumos utilizados habitualmente.....	145

5.2.	Costo de oportunidad por pérdida de generación por falta de disponibilidad de hidrógeno.....	147
5.3.	Costo de oportunidad por pérdida de generación por falta de disponibilidad de hidrógeno.....	147
5.3.1.	Costo del equipo y transporte e impuestos de exportación.....	147
5.3.2.	Costo del equipo y transporte e impuestos de exportación.....	148
5.3.3.	Costos de mantenimiento anual	149
5.4.	Análisis financiero	152
5.4.1.	Definición del valor actual neto del proyecto o VAN.....	152
5.4.2.	Definición de la tasa de retorno de inversión del proyecto, TIR.....	153
5.4.3.	Comparación técnica de la implementación	155
	CONCLUSIONES.....	163
	RECOMENDACIONES	165
	BIBLIOGRAFÍA.....	167

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Orientación de los dominios magnéticos en un laminado de acero al silicio	2
2.	Detalles de construcción de bobinado de un estator	3
3.	Construcción de núcleo del estator de un generador eléctrico.....	3
4.	Construcción de núcleo del estator de un generador eléctrico.....	4
5.	Generador eléctrico de características típicas para ser enfriado por hidrógeno de alta pureza.....	6
6.	Generador Diagrama de purga de aire con CO ₂ instalado en la carcasa del generador eléctrico	10
7.	Generador Diagrama de purga de aire con CO ₂ instalado en la carcasa del generador eléctrico	12
8.	Generador eléctrico de características típicas para ser enfriado por hidrógeno de alta pureza.....	13
9.	Diagrama de ingreso de CO ₂ a la carcasa del generador eléctrico para purga el H ₂	14
10.	Diagrama de ingreso de CO ₂ a la carcasa del generador eléctrico para purga el H ₂	16
11.	Sistema de lubricación y aceite de sellos de alta pureza	17
12.	Sistema de lubricación y aceite de sellos de alta pureza	18
13.	Enfriamiento por aire y agua	22
14.	Enfriamiento por hidrógeno	23
15.	Enfriamiento Curva de capacidad de generador General Electric 197932 y 197933	25

16. Enfriamiento Curva de capacidad de generador General Electric 197932 y 197933	30
17. Enfriamiento Curva de capacidad de generador General Electric 197932 y 197933	32
18. Enfriamiento Curva de capacidad de generador General Electric 197932 y 197933	34
19. Console manager.....	35
20. Software Veditor, creador de entornos de control.....	38
21. Software D/3® Manager	39
22. Fuentes de poder y PMCs redundantes	41
23. Software D3Edit.....	42
24. Configuración de variables en bases de datos del D/3®	43
25. Pantalla de D3Edit, editor de las bases de datos	45
26. Edición de un programa que se cargara a PCM	46
27. Lazo de control cerrado	49
28. Manómetro de 0 a 100 Bar	51
29. Linealidad de una RTD PT100.....	56
30. Precisión en puntería.....	57
31. Sensibilidad de una RTD PT 100.....	59
32. Exactitud	60
33. Actuador eléctrico de corriente alterna, con controles de posición y torque para válvula	63
34. Diagrama esquemático de una válvula actuadora neumática.....	64
35. Electrólisis por medio de una solución de hidróxido de potasio como potenciador	68
36. Esquema del funcionamiento del sistema industrial de producción de hidrógeno de alta pureza	70
37. Celda de combustible de membrada de intercambio de protones	76
38. Simbología utilizada en el sistema P&ID	82

39.	Señales de monitoreo de la producción de hidrógeno de alta pureza..	87
40.	Señales de monitoreo de la producción de hidrógeno de alta pureza..	88
41.	Sistema 8000 I/O	91
42.	Conexión del 8000 I/O.....	92
43.	Esquema de conexionado de módulos 8000 I/O.....	93
44.	Módulo NT8101-AI-TX, configuración interna	94
45.	Significado de la configuración de un módulo de I/O	95
46.	Esquema de comunicación del sistema D/3®.....	96
47.	Terminales para Modulo 8000 I/O.....	97
48.	Conexionado de sensores a terminales módulos 8000 I/O.....	99
49.	Configuración de parámetros desde el D3 Architect	102
50.	Editando el nodo de comunicación BAG2	103
51.	Configurado el mapeo de señales en el software EthernetMPC I/O configuration.....	104
52.	Configuración de mapeo de señales de mapeo en el protocolo Ethernet/IP Clase 3.....	105
53.	Pantalla de control, PVN	106
54.	Diseño de nuevo sistema de suministro de hidrógeno de alta pureza a las carcasas de los generadores eléctricos.....	107
55.	P&ID del sistema de producción de hidrógeno de alta pureza.....	114
56.	Configuración de alarmas del sistema D/3®.....	124
57.	Criterios de selección del tipo de alarma.....	125
58.	Iniciando el modelado de pantalla.....	128
59.	Implementación de pantalla de control y monitoreo de producción de hidrógeno	129
60.	Pantalla en línea para el control y monitoreo de producción de hidrógeno, GRA FROD2016	130
61.	Apertura del software RSLogix 5000 desde la barra de inicio de programas de Microsoft™ Windows ®.....	131

62.	Archivo para modificar en software de control	132
63.	Seleccionando archivo en formato ACD para edición.....	132
64.	Agregando comentario a programación escalera.	133
65.	Adición de texto de referencia en programación tipo escalera	134
66.	Implementación de variables de control.....	136
67.	Transfiriendo variables de campo a variables del PLC	137
68.	Rutina de verificación de alarmas y disparos.....	137
69.	Rutina de monitoreo y comparación de variables de proceso	138
70.	Rutina final de disparo del sistema de generación de hidrógeno de alta pureza	139
71.	Abriendo base de datos de variables de proceso	140
72.	Configuración de variable para monitoreo de tendencias	141
73.	D3 Architec – Build	142
74.	Añadiendo variable al sistema de monitoreo de tendencias	143
75.	VersaTrent, visualizando las variables de control del sistema de hidrógeno.....	144
76.	Comparativo de gastos de hidrógeno por compra local.....	148

TABLAS

I.	Clasificación de sensores por tipo	50
II.	Criterios de interpretación del coeficiente de correlación.....	53
III.	Tabulación de datos en medición RTD PT100	54
IV.	Relación entre tecnologías de actuadores.....	62
V.	Consumo de agua desmineralizada y energía eléctrica en función de la producción de hidrógeno de alta pureza	79
VI.	Consumo de energía eléctrica en función de la producción de hidrógeno de alta pureza	80
VII.	Mapeo de alarmas digitales, tipo BIT del sistema HMXT 50.....	83

VIII. Mapeo de señales de salida analógicas tipo entero correspondientes del Generador de Hidrógeno de alta pureza	84
IX. Mapeo de señales de entrada analógicas de nivel, % de humedad, presión, pureza, explosividad y voltaje, del tipo entero correspondientes del Generador de Hidrógeno de alta pureza, Teledyne	85
X. Mapeo de señales de entrada analógicas de temperatura tipo entero correspondientes del Generador de Hidrógeno de alta pureza	86
XI. Definición de la codificación de los instrumentos de medición.....	89
XII. Codificación de terminales de módulos 8000 I/O	98
XIII. Clasificación de señales de entrada módulos 8000 I/O	100
XIV. Clasificación de señales de salida módulos 8000 I/O	101
XV. Normativas de seguridad industrial para el buen manejo de los equipos de producción de hidrógeno de alta pureza.....	108
XVI. Normativas de protección eléctrica para equipos del generador de hidrógeno	111
XVII. Programación de mantenimiento del sistema de producción de Hidrógeno Teledyne	119
XVIII. Datos de implementación de protección en PLC.....	135
XIX. Gastos operacionales de los sistemas de hidrógeno propuestos	146
XX. Resumen de mantenimiento sugerido por cada tecnología	149
XXI. Costo por mantenimiento anual	150
XXII. Costo por mantenimiento periódico e inversión inicial.....	151
XXIII. Criterios de aceptación del VAN.....	153
XXIV. Costo de implementación de sistemas auxiliares	155
XXV. Gastos de implementación del generador de hidrógenos de alta pureza	156
XXVI. Cálculo de TIR.....	157
XXVII. Cálculo del VAN del proyecto	157

XXVIII.	Gastos anuales por consumos de los sistemas de producción de hidrógeno de alta pureza.....	158
XXIX.	Gastos de operación y mantenimiento a 15 años	159
XXX.	Costos por insumo proyectados a 15 años.....	159
XXXI.	Costos totales proyectados anualmente	160
XXXII.	Comparativo proyectado de evaluación del ahorro del proyecto	160

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
4-20 mA	Esta es una señal estándar de corriente usada proporcionalmente a una variable física para representar señales de medidas o salidas de control de procesos.
CO₂	Dióxido de carbono.
GPH	Galones por hora.
GPM	Galones por minuto.
KVA	Unidad de potencia aparente que equivale a 1.000 VA.
mm	Milímetro.
mm	Elemento químico nitrógeno.
nm	Nanómetro.
MW	Unidad de medida de potencia que equivale a 1 millón de watts.
O₂	Elemento químico oxígeno.

ppb	Partes por billón, medida de concentración de una sustancia.
ppm	Partes por millón, medida de concentración de una sustancia.
pH	Medida de acidez o alcalinidad de una disolución.
r	Coefficiente de correlación, es una medida específica que cuantifica la intensidad de la relación lineal entre dos variables.
µS/cm	Micro Siemens sobre centímetro, medida de conductividad.
°C	Escala de temperatura nombrada como grados Celsius.
°F	Escala de temperatura nombrada como grados Fahrenheit.

GLOSARIO

AI	Por sus siglas en inglés, Analog Input, en español, señal de entrada analógica.
Anión	ión que tiene carga negativa y procede de un elemento negativo
AO	Por sus siglas en inglés, Analog Output, en español, señal de entrada analógica.
ASME	Por sus siglas en inglés, American Society of Mechanical Engineers, en español, Asociación de ingenieros mecánicos de Estados Unidos.
AS-i	Por sus siglas en inglés, Actuator Sensor Interfaz.
<i>Backup</i>	Equipo o sistema de respaldo
Bar	Una unidad de presión del sistema
ConMan	Consola del sistema de control distribuido ConMan D/3®.
ControlLogix	Controladores de sistema automatismo de la compañía Allen-Bradley.

ControlNet	Red de control abierta, de la compañía Allen-Bradley.
D/3®	Sistema de control distribuido propiedad de la empresa Novatech ®.
DCM	Por sus siglas en inglés, Display Control Modules.
DCS	Por sus siglas en inglés, Distributed Control System, en español, Sistema de control distribuido.
DH+	Es una red de área local diseñada para admitir programación y mensajería remotas entre computadoras y controladores.
DI	Por sus siglas en inglés, Digital Input, en español, señal de entrada digital.
<i>Debug</i>	Término utilizado para referirse a un sistema depurador de un programa.
DO	Por sus siglas en inglés, Digital Output, en español, señal de salida digital.
InstAlarm™	Sistema de control de alarmas del sistema de control distribuido D/3®.

I/O Flex	Módulos remotos de control, incluyen entradas y salidas tanto analógicas como digitales, pertenecientes a la empresa Allen Bradley.
Profibus	Estándar de comunicaciones para bus de campo.
EBIM	Por sus siglas en inglés, Ethernet Bus Interfaz Modules, en español modulo ethernet de interfaz de bus comunicación.
Electrólisis	Proceso químico por medio del cual una sustancia o un cuerpo inmersos en una disolución se descomponen por la acción de una corriente eléctrica continua.
EPN	Por sus siglas en inglés, External Point Name, en español, nombre externo de la variable, que se almacena y configura en la base de datos del sistema de control distribuido de NovaTech D/3®
Ethernet	Estándar de redes de área local para computadores con acceso al medio por detección de la onda portadora y con detección de colisiones
EthernetMPC I/O	Software de configuración de múltiples protocolos de comunicación de sistemas de control.

Ferromagnético	Material compuesto de hierro y aleaciones de otros metales magnéticos que se utilizan para el diseño y constitución maquinas eléctricas.
Fieldbus	Protocolo industrial de redes informáticas utilizados para el control industrial en tiempo real, estandarizado como norma IEC 61158.
FT	Por sus siglas en ingles Flow Transmitter, en español transmisor de flujo.
Hardware	Conjunto de componentes físicos de los que están compuesto los dispositivos de control.
Hardware 16000	Familia de módulos remotos de campo de la empresa Novatech ®.
Hardware 8000	Familia de módulos remotos de campo de la empresa Novatech ®.
<i>Hardware Ethernet I/O</i>	Dispositivos remotos de adquisición de datos y/o control de procesos comunicados mediante el protocolo ethernet.
LAN	Por sus siglas en inglés, Local Area Network, en español, Red de Área Local.
HART	Es el acrónimo en ingles de Highway Addressable Remote Transducer, este es un protocolo que agrupa

la información digital sobre la señal analógica típica de 4 a 20 mA DC.

Hidrógeno	Elemento químico de número atómico 1, el más ligero de todos y el más abundante en el universo.
Hidrólisis	Formación de un ácido y una base a partir de una sal por interacción con el agua.
Higrómetro	Medidor de humedad en el aire.
HIHI	Nivel de alerta, de un valor alto alto de una variable de control.
HMXT Generator	Generador de hidrógeno de alta pureza, producido por la compañía Teledyne.
HOGEN®	Marca registrada de Proton Energy Systems Inc., para generadores de hidrógeno de alta pureza.
I/O	Señales de entrada y salida de un controlador lógico programable.
Joule	Unidad de trabajo, energía y cantidad de calor del Sistema Internacional.
Ladder	Lenguaje de programación para controladores lógicos programables.

LEL	Por sus siglas en inglés, Lower Explosive Limit, en español refiriéndose al límite Inferior de Inflamabilidad y explosividad.
LO	Indicador de alarma, la variable alcanza un valor bajo.
LOLO	Indicador de alarma, la variable alcanza un valor bajo bajo.
Manómetro	Instrumento para medir la presión de los fluidos y gases.
Modbus Plus	Versión extendida del protocolo Modbus y privativa de Modicon, es un protocolo de comunicación diseñado para permitir a equipo industrial tal como Controladores Lógicos Programables.
Modbus/TCP	Controlador lógico programable, de la compañía Schneider Electric.
Modicon	Controlador lógico programable de la compañía Scheneider Electric.
Mux	Circuito combinacional de múltiples entradas y una única salida.
NEC	Por sus siglas en inglés, National Electric Code.

NFPA	Por sus siglas en inglés, National Fire Protection Association, en español, institución de Normalización de Estados Unidos referente a los sistemas de combate de incendios.
Novatech®	Empresa de innovación tecnológica en diseño y fabricación de equipo de automatización.
OCM	Por sus siglas en Inglés, Operator Console Modulen.
Ohmio	Es la unidad derivada de resistencia eléctrica en el Sistema Internacional de Unidades
Osmosis inversa	Es una tecnología de purificación del agua que utiliza una membrana semipermeable para eliminar iones, moléculas, y partículas más grandes del agua potable.
PCM	Por sus siglas en inglés, Process Control Module, en español es un módulo de control de procesos.
PEM	Por sus siglas en inglés, Proton Exchange Membrane, en español es membranas de intercambio protónico.
Permeado	Agua filtrada mediante membranas impermeables.
PICMG	Por sus siglas en inglés, PCI Industrial Computer Manufacturers Group, Estándar de comunicación entre tarjetas electrónicas a través de las ranuras PCI.

PID	Es un mecanismo de control por realimentación ampliamente usado en sistemas de control industrial, utilizando control proporcional, integral y diferencial.
PLC	Por sus siglas en Ingles, Programmable Logic Controller, en español, controlador lógico programable.
Proton	Empresa productora de sistemas de generación de hidrógeno de alta pureza.
PVN	Consola de operación de la empresa NovaTech®.
PSI	Por sus siglas en Ingles, Pound-force per-Square Inch, en español, libras fuerza por pulgada cuadrada.
P&ID	Sistema de elaboración de diagramas de proceso.
Rack	Estante o alojamiento de varios módulos de un controlador.
RO	Por sus siglas en ingles Reverse Osmosis, en español Osmosis Inversa.
Rotámetro	Es un caudalímetro industrial que se usa para medir el caudal de líquidos y gases.
RSLogix	Software destinado a la creación de los programas del autómatas de la empresa Allen-Bradley.

RTD	Por sus siglas en inglés, Resistance Temperature Detector, es un detector de temperatura resistivo.
S88	Estándar de direccionamiento de control de procesos, ANSI/ISA-88.
SCF/H	Pie cúbico normal por hora.
SEL	Compañía de tecnología Schweitzer Engineering Laboratories
Silicio	Es un no metal sólido que se utiliza en la industria del acero como componente de las aleaciones.
Slot	Posición física específica para el alojamiento de un módulo de control.
Software	Conjunto rutinas que permiten a los dispositivos electrónicos realizar determinadas tareas.
Solenoide	Bobina formada por un alambre enrollado en espiral sobre una armazón cilíndrica, que se emplea en diversos aparatos eléctricos.
Switch	Interruptor en inglés
Teledyne	Empresa productora de sistemas de generación de hidrógeno de alta pureza.

Termopar	Instrumento industrial utilizado para la medición de temperatura, formado por la unión de dos metales, generalmente utilizado en condiciones de alta temperatura.
TI 505	Controlador lógico programable, de la compañía Siemens.
TIR	Tasa de retorno de inversión.
TotalVision®	Software manejador de pantallas del sistema de control distribuido del D/3®.
Transductor	Dispositivo que tiene la función convertir una manifestación física de energía relacionada a una variable y suministrar otra energía de diferente naturaleza siendo esta medible y manejable.
Trifásico	Es un sistema de producción, distribución y consumo de energía eléctrica formado por tres corrientes alternas monofásicas de igual frecuencia y amplitud.
VAN	Valor actual neto.
VersaTrend™	Control de tendencias del sistema de control distribuido D/3®.

RESUMEN

La producción y el control automatizado del sistema de enfriamiento de hidrógeno de alta pureza son herramientas vitales para una planta de generación de energía eléctrica, que utiliza esta tecnología de enfriamiento, ya que presenta mucha eficiencia en función de la transferencia de calor, tanto por la versatilidad y disponibilidad de producción, así como también manejo seguro de este gas.

Dadas las características comerciales de nuestro País, es justo mencionar que al poseer un sistema de producción en sitio se logran minimizar los riesgos de transporte de este gas en carretera, también se minimizan los costos de operación de una planta de generación de energía eléctrica con esta tecnología.

En esta investigación se evalúa la implementación de un sistema de control distribuido, por sus siglas en inglés, DCS, integrado a un control para un sistema de producción de hidrógeno de alta pureza, y se buscara comprobar la hipótesis de que se tiene mayor prefactibilidad por medio de un sistema de producción por hidrólisis alcalina del agua desmineralizada.

OBJETIVOS

General

Proporcionar los detalles técnicos para la implementación de un sistema de generación de hidrógeno mediante la electrólisis alcalina, realizando un análisis de la factibilidad económica de implementación de un sistema de producción de hidrógeno de alta pureza, y planteando las condiciones de operación y mantenimiento del sistema de generación de hidrógeno de alta pureza mediante hidrólisis alcalina del agua desmineralizada.

Específicos

1. Dar a conocer los principios de electrólisis con agua desmineralizada para la generación de hidrógeno, los cuales permitirán al lector realizar una implementación similar para otro campo de aplicación.
2. Desarrollar la Ingeniería necesaria para la instalación de un generador de hidrógeno mediante la electrólisis alcalina de agua desmineralizada, en términos de su impacto en la mejora de la eficiencia de intercambio calórico, como también en la mejora de la versatilidad operacional de la Planta.
3. Desarrollar un estudio de costo – beneficio para identificar la factibilidad de la implementación y determinar la tasa de retorno de la inversión de dicho proyecto.

4. Implementar un sistema de monitoreo y control remoto entre el sistema de control distribuido o DCS, y la electrónica del equipo propuesto en la instalación, incluyendo el mapeo de señales de los PLCs, así como las gráficas de control para el personal operativo de la Planta.
5. Evaluar las ventajas y desventajas de los sistemas de producción de hidrógeno mediante electrólisis alcalina y las otras tecnologías con este mismo propósito existentes en el mercado.
6. Elaborar planos de proceso e instrumentación, P&ID o Planos de instrumentación y tubería necesarios, así como modificar los existentes para documentar apropiadamente la instalación del generador de hidrógeno. Al mismo tiempo se realizarán los cálculos eléctricos correspondientes para la instalación independiente de la fuente de alimentación según las normas internacionales de instalaciones eléctricas intrínsecamente seguras.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de enfriamiento con hidrógeno de alta pureza proporcionan al generador eléctrico un enfriamiento de mucha eficacia, logrando así pérdidas muy bajas por disipación de calor. Sin embargo, en Guatemala es aún complicado el procedimiento de compra, traslado y/o logística de suministro de este gas, y dadas las características explosivas del hidrógeno en condiciones de baja pureza es necesaria la inyección continua del gas, el monitoreo y control en línea, para así mantener siempre las condiciones seguras. Los beneficios del enfriamiento por hidrógeno de alta pureza condicionan a los departamentos de Operaciones y Mantenimiento en las Plantas de generación de energía eléctrica a desarrollar procedimientos y controles de ingeniería, altamente exigentes para mantener las condiciones seguras para las personas, operación e instalaciones.

Dada la alta disponibilidad que deben mantener las plantas generadoras en Guatemala de la producción de agua desmineralizada por sus procesos auxiliares, y dada la llegada de las nuevas tecnologías de producción de hidrógeno a partir de agua desmineralizada, es factible hacer un estudio de producción de hidrógeno por el método de generación de “Electrólisis Alcalina del agua desmineralizada”.

La propuesta del sistema de enfriamiento por hidrógeno de alta pureza producido en la planta busca determinar la factibilidad económica, la versatilidad operativa y de mantenimiento, y el alto estándar de seguridad industrial por medio del cumplimiento de las normas de control de gases y atmósferas explosivas.

1. CONSIDERACIONES GENERALES DE LOS SISTEMAS INTEGRADOS AL PROYECTO

1.1. Características de operación y funcionamiento de generador eléctrico General Electric

Los generadores eléctricos tienen su principio de operación en las leyes de la física, electromagnetismo y energía mecánica, dado que la corriente eléctrica se vale del movimiento de electrones, el generador eléctrico requiere de un campo magnético variante en el tiempo, logrando así encausar este movimiento de electrones en un medio conductor, y de esta manera se producirá una fuerza electromotriz, este fenómeno se lleva a cabo en la práctica mediante el movimiento de una bobina fabricada de un material conductor que está fijada en un eje por lo regular cilíndrico, haciéndose llamar este conjunto rotor eléctrico, que en pocas palabras es un electroimán giratorio que debe estar acoplado a una turbina o un motor de combustión interna, el rotor eléctrico entregará un flujo magnético cambiante en el tiempo a un conjunto de bobinas estáticas enrolladas en un núcleo ferromagnético llamado estator, este flujo magnético giratorio inducirá corrientes.

Las características de la construcción de los generadores General Electric cumplen con los estándares de eficiencia y calidad, por ejemplo, en el diseño de rotores eléctricos se usan miles de laminados con sus dominios magnéticos alineados y materiales con alta permeabilidad magnética para poder encausar de la mejor manera el flujo magnético, generalmente acero al silicio, que minimizan las pérdidas eléctricas.

Los estilos son una herramienta importante que se utilizó para facilitar el uso de la plantilla. A continuación, se presenta una figura para poder habilitar los estilos.

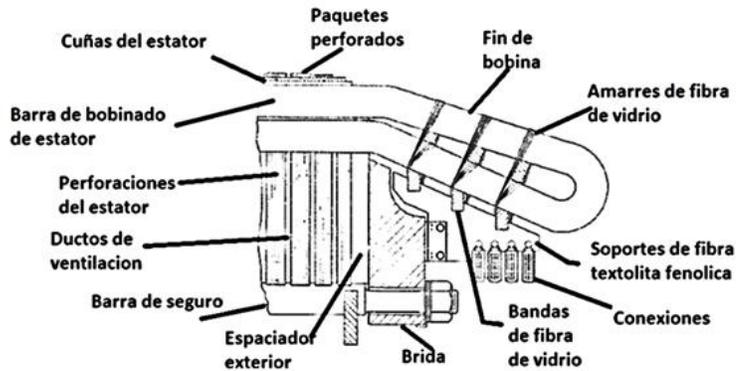
Figura 1. **Orientación de los dominios magnéticos en un laminado de acero al silicio**



Fuente: Manual M-440, operación y mantenimiento de generadores de General Electric.

Además del diseño de los laminados de acero al silicio, los constructores toman en cuenta los detalles mecánicos como el enfriamiento y la fijación segura de las bobinas en el rotor, para ello utilizan amarres seguros, cuñas y campanas de retención con el objetivo de evitar que por la enorme fuerza centrífuga las bobinas del rotor eléctrico salgan expulsadas y dañen al estator, estos detalles son más complejos en los generadores eléctricos de 2 polos ya que giran a la velocidad angular máxima al igual que su angular.

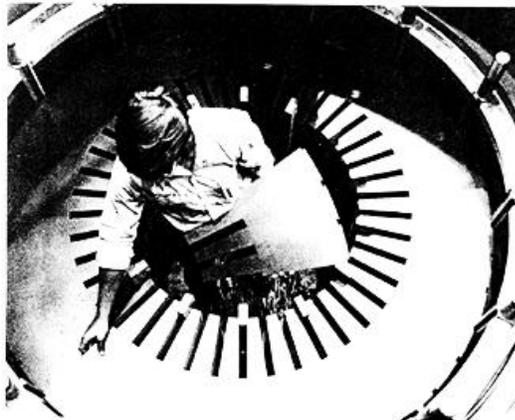
Figura 2. **Detalles de construcción de bobinado de un estator**



Fuente: Fuente: Manual M-440, operación y mantenimiento de generadores de General Electric.

Los trabajos de construcción en generadores eléctricos se realizan con carácter artesanal esto los hace altamente confiables durante la fabricación y garantizan la calidad en su operación.

Figura 3. **Construcción de núcleo del estator de un generador eléctrico**

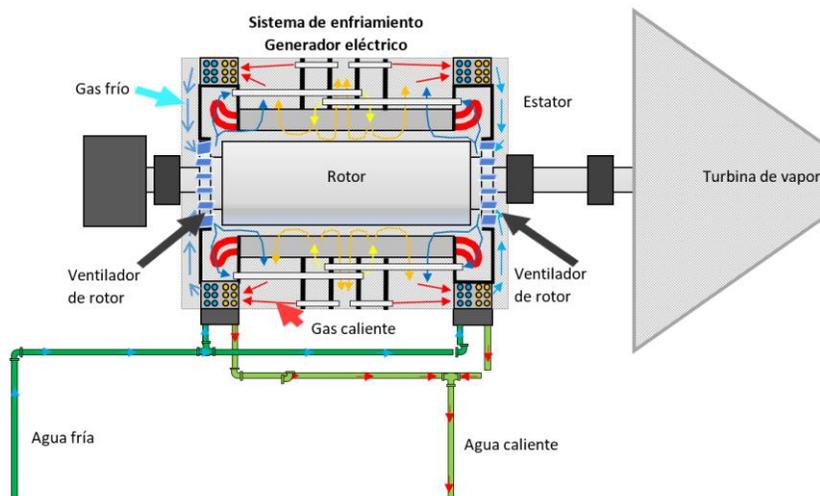


Fuente: Manual M-440, operación y mantenimiento de generadores de General Electric.

1.1.1. Descripción de sistema de enfriamiento actual para el generador

Actualmente en el diseño de las unidades generadoras serie 197932 y 197933 de marca General Electric, se posee un sistema de enfriamiento por hidrógeno, con la capacidad de contener 1.150 pies³ de volumen de gas en el interior del generador eléctrico, el sistema sella y que presuriza el generador eléctrico con gas hidrógeno, brindando así un ambiente libre de oxígeno y humedad, a la vez suministra una excelente transferencia de calor entre las bobinas del estator y rotor eléctrico por medio del gas hidrógeno, y luego este gas es enfriado utilizando un intercambiador de calor del tipo, concha y tubo, por el circula agua del sistema de enfriamiento con una temperatura cercana a la del ambiente. En la figura 4, se muestra el principio del sistema utilizado en las unidades generadoras de energía eléctrica para enfriamiento con hidrógeno.

Figura 4. **Construcción de núcleo del estator de un generador eléctrico**



Fuente: elaboración propia.

Este sistema de enfriamiento es muy eficiente ya que logra minimizar las pérdidas por calor en los devanados del estator, y a su vez prolonga el tiempo de vida del aislamiento en el generador eléctrico. Sin embargo, se tienen dos inconvenientes principales que se deben considerar son:

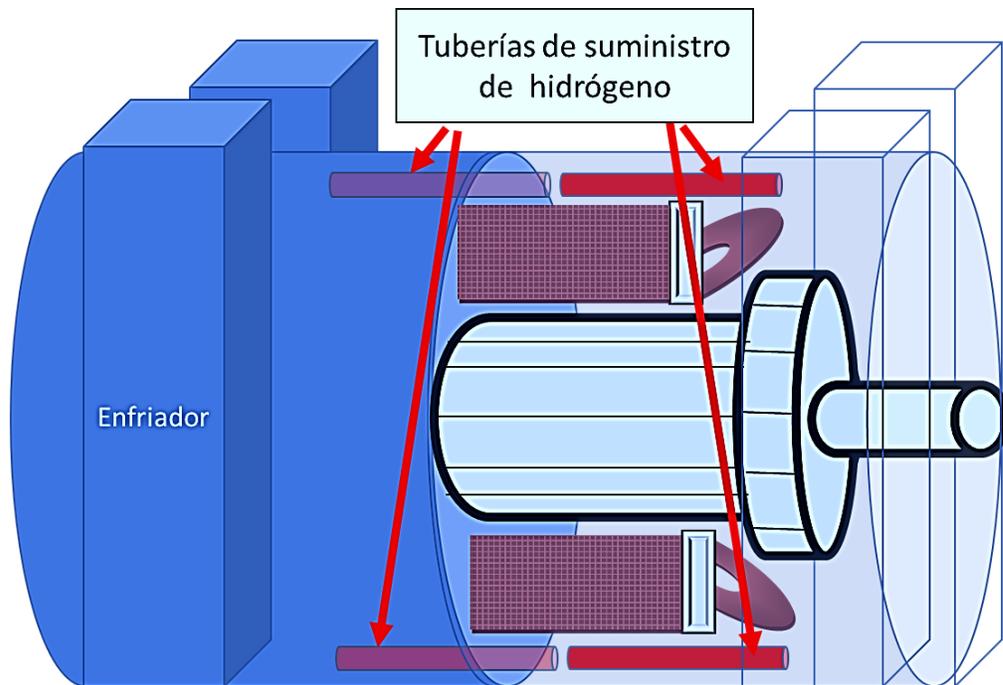
- Control perpetuo de la pureza del hidrógeno
- Garantía de Hermeticidad del generador eléctrico

La pureza de hidrógeno debe ser mayor a un 98 %, con esto se minimiza el riesgo de explosividad dentro de la carcasa del generador eléctrico. También debe mitigarse la despresurización de la carcasa a la atmosfera, o sea cero fugas de hidrógeno al exterior de la carcasa del generador eléctrico, esto presenta un muy riesgo alto ya que la cantidad de oxígeno en el aire es de 20.8 %, y esto enriquece significativamente la combustión.

En el caso de tener distintos tipos de mezclas de gases inflamables a diferentes concentraciones con respecto al aire, se torna complicado determinar la temperatura de inflamabilidad de la mezcla, y así también es difícil tomar las precauciones necesarias, el termino más confiable utilizado es limite explosivo inferior, LEL, se refiere a la concentración mínima de la mezcla explosiva en un volumen de aire, en el caso del hidrógeno en aire debe ser menor del 4,0 %.

Se utilizan constantemente dispositivos electrónicos portátiles que miden el LEL en las zonas adyacentes a los generadores eléctricos, y se tienen órdenes perpetuas de restricción los trabajos en calor en presencia de un nivel inferior de explosividad cuando está por encima del valor establecido por la norma.

Figura 5. **Generador eléctrico de características típicas para ser enfriado por hidrógeno de alta pureza**



Fuente: elaboración propia.

1.1.2. Descripción de sistema de enfriamiento Aire-Agua e Hidrógeno

En la actualidad existen varias tecnologías de enfriamiento para generadores eléctricos, esta investigación se centra en dos de ellas, aire – agua e hidrógeno – agua, ambos tienen sus características notables en la industria de generación, así como ventajas y desventajas.

- Ventajas del sistema de enfriamiento Aire – Agua:

Sistema de monitoreo y control de bajo costo.

Un bajo riesgo para la seguridad industrial, dado que no se tienen gases inflamables en la carcasa del generador eléctrico.

- Desventajas del sistema de enfriamiento Aire – Agua:

Un generador eléctrico por diseño de mayor volumen y en consecuencia un costo alto de inversión inicial.

Una vida útil menor del generador eléctrico, debido al grado de ensuciamiento y deterioro del aislamiento eléctrico, esto debido a una atmósfera ventilada por aire sin tratamiento.

Un suministro constante y un consumo alto de agua de enfriamiento.

1.1.3. Procedimiento de inyección típico de hidrógeno para generadores eléctricos

Es ilustrativo para la investigación la descripción del procedimiento de inyección de hidrógeno de alta pureza en la carcasa de un generador eléctrico así también como el procedimiento de purga del gas. Para llevar a cabo el procedimiento de manejo de gases dentro del generador eléctrico de deben considerar los siguientes procedimientos:

- Arranque del sistema de aceite de sellos
- Purga del aire de la carcasa del generador eléctrico con CO₂
- Presurización de la carcasa del generador eléctrico con Hidrógeno.
- Purga o barrido de hidrógeno utilizando CO₂ para eliminación de riesgo de explosividad en presencia de hidrógeno.

1.1.4. Arranque del sistema de aceite de sellos

Se debe arrancar una de las bombas de lubricación para así también suministrar el flujo de aceite a la válvula de control de presión de sellos que a su vez abastecerá una película de aceite a los deflectores cercanos a los cojinetes del generador eléctrico, y esta hará un sello dinámico que evitará que el hidrógeno de alta pureza escape de la carcasa del generador eléctrico.

Se debe verificar que la válvula de control de presión de aceite de sellos esté regulando adecuadamente, esta medición se visualiza en los manómetros ubicados en los extremos de la carcasa del generador eléctrico, o sea lado colector y lado acoplamiento con la turbina, esta presión debe estar comprendida entre 4.5 a 6.5 PSI arriba de la presión de hidrógeno inmerso en la carcasa, por ejemplo si se está inyectando hidrógeno a la carcasa del generador eléctrico a una presión de 15 PSI entonces la presión de aceite de sellos debe estar entre 19.5 a 21.5 PSI, esto garantizará la hermeticidad del sistema, una presión de aceite mayor a lo establecido será contraproducente ya que podrá exceder el flujo a través de los deflectores anegando los drenes y pudiendo ingresar aceite al interior de la carcasa del generador eléctrico, por lo cual es necesario el monitoreo operativo y lo importante de mantener la el desempeño perpetuo, el sistema de vigilancia del generador eléctrico enfriado por hidrógeno de alta pureza de General Electric contempla alarmas por medio de sensores de alto nivel uno para determinar si se filtró aceite al interior, en el diseño de la carcasa están contempladas las cavidades captadoras.

1.1.5. Purga del aire de la carcasa del generador eléctrico con CO2

Preparar el equipo portátil para análisis del porcentaje de pureza del CO2 en aire, colocando el analizador de CO2 en aire en serie a la salida del venteo de la carcasa.

Verificar que la válvula de salida del cabezal de suministro de hidrógeno está cerrada, es muy importante considerar que no se puede mezclar el aire y el hidrógeno de alta pureza en ningún momento.

Proceder a abrir la válvula en la línea de alimentación de CO2 a la carcasa del generador.

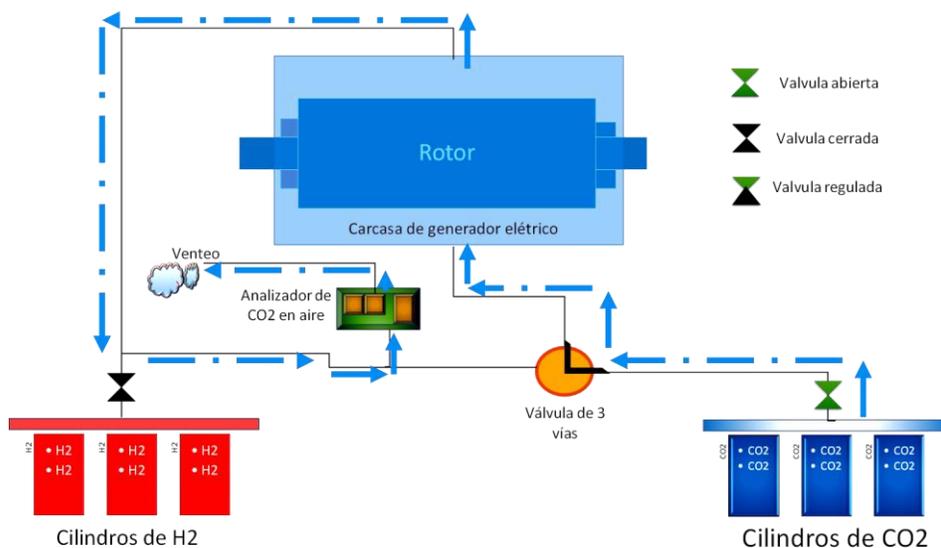
Abrir la válvula en la línea superior de venteo o expulsión el aire del generador, el volumen de CO2 desplazará al aire fuera de la carcasa del generador eléctrico, por densidades el CO2 ingresará por abajo y el aire se evacuará por los ductos superiores.

Habilitar los cilindros contenedores de CO2 necesarios para completar el volumen de la carcasa del generador eléctrico y no exceder en una presión mayor de 20 PSI y mantener el flujo en 50 pies cúbicos por minuto de CO2 durante el llenado.

Verificar la indicación de pureza de CO2 en aire en la línea de venteo por medio del analizador de gases portátil, y descargar CO2 hasta que el porcentaje de aire sea menor del 20 %.

Verificar el momento en el que se complete la purga de aire, entonces se debe cerrar la válvula de venteo y también cerrar la válvula de suministro de CO₂ a la carcasa del generador eléctrico. Durante esta operación los cilindros contenedores de hidrógeno ya sea del tipo comercial o suministro de hidrólisis alcalina deben de estar listos para ser descargados a la carcasa del generador eléctrico, en el momento de finalizar las purgas.

Figura 6. **Generador Diagrama de purga de aire con CO₂ instalado en la carcasa del generador eléctrico**



Fuente: elaboración propia.

1.1.6. Presurización de la carcasa del generador eléctrico con Hidrógeno

Abrir levemente la válvula de admisión de hidrógeno de alta pureza para permitir que una pequeña cantidad de este gas entre al analizador de H₂ en CO₂.

Verificar que el sistema de válvulas esté rectificado adecuadamente, ya que por densidades el hidrógeno de alta pureza ingresará por la parte superior de la carcasa y este evacuará al CO₂ por la parte inferior.

Conectar el analizador portátil de hidrógeno en CO₂ se serie a la tubería de venteo, que para este caso es la tubería que se conecta a la parte inferior de la carcasa del generador eléctrico y que se dirige una zona lejana libre de tránsito y calor para su disipación.

Abrir la válvula de suministro de hidrógeno de alta pureza a la parte superior de la carcasa del generador eléctrico. El hidrógeno desplaza el CO₂ a través de la línea de venteo hacia la atmósfera.

Ajustar la presión de hidrógeno entre 2 y 5 PSI arriba de la presión actual de la carcasa del generador eléctrico esto por medio del regulador.

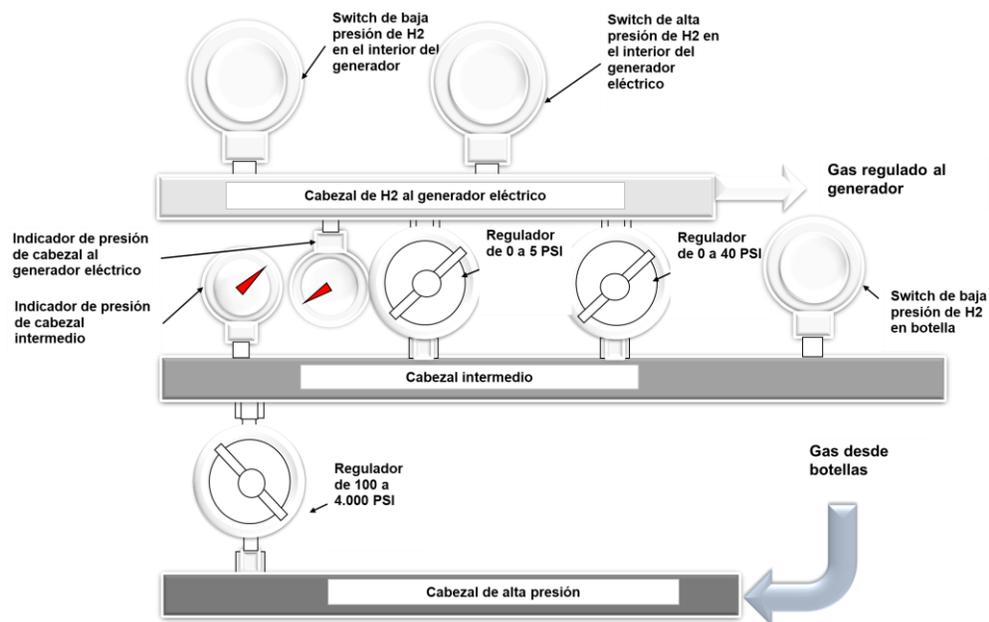
Hay que considerar que se deben descargar alrededor de 200 pies cúbicos de hidrógeno de alta pureza en un tiempo aproximado a 10 minutos este caudal puede visualizarse en le rotámetro del analizador de pureza de la mezcla de H₂ en CO₂ colocado en serie al analizador.

Continuar descargando hidrógeno de alta pureza a la carcasa del generador eléctrico hasta que el analizador portátil presente una lectura mayor al de 98 % de H₂ en CO₂.

de la carcasa del generador eléctrico, dicho desplazamiento irá evacuando al hidrógeno y este por ser más liviano ira hacia arriba de la carcasa, este proceso es parecido al desplazamiento del aire, sin embargo, ahora se desplazara hidrógeno por lo que el riesgo es distinto.

Sistema de control manual de presión de hidrógeno de alta pureza al generador eléctrico

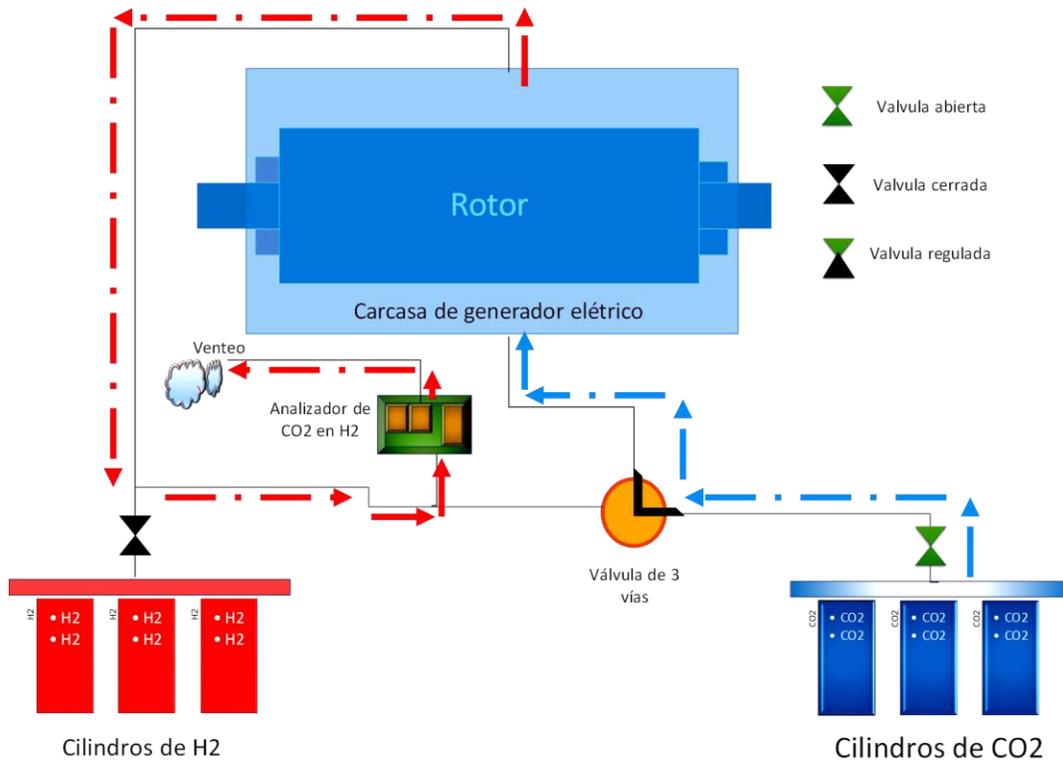
Figura 8. **Generador eléctrico de características típicas para ser enfriado por hidrógeno de alta pureza**



Fuente: elaboración propia.

Se debe verificar en el analizador en serie a la línea de venteo o purga que la pureza de CO₂ en H₂ alcanza el 95 %.

Figura 9. **Diagrama de ingreso de CO2 a la carcasa del generador eléctrico para purga el H2**



Fuente: elaboración propia.

1.2. Clasificación de sistemas auxiliares para la operación de generadores eléctricos

Los sistemas auxiliares para la producción de hidrógeno por hidrólisis alcalina son compatibles comúnmente a algunos ya preinstalados en plantas termoeléctricas, entre estos equipos auxiliares están:

- Sistemas de enfriamiento con agua cruda.
- Sistema de aceite de sellos para minimizar fugas de hidrógeno.
- Sistemas de producción de agua desmineralizada.
- Sistemas de control distribuido, DSC.
- Sistema de enfriamiento.

1.2.1. Sistema de enfriamiento con agua cruda por medio de intercambiadores de calor

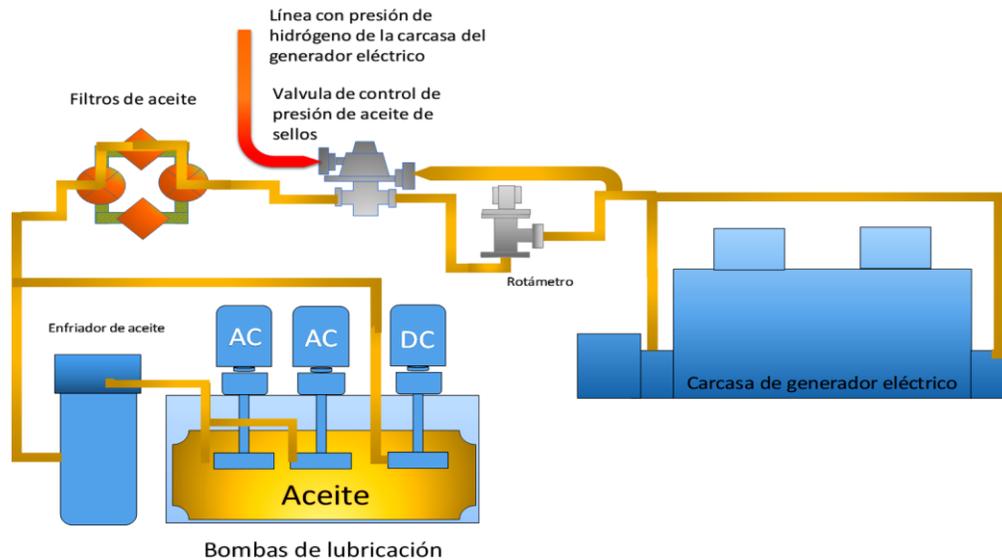
El sistema de enfriamiento que utiliza agua cruda es el más usado, ya que es económicamente viable para plantas generadoras pequeñas o que aun utilizan tecnologías muy antiguas, estos sistemas también son usados para múltiples propósitos como lo son:

- Enfriamiento en sistemas de lubricación
- Sistemas de enfriamiento para aires acondicionados a nivel industrial
- Sistemas de enfriamientos en condensadores de turbinas de vapor

1.2.2. Sistema de aceite de sellos para minimizar fugas de hidrógeno

Los sistemas de sellos evitan que por el eje del rotor del generador eléctrico se fugue el gas inmerso en la carcasa, para ello se crea una cortina entre el eje del rotor y sistemas estáticos de retención fijados a la carcasa para evitar que se escape, en muchos casos puede ser un sistema derivado del sistema de lubricación y controlado en función de la presión del gas, en otras tecnologías posee un sistema independiente de control de presión de aceite de sellos.

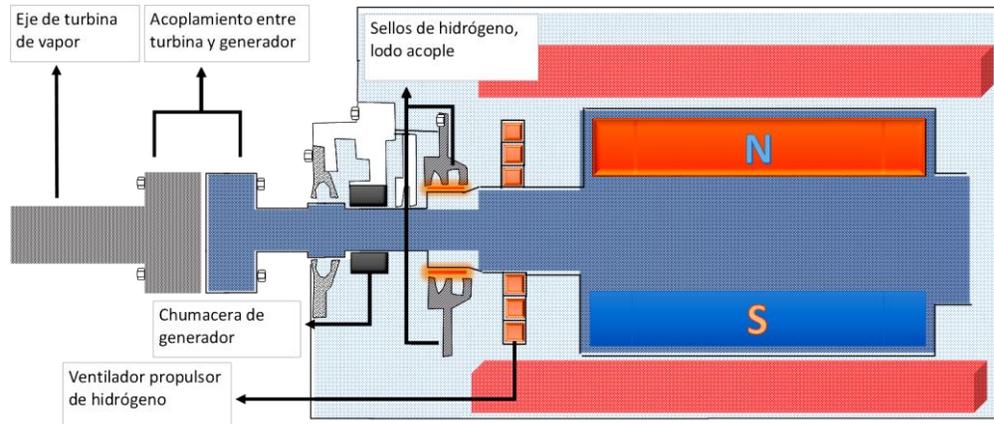
Figura 10. **Diagrama de ingreso de CO2 a la carcasa del generador eléctrico para purga el H2**



Fuente: elaboración propia.

Al elaborar una cortina de aceite se logra evitar la fuga del gas y también se imposibilita que se despresurice la carcasa del generador eléctrico, se tienen sellos en ambos extremos de la carcasa del generador eléctrico, estos se conocen como “lado final de turbina” y “lado colector del generador eléctrico”.

Figura 11. **Sistema de lubricación y aceite de sellos de alta pureza**



Fuente: elaboración propia.

1.2.3. **Sistema de producción de agua desmineralizada o DM**

En los sistemas convencionales de producción de agua desmineralizada se llevan los siguientes procesos de filtrado y tratamiento:

- Osmosis inversa
- Tren de anión y catión

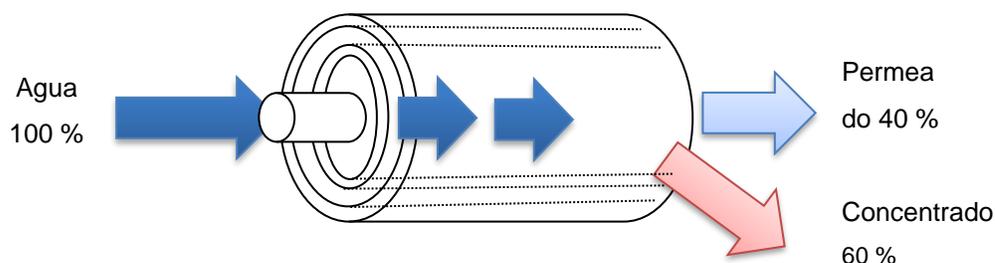
1.2.3.1. **Plantas de osmosis inversa o RO**

Los sistemas de filtración de agua de muy alta eficiencia están compuestos básicamente por una carcasa y membranas de filtración impermeables. Por medio del flujo a alta presión a través de las membranas impermeables se logra separar los sólidos del agua en una muy buena cantidad, y así separar los sólidos o dureza que están presentes en el agua cruda, a la salida de la osmosis inversa, se tiene el agua conocida como permeado, y el rechazo de sólidos y agua no

filtrada se conoce como concentrado, este último fluido es de muy mala calidad para los procesos industriales y es más usada en riego por su alto contenido en minerales.

Es recomendable no exceder un flujo mayor de permeado de 40 %, y un flujo no menor de 60 % de concentrado, con esto se extenderá la vida útil de las membranas.

Figura 12. **Sistema de lubricación y aceite de sellos de alta pureza**



Fuente: elaboración propia.

1.2.3.2. **Tren de anión, catión y lechos mixtos**

Los trenes de resinas aniónicas, catiónicas y de lechos mixtos son muy usados en las industrias de producción de agua desmineraliza, ya que cada resina posee una polaridad eléctrica particular, por lo que son capaces de atrapar a los minerales con polaridad opuesta. Y de esta manera es posible minimizar la cantidad de minerales que son transportados, pasando así de agua cruda o permeada a agua desminelizada de muchísima mejor calidad.

Las resinas aniónicas y catiónicas tienen cavidades microscópicas, en estas se alojan las partículas que tengan polaridad a la opuesta a la resina. Pero ya

que las cavidades son finitas también así lo es su capacidad de filtrado, por lo que es necesario un proceso de regeneración de dicha resina, o sea que un químico fuerte la limpie, este es un paso de aplicación de químicos para liberar los minerales y restablecer la resina a su estado inicial, para esto los trenes o columnas aniónicas, catiónicas o lechos mixtos deben contar con sistemas de suministro de químico para este proceso.

Una desventaja de esta tecnología es su consumo alto de químicos para la limpieza o regeneración de los trenes o columnas, y además el riesgo de manejo de estos químicos para las personas involucradas y la complicada disposición de los desechos, los cuales deben ser neutralizados químicamente antes de ser dispuestos.

El lecho mixto consiste de una columna o tren, que posee una mezcla de resinas aniónicas y catiónicas, y es capaz de eliminar tanto los minerales con polaridad positiva como negativa, y son usados para dar un acabado final a un sistema de desmineralización de agua, y logra parámetros bastante buenos en función de la calidad del agua, en nuestro medio los parámetros de calidad de agua desmineralizada suelen tener un contenido de sílice menor que 0.02 ppb y una conductividad eléctrica menor de 0.1 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

1.3. Sistemas de lubricación utilizados en los turbogeneradores

El sistema de lubricación de un turbogenerador es vital, ya que mantiene la operatividad, enfría los componentes, evita la corrosión de los metales, elimina la fricción de partes metálicas en movimiento, y puede ser usado para formar barreras y así hermetizar generadores eléctricos en sistemas presurizados de hidrógeno de alta pureza.

Los sistemas de lubricación poseen dos tipos de bombas de suministro de aceite, uno de estos es el sistema eléctrico trifásico regularmente en 480 voltios en corriente alterna, que es el sistema principal, y el otro una bomba de emergencia acoplada a un motor de corriente directa, regularmente alimentada por un banco de baterías en 125 voltios, este banco de baterías debe ser capaz de mantener el suministro de corriente directa al motor de la bomba para abastecer aceite durante el tiempo que el generador eléctrico pueda llegar al reposo o sea restablecido el suministro de corriente alterna a las bombas principales, frecuentemente las bombas principales están alimentadas en un centro de control de motores, que puede ser conectado a una transferencia automática de una planta de emergencia.

Algunos diseños tienen otros tipos de bombas de suministro de aceite, entre los cuales están: bomba mecánica, siendo la que suministra aceite a los sistemas mediante un juego de engranajes y está directamente acoplada al movimiento del generador eléctrico, esta bomba es capaz de trabajar cuando la máquina está en línea, sin embargo posee una desventaja, necesita una bomba auxiliar eléctrica para poder arrancar y parar de forma segura, ya que su presión es proporcional al cuadrado de la velocidad del generador eléctrico. La lógica de control de esta bomba consta de varios sensores de presión, los cuales encenderán a la bomba auxiliar cuando la bomba mecánica no logre levantar presión segura de operación, esto ocurre durante el arranque o paro, y otro switch para la bomba auxiliar cuando la bomba mecánica alcance su presión nominal.

También en otros diseños antiguos se contaba con una bomba de turbina, en el caso de las termoeléctricas a base de vapor de las primeras tecnologías, se tenía una turbina pequeña acoplada a una bomba para así proporcionar el suministro de aceite, estas están en desuso por la alta probabilidad de desboque, ya que no contaban con un sistema de regulación de velocidad adecuado.

1.4. Sistemas de enfriamiento de los generadores en función de la mejora de su eficiencia

Dependiendo de las tecnologías existentes por diseño, los tratamientos de agua, costos de fabricación, y las condiciones de insumos a planta de generación de energía eléctrica, se designa el tipo de enfriamiento a utilizar.

1.4.1. Sistemas de enfriamiento para termoeléctricas

Existen distintos sistemas de enfriamiento para generadores eléctricos, estos sistemas examinan como objetivo mantener la eficiencia en función de una temperatura baja en el generador eléctrico, para así minimizar las pérdidas por efecto Joule, entre los sistemas comunes se tiene los siguientes:

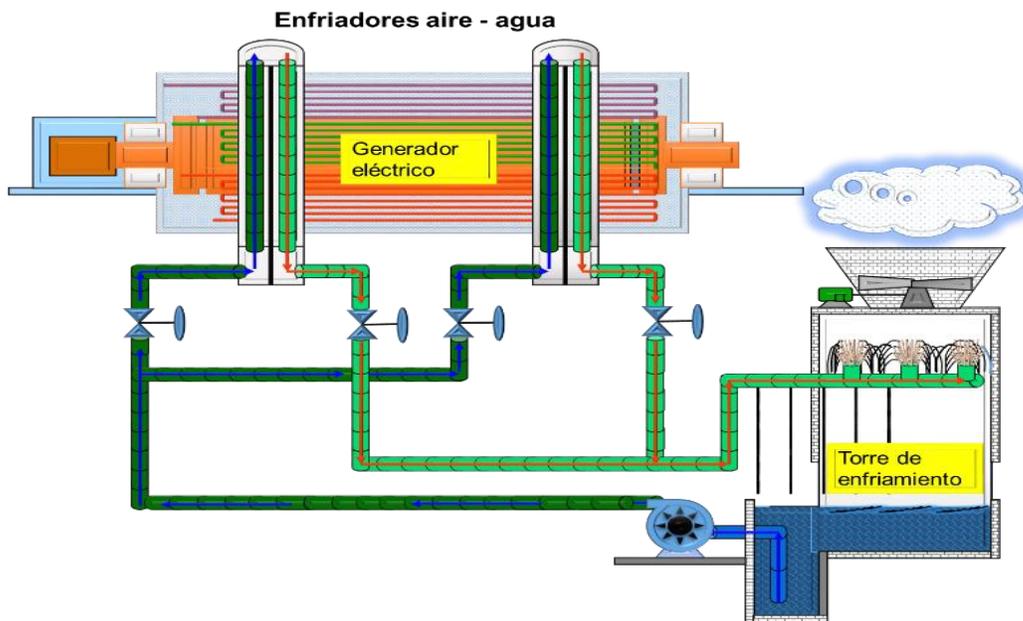
- Sistema aire-agua
- Sistema de enfriamiento por medio de agua desmineralizada aplicada a las barras conductoras
- Sistema de enfriamiento por hidrógeno de alta pureza

1.4.2. Sistemas aire y agua

Este sistema es muy básico ya que necesita un flujo de aire impulsado por palas incrustadas en el rotor del generador eléctrico, este flujo llevará el calor del rotor y estator dentro de la carcasa del generador eléctrico y luego este aire caliente se conducirá a un enfriador, en este enfriador el calor circula afuera de la tubería y en el interior de los tubos en el cual fluye agua fría, al final de intercambio calórico el aire saldrá frío de nuevo para poder seguir el ciclo de enfriamiento del generador, y el agua saldrá caliente para ser enfriada por un

sistema de tiro natural por medio de rociadores o ser enfriado por un sistema de tiro inducido en una torre de enfriamiento.

Figura 13. **Enfriamiento por aire y agua**

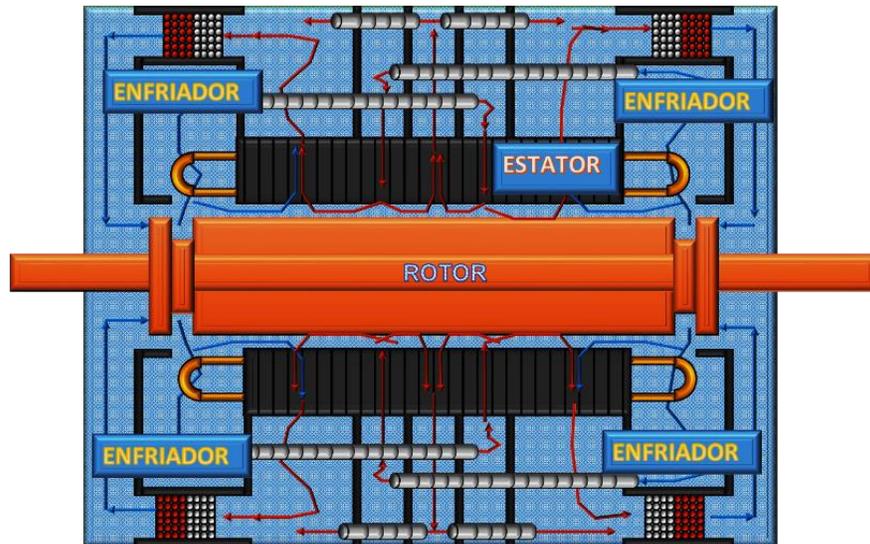


Fuente: elaboración propia.

1.4.3. **Sistemas de enfriamiento por hidrógeno de alta pureza**

Estos sistemas son de muy alta eficiencia, ya que son capaces de enfriar los devanados del rotor y generador eléctrico, y además mantienen un sistema presurizado y libre de humedad, por lo que la vida del generador se extiende largamente.

Figura 14. **Enfriamiento por hidrógeno**



Fuente: elaboración propia.

El hidrógeno es 14 veces menos denso que el aire, por lo cual su coeficiente de fricción también es menor en la misma proporción, provocando menos fricción entre los devanados del estator del generador eléctrico, adicionalmente el hidrógeno cuenta con un coeficiente de disipación térmica mayor, por lo cual se necesita operar con una pureza elevada para asegurar un enfriamiento apropiado del sistema y por ende su eficiencia de operación está dentro de los parámetros adecuados descritos por su curva de capacidad.

Adicionalmente es necesario mantener una pureza de hidrógeno por arriba del 96 % dentro del generador para evitar la concentración de oxígeno y la mezcla de ambos elementos que puedan llegar a combustionar. En términos de seguridad industrial es necesario asegurar la calidad del hidrógeno utilizado para enfriamiento.

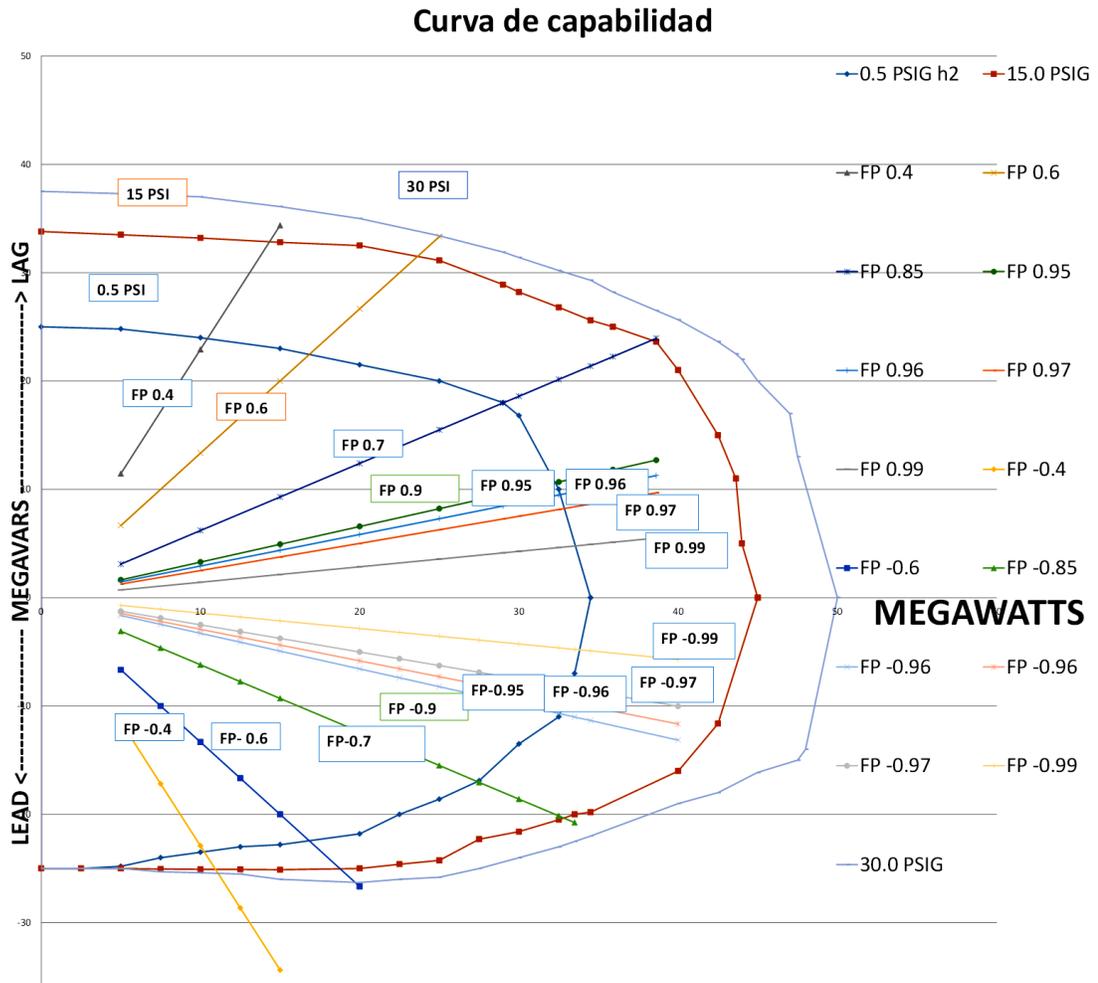
1.5. Curvas típicas de capacidad del generador eléctrico de potencia

Las curvas de capacidad de los generadores describen el comportamiento de la potencia activa y reactiva en función de su sistema de enfriamiento, y también define los límites operacionales de estas máquinas eléctricas.

1.5.1. Curvas de capacidad específicas para generadores General Electric 197932 y 197933, y su correlación en función de la presión de hidrógeno de alta pureza

El generador General Electric 197932 y 197933 tiene una curva de capacidad específica, ya que su tipo de enfriamiento es por medio de hidrógeno de alta pureza, y a continuación se describe este comportamiento en la Figura 15.

Figura 15. **Enfriamiento Curva de capacidad de generador General Electric 197932 y 197933**



Fuente: elaboración propia.

Como se ve en la gráfica anterior este comportamiento describe la potencia aparente, potencia real y presión de hidrógeno, que de mantenerse la presión dentro del área segura descrita la variable de temperatura del generador será controlada.

1.5.2. Impacto de la eficiencia de enfriamiento en los intercambiadores de calor del generador utilizando hidrógeno de alta pureza

Las pérdidas de potencia en el generador eléctrico debido a las impurezas atrapadas en el estator ocasionan un costo económico alto, contabilizado por un análisis de la rentabilidad, por lo cual es vital asegurar la pureza alta del hidrógeno ya que puede afectar directamente la eficiencia de la producción de energía y por ende se minimiza la rentabilidad por las ventas de energía.

En este tipo de generador eléctrico el hidrógeno se utiliza como medio de enfriamiento debido a su baja densidad y sus propiedades de enfriamiento superiores. Su densidad es de aproximadamente un catorceavo de la del aire a una temperatura ambiente y presión atmosférica, el uso de hidrógeno reduce las pérdidas por fricción dentro de una máquina rotativa a una pequeña fracción de las pérdidas encontradas cuando corre u opera en el aire. Para una máquina de alta velocidad como un generador eléctrico, esto resulta en un aumento en la eficiencia de carga completa de entre 1 % y 1.5 %. El hidrógeno tiene una conductividad térmica de casi siete veces más de aire, y su capacidad para transferir calor a través de convección forzada es de aproximadamente el 50 % que la del aire. Esto permite la reducción de casi el 20 % en la cantidad de material activo requerida en construcción de un generador eléctrico, por lo que el tamaño y costo físico del generador es menor.

1.5.3. Impacto de la eficiencia de enfriamiento en los intercambiadores de calor del generador utilizando hidrógeno de alta pureza

El hidrógeno mantendrá libre de humedad los devanados del generador eléctrico, por lo que la probabilidad de descargas parciales es mínima y las fallas por perforaciones de aislamiento disminuyen, además de excelentes propiedades por enfriamiento de hidrógeno de alta pureza, y favorablemente las barras y el aislamiento del generador sufren menor calentamiento. Al cumplirse el mantenimiento y/o revisiones agendadas por el fabricante el tiempo de vida del generador eléctrico se extiende aún más que en las otras tecnologías de enfriamiento.

1.6. Sistema de control distribuido

El sistema de control distribuido representa un avance en el automatismo de las plantas industriales de producción, dadas las múltiples ventajas de crecimiento o expansión a futuro, los controles redundantes y la capacidad de almacenamiento de datos históricos a largo plazo.

1.6.1. Descripción general de un sistema de control distribuido o DCS por sus siglas en ingles

Este tipo de sistema de control es muy ventajoso, por proveer vigilancia en varios lugares de la planta a la vez, puede ser expandido según los desarrollos que las plantas a futuro, además su tecnología reconoce muchos protocolos de comunicación, así como también es flexible y compatible con muchos sensores y actuadores de campo.

El DCS también tiene la ventaja de registrar en bases de datos el comportamiento en el tiempo de las variables de los procesos, lo que da una mejora a la operatividad de la planta, ya que es posible verificar las tendencias de las variables de instrumentación, con la finalidad de que el personal operativo pueda tomar las decisiones necesarias en tiempo real. Esta investigación se concentra en el sistema de control distribuido marca Novatech® D/3®.

1.6.2. Arquitectura del sistema de control distribuido, D/3®

El D/3® es una marca de sistemas de control distribuido (DCS por sus siglas en Ingles), como tal es un sistema de control de procesos, que cuenta con herramientas de desarrollo, que incluye un conjunto completo de aplicaciones de software, configuración de redes y hardware de computación. El sistema D/3® posee características de redundancia de todo el sistema y la capacidad de actualizar sin detener las operaciones de planta. Además, es el mismo sistema estudiado en esta investigación.

D/3® proporciona la visualización y acceso en tiempo real para procesar la información, el estado del equipo, estado del sistema, estado de proceso por lotes, y los registros operativos.

Además, posee funciones que facilitan informes por lotes, de producción y de cambio de turno. El sistema D/3® está preparado para funcionar con los últimos sistemas operativos de Windows, y cuenta con la configuración intuitiva, gestión y herramientas de visualización de sistemas de producción.

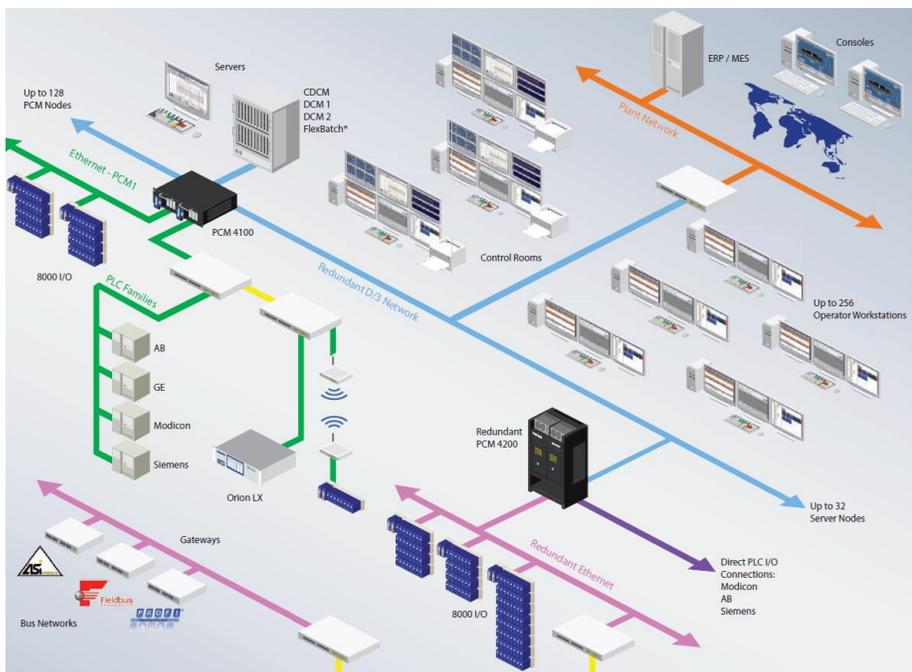
1.6.3. Red D/3®

La red D/3® consiste en DCMs, por sus siglas en inglés, Display Control Modules, y los PCMs por sus siglas en inglés, Process Control Modules. Los PCMs controlan los procesos y los DCMs recolectan los datos y ejecutan las pantallas de interfaz de usuarios por medio de consolas de operación por sus siglas en inglés, Operator Consoles. Uno de los DCMs puede ser utilizado para diseñar las bases de datos en el sistema y es nombrado el Configurador de DCMs, CDCM, por sus siglas en inglés, Configurator DCM. El CDCM, DCMs, PCMs y las Consolas de Operación están todos conectados a través de una red de comunicaciones Ethernet. Los PCMs están conectados a uno o más tipos de Familias I/O (Input/Output), que son las encargadas de recolectar datos en campo, así como interactuar con los actuadores, algunas de las familias I/O soportadas en la red D/3® son las siguientes:

- Hardware 16000
- Hardware 8000
- Hardware Ethernet I/O
- Modicon series 200
- Modicon series 800
- Modicon Quantum
- TI 505
- Modbus Plus
- DH+
- Fieldbus
- Dispositivos Profibus
- Dispositivos ControlNet
- Dispositivos de red AS-i
- Dispositivos I/O Flex

Los elementos de instrumentación, tales como los transmisores, motores, bombas, válvulas, interruptores, etc., son controlados por el PCM. Estos se conectan al PCM a través de una de las familias I/O.

Figura 16. **Enfriamiento Curva de capacidad de generador General Electric 197932 y 197933**



Fuente: D/3® Distributed Control System Overview

1.6.4. DCM

El DCM es el servidor informático que suministra información acerca de los procesos y el sistema de control, y lo traslada a la consola de operación. El DCM facilita a los operadores del cuarto de control la capacidad de modificar el proceso. Entre los cambios que puede realizar se encuentran: modificación de puntos de ajuste de variables de proceso, salidas (asignación de valores directos

a los actuadores), y límites de alarma para puntos análogos. Adicionalmente, un DCM puede ser configurado para realizar otras tareas tales como recolectar y archivar datos, desplegar datos actuales e históricos de tendencia y actualizar gráficas en displays (presentación en pantalla de control). Se puede utilizar un teclado de computador, un teclado D/3®, o un ratón y en una pantalla el Panel de control D/3® para iniciar los displays y las funciones de control desde un DCM. Además, el DCM permite a las consolas de operación tener acceso a los procesos, donde el proceso es controlado por el PCM. Por lo tanto, si un DCM fuese apagado o fallara, el control del proceso continúa por parte del PCM y puede ser visto desde cualquier DCM disponible. Ya que todos los procesos de control corren internamente en el PCM y el DCM es una herramienta para acceder visualmente a las variables de proceso.

1.6.5. CDCM

El CDCM es un servidor DCM que tiene software para diseño de base de datos para el sistema D/3®. Para cada Sistema D/3®, debe ser asignado un CDCM. Además de las funciones básicas de un DCM, el CDCM es utilizado para crear todas las bases de datos del D/3®. En el CDCM son definidas, guardadas y mantenidas las bases de datos de configuración del sistema, control continuo, y control secuencial. Una CDCM es la estación de edición de ingeniería y desarrollo del sistema D/3® que facilitan asignación de rutinas y bases de datos a los PCMS.

1.6.6. Consola de Operación

La consola de operación es también conocida como un OCM por sus siglas en Ingles, Operator Console Modulen. El OCM utiliza pantallas gráficas predefinidas y configuradas que permiten tener acceso a los procesos. Las

pantallas son generadas por un DCM y desplegadas en el OCM. El OCM puede utilizar un teclado regular, el teclado propio para el sistema D/3®, o el ratón y el panel de control en la pantalla, básicamente son utilizadas como estaciones de control que utilizan los operarios.

Los OCMs ejecutan el programa Administrador de Consola estos son los siguientes:

- ConMan
- VersaTrend™
- InstAlarm™
- TotalVision®

Figura 17. **Enfriamiento Curva de capacidad de generador General Electric 197932 y 197933**



Fuente: D/3® Distributed Control System (DCS) Product Overview.

1.6.7. PCM

El PCM es un módulo de control de proceso que es capaz de trabajar en tiempo real, y está conformado por un ordenador basado en un microprocesador

que suministra el control de la automatización para la continua operación de la planta por medio de procesos de lotes.

Cada PCM se puede conectar a una variedad de dispositivos I/O y a terminales de control de campo utilizando numerosos protocolos de comunicación. El PCM puede ser utilizado para aplicaciones que van desde menos de un centenar a varios miles de puntos I/O.

El PCM proporciona control autónomo sobre una parte del proceso de la planta, esto después que las bases de datos y programas se descargan a través de la red al PCM. El PCM realiza tareas continuas, funciones secuenciales, control por lotes, y también es capaz de comunicarse con otros nodos D/3® para suministrar control de alarmas, tendencias, y la función de visualización de los procesos.

El PCM está preparado para leer entradas desde dispositivos de campo, ejecuta algoritmos, y envía señales de salida a los procesos. Por ejemplo: se lee una temperatura por medio de un sensor en el campo y luego el comparará con un punto de ajuste de la variable de control, prontamente un cálculo es ejecutado y se cambia la salida de una válvula de vapor para hacer que la temperatura se acerque al valor del ajuste. Hay varios modelos de PCMs que varían en tamaño y capacidades, sin embargo, todos realizan las mismas funciones, y entre estas están:

- Conectarse con la instrumentación de proceso
- Recolectar datos
- Controlar procesos continuos, tal como control PID
- Control secuencial
- Generación y supresión de alarma

Figura 18. **Enfriamiento Curva de capacidad de generador General Electric 197932 y 197933**



Fuente: PMC 4100 y 4200 de Novatech.
<http://www.novatechweb.com/process-control/pcm/>

Los PCMs pueden tener microprocesadores redundantes, uno primario, y otro secundario. Los PCMs pueden ser configurados para que automáticamente entre a funcionar el microprocesador secundario en caso de que el primario fallase o no sea capaz de leer un dato crítico. El paso del mando al microprocesador secundario también se puede realizar manualmente. De no poseer PMC de respaldo y sí este fallara, las consolas de operación conectadas a los DCMs no podrán controlar el proceso.

1.6.8. Administrador de consola

La aplicación “Administrador de Consola” (por sus siglas en ingles Console Manager, ConMan) es la interfaz de navegación principal para la consola PVN. Esta inicia el panel de control ConMan que aparece en la pantalla como un panel de control flotante el cual puede ser minimizado. El panel de control puede ser

utilizado para iniciar y detener las aplicaciones de consola tales como: consolas, PVN, InstAlarm™, VersaTrend™, y TotalVision®. También maneja las peticiones del teclado D/3® y provee una barra de herramientas “en la pantalla”. Las configuraciones para el ConMan se pueden guardar y volver a utilizar según el método de trabajo del operador de cuarto de control. Las aplicaciones pueden ser configuradas para iniciar automáticamente con el ConMan.

Cuando se inicia el software ConMan este se registra dentro del DCM designado y también se inicia la consola PVN primaria. Un ConMan puede dar inicio al mismo tiempo hasta 4 consolas PVN desde un DCM. Un segundo ConMan puede iniciar otras 4 consolas desde el mismo DCM. Cada DCM puede habilitar un máximo de 8 consolas PVN.

Figura 19. **Console manager**



Fuente: extracto de pantalla de Console Manager.

1.6.9. Redundancia

Redundancia es la habilidad de duplicar una parte de un sistema, para esta configuración es necesario un componente “primario” y uno “de respaldo” o backup. Si el componente primario falla, el de respaldo puede mantener al sistema trabajando, idealmente sin perder ningún dato. Esto es conocido como una transferencia sin problemas. El sistema D/3® provee redundancia para cada

componente en el sistema hasta el último elemento de control (dispositivos de campo).

1.6.10. Ventajas de la utilización de un sistema de control distribuido en la automatización industrial

El DCS brinda a los procesos múltiples ventajas, entre estas están:

- Integración de múltiples tecnologías de control
- Diseño de interfaz de usuario amigable
- Base de datos de variables de proceso
- Visualización de variables de proceso
- Alarmas de proceso
- Tendencias de variables de proceso
- Control continuo
- Sistemas intuitivos de control
- Sistemas potentes, fiables y compactos
- Integración con otras tecnologías de control
- Automatización secuencial
- Automatización de procesos por lotes
- La redundancia de todo el sistema

1.6.11. Integración de múltiples tecnologías de control

Las ventajas de la estandarización de las tecnologías de control han permitido que muchos fabricantes puedan integrarse en diferentes proyectos de control y mantener siempre la búsqueda de la calidad y el mayor desempeño en la operación.

En el sistema D/3® se tiene la compatibilidad con todos los protocolos de comunicación y posee una estructura de configuración de red por medio del software D3 Architect y EthernetMPC I/O Configuration, para la configuración de nodos.

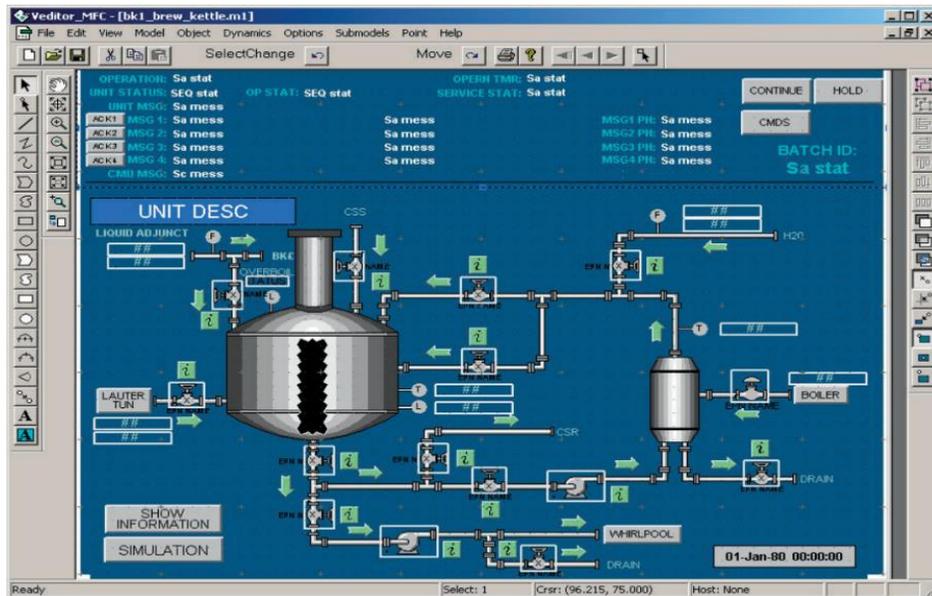
Entre los protocolos de comunicación de control que soporta el sistema D/3® están:

- Modbus TCP
- Ethernet TCP/IP Clase 1 y 3
- Allen Bradley DFI para PLC-5 y SLC
- 8000 I/O

1.6.12. Diseño de interfaz de usuario amigable

Las interfaces de control deben poseer las características que facilitan el acceso al control remoto de las variables de proceso y brindarlo a los usuarios u operadores del cuarto de control que estén autorizados, debido a ello los sistemas deben ser minimalistas y muy intuitivos para que las interacciones de los sistemas de control sean asimiladas por el operador, para el diseño de los sistemas de interfaz, para ello es usado el software Veditor.

Figura 20. **Software Veditor, creador de entornos de control**



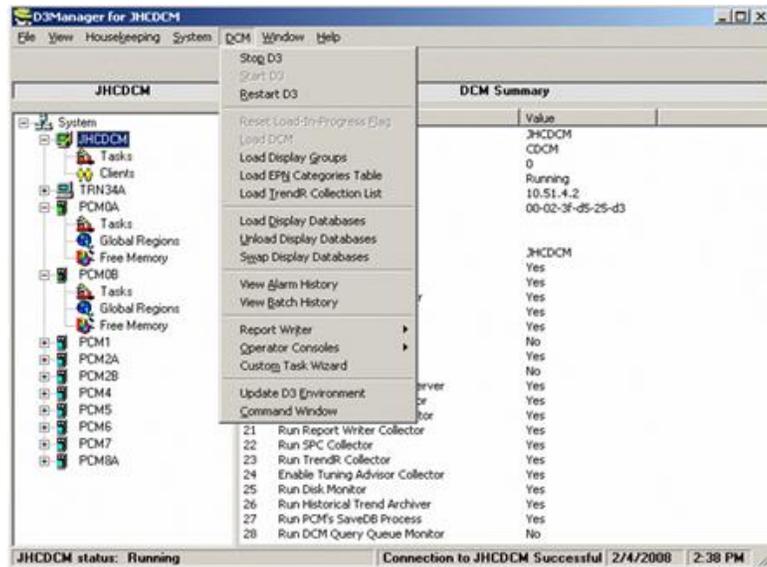
Fuente: D/3's open system architecture and Windows environment.

1.6.13. Bases de datos de variables de proceso

Cada nodo puede ser seleccionado individualmente, visto y controlado desde la ventana D/3® Manager. Al seleccionar un DCM el usuario podrá:

- Cargar los archivos de grupos al DCM
- Ver las tareas en el DCM y su Registro de Eventos
- Ver los archivos históricos de alarmas
- Ver los usuarios que han iniciado sesión en el DCM
- Detener/iniciar el D/3® en el DCM
- Ver la configuración y estado del enlace de red
- Detener las consolas

Figura 21. **Software D/3® Manager**



Fuente: Manual de operación de D/3®.

El software D3 Editor podrá crear, editar y cargar las bases de datos de las variables del sistema D/3®.

1.6.14. **D/3® Manager**

El usuario por medio del software D/3® Manager podrá seleccionar un PCM y realizar las siguientes acciones:

- Ver las tareas en el PCM y la cantidad de tiempo usado por el procesador
- Cargar/quitar bases de datos, archivos de datos, y programas
- Ver los parámetros de configuración del PCM
- Cargar las tareas del PCM
- Apagar el PCM

1.6.15. Análisis de tendencias de variables de proceso y exportación de datos a hojas de cálculo

El sistema D/3®, suministra un control de tendencias, que es una herramienta muy fiable para el análisis.

El sistema de tendencia es capaz de exportar los datos a un archivo de hoja de cálculo, en especial lo hace en formato de Microsoft Excel.

1.7. Redundancia de comunicación y control

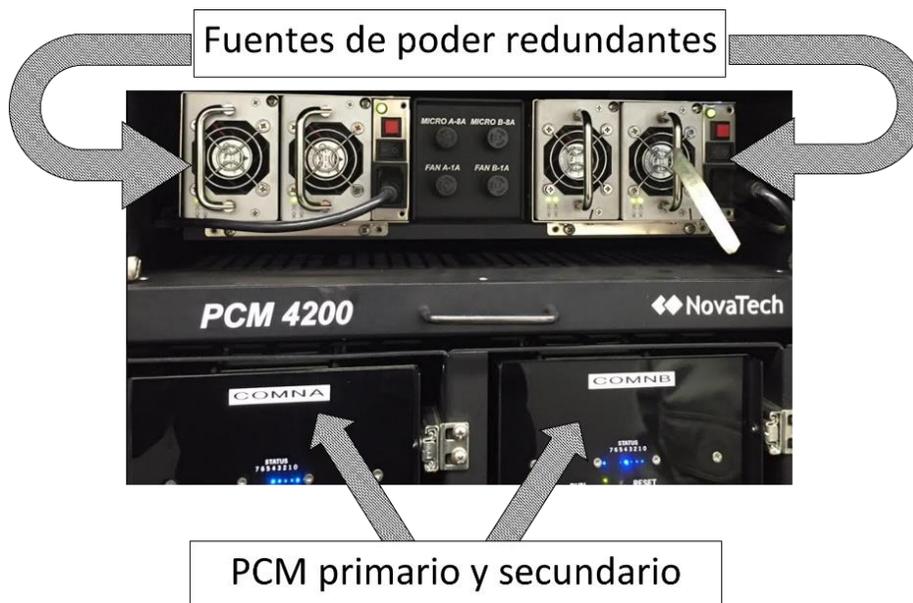
Dados los factores externos que puedan afectar el cableado de señales, es necesario utilizar un método que minimice la pérdida de comunicación sí en algún momento falla el proceso por una causa externa.

Otras formas de aumentar la fiabilidad de una señal, es aumentar la capacidad del cable, el mejoramiento de las terminales, la utilización de mejores terminales.

Para determinar el criterio de implementación de redundancia es necesario considerar la cantidad de señales o velocidades de los datos a transmitir por un canal.

Para el sistema implementado se cuenta con redundancia de procesamiento y redundancia en el sistema de suministro de energía, ya que se cuenta con dos PCMs por proceso y cada uno cuenta con dos fuentes redundantes, para que el proceso pierda completamente el control será necesario que fallen las cuatro fuentes de alimentación y los dos PCMs.

Figura 22. Fuentes de poder y PMCs redundantes



Fuente: elaboración propia.

1.7.1. Programación por rutinas predefinidas o personalizadas y mapeo de señales

Dadas las diferentes necesidades de producción hidrogeno de alta pureza y condiciones actuales de la planta, es necesario programar a medida, y para acceder a las variables es necesario el mapeo.

1.7.2. Declaración de variables de proceso

Para la declaración de las variables es necesario conocer el mapeo de señales, sus rangos de calibración, unidad de ingeniería, a continuación, se muestra como declararlas en la base de datos.

Figura 23. Software D3Edit



Fuente: toma de pantalla.

Los parámetros que debe llenar una variable en el sistema de control D/3® son los siguientes:

- Tipo de señal
- Dirección de acceso a señal física o virtual
- Unidad de ingeniería
- Rango numérico de operación
- Límites de alarmas

Figura 24. Configuración de variables en bases de datos del D/3®

```

UNDADR: NOTSPEC
IHENAB: NO
IHDTIME: 1
IHDUNITS: HRS
PROC:
;
DEF AI 81JI0001
IPN:
POLL: 5.0000
PHASE: 8
INADDR: 70JI0678 0 INPUT
MV: YES
INTYPE: AILVZ
GAIN:
OCD:
HARDFAST:
CONV: LIN
AMBS: 0
BAMBS: 0
EGU: 0.00000000 100.00000
EGUTAG: KW
SMOOTH: 0
LOGOOD: 9176
HIGOOD: 53738
SCALE: 1.0000
LODSP: 0.0000
HIDSP: 1000.0
LLIM: -5.00
LLCRIT: YES
LLIM: -5.00
LCRIT: NO
HLIM: 50.00
HCRIT: NO
HHLIM: 90.00
HHCRT: YES
RLIM: 10.0
RCRIT: NO
DLIM: 10.0
DCRIT: NO
DEAD: 0.2000
AMADR: RECEIVER
INHADR: RECEIVER
ADI: 0
CEI: 0
DESC: "HYDROG" "SKID" "POWER" " "
ALMDISP: GR1009
CRTPRI: 75
NCRPRI: 25
CATGRY: "COOLING TOWER"
IBDADR: NOTSPEC
OCDADR: NOTSPEC

```

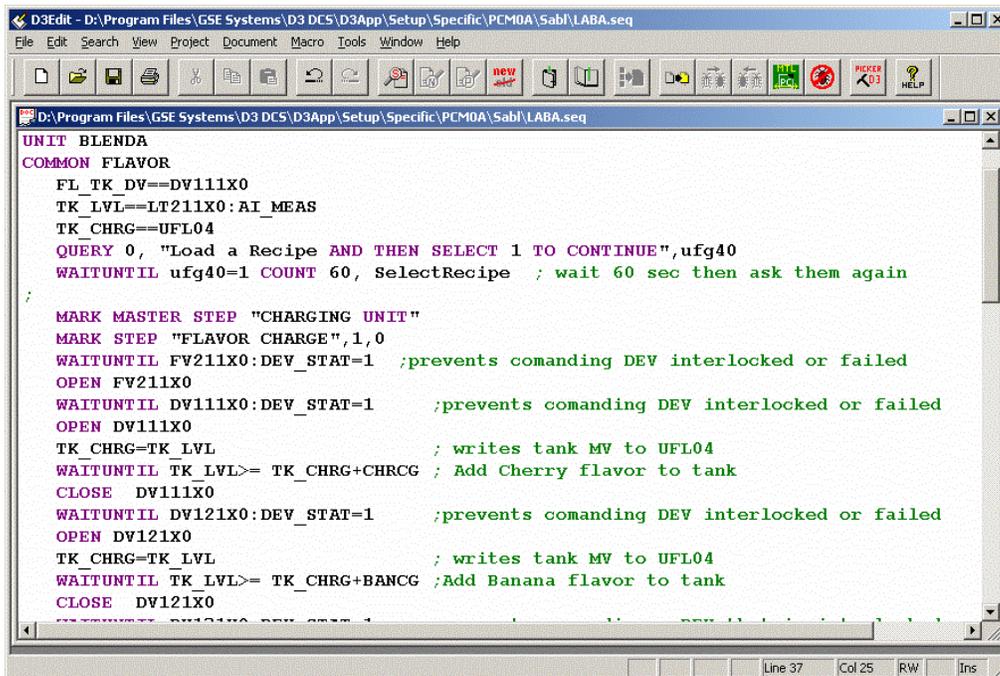
Fuente: toma de pantalla.

1.7.3. Rutinas de programación predefinidas

Declaraciones de SABL® pueden ser divididas en 10 categorías:

- Control continuo, encargado de escanear y modificar valores de procesos
- Control del temporizador, controla las variables del tipo temporizador
- Interfaz del operador, envía los mensajes del operador a las consolas
- Desplazamiento de datos, carga y controla variables
- Control del programa
- Lógica del programa
- Compilador, identifica nombres de EPN y variable de proceso
- Cadena de caracteres, manejo de cadenas de caracteres
- TrendR™, habilitar o deshabilitar grupos de tendencias, cambiar los intervalos de recolección y modificar valores de variables o parámetros de los procesos

Figura 26. Edición de un programa que se cargara a PCM



```
UNIT BLEENDA
COMMON FLAVOR
  FL_TK_DV==DV111X0
  TK_LVL==LT211X0:AI_MEAS
  TK_CHRG==UFL04
  QUERY 0, "Load a Recipe AND THEN SELECT 1 TO CONTINUE",ufg40
  WAITUNTIL ufg40=1 COUNT 60, SelectRecipe ; wait 60 sec then ask them again
;
MARK MASTER STEP "CHARGING UNIT"
MARK STEP "FLAVOR CHARGE",1,0
WAITUNTIL FV211X0:DEV_STAT=1 ;prevents comanding DEV interlocked or failed
OPEN FV211X0
WAITUNTIL DV111X0:DEV_STAT=1 ;prevents comanding DEV interlocked or failed
OPEN DV111X0
TK_CHRG=TK_LVL ; writes tank MV to UFL04
WAITUNTIL TK_LVL>= TK_CHRG+CHRCG ; Add Cherry flavor to tank
CLOSE DV111X0
WAITUNTIL DV121X0:DEV_STAT=1 ;prevents comanding DEV interlocked or failed
OPEN DV121X0
TK_CHRG=TK_LVL ; writes tank MV to UFL04
WAITUNTIL TK_LVL>= TK_CHRG+BANCG ;Add Banana flavor to tank
CLOSE DV121X0
```

Fuente: Manual de operación de D/3®.

1.7.5. Programación personalizada

En algunos de los casos existirán rutinas de programación únicas especializadas de procesos, por ello será necesario diseñar una estrategia de control a medida, para lo cual se hará uso de las herramientas de programación provistas en el sistema de control.

1.7.6. Mapeo de señales

El mapeo de señales es el método de organización de datos en una matriz de memoria de un dispositivo electrónico, en dicho mapeo se definen las

variables a almacenar, y se listan de tal manera que serán copiadas por otro dispositivo haciendo uso de los protocolos de comunicación establecidos.

En esta investigación se usa el mapeo EthernetMPC, controlador multiprotocolo, (en inglés Multi-Protocol Controller) proporciona al PCM acceso a la información en toda la planta que está disponible a través de estándar Ethernet.

Esta interfaz de I/O de Ethernet permite a un PCM basado en tecnología PICMG tener hasta 4 tarjetas de comunicación, cada tarjeta tiene la capacidad de utilizar 1 o más diferentes protocolos para comunicarse con los dispositivos en la red Ethernet. Esto permite que un PCM 4100 o 4200 tenga la capacidad de interfaz hasta con 50 nodos.

Estándar Modbus/TCP se puede utilizar para conectarse a algunos PLC Modicon y también a algunos relés de protección. Muchos protocolos adicionales se pueden conectar a la D/3®.

Antes de que un PCM pueda utilizar comunicación Ethernet I/O, debe configurarse y construir una base de datos que contenga matrices de bloques de datos. La base de datos Ethernet está diseñada para mencionar al PCM las direcciones de los nodos de cada interfaz, y también así la actividad de los bloques de datos que se deben leer y escribir en cada uno de los nodos.

1.7.7. Instrumentación industrial y controladores electrónicos para el monitoreo de señales de campo

El control se procesos requiere sensores para la toma de variables relacionadas al entorno de operación, y el actuador quien corregirá y gobernará los procesos para el correcto control, buscando que las variables de proceso

estén en los parámetros establecidos. Ambos equipos estarán informando en tiempo real al controlador quien leerá variables y tomará acciones.

1.7.8. Sensores y actuadores

Los sensores son los dispositivos de instrumentación destinados a obtener la información de campo y proporcionar la información de dichas señales a la unidad de control, con la finalidad de suministrar valores a la unidad controladora y está por medio de rutinas de programación predefinidas pueda procesar las órdenes de salida para interactuar con el proceso. Estas órdenes de salida son convertidas en señales eléctricas que se envían a un actuador que convertirá la energía eléctrica en otra forma de energía. Para simplificar se puede decir que el sensor envía información a la unidad de control, ésta la procesa y envía una orden, que recibe el actuador y se encarga de ejecutarla.

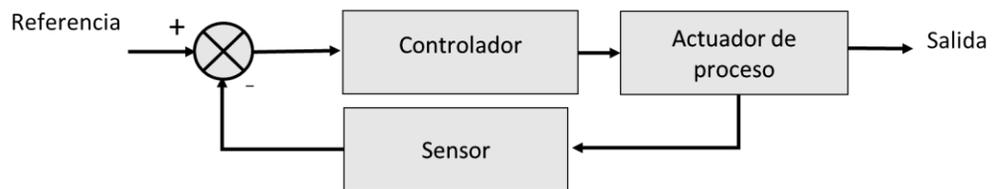
La unidad de control consiste en un microprocesador, que es un conjunto de dispositivos semiconductores encapsulados en un solo chip, cuya misión es evaluar datos y señales externas por medio de instrucciones estructuradas por una lógica de control, y en función de ellas organizar un conjunto de datos y señales que se hacen llegar al mundo físico con la finalidad de una producción automática.

1.7.9. Sensores

El sensor, o elemento de medición, es un dispositivo que convierte la variable física en otra variable manejable, frecuentemente se convierte en una señal eléctrica, estas medidas pueden ser: desplazamiento, presión o voltaje, que pueden usarse para compararlas con una referencia y obtener un criterio de control o también se puede utilizar y proporcionar un monitoreo visual para que

los operarios registren el comportamiento de los procesos. Este elemento sensor está en la trayectoria de realimentación del sistema en lazo cerrado. El punto de ajuste del controlador debe convertirse en una entrada de referencia con las mismas unidades que la señal de realimentación del sensor o del elemento de medición.

Figura 27. **Lazo de control cerrado**



Fuente: elaboración propia.

También se define a los sensores como dispositivos capaces de detectar magnitudes físicas o químicas, llamadas variables de instrumentación, y convertirlas en variables eléctricas medibles, las variables de instrumentación pueden ser: temperatura, presión, flujos, pH, etc.

1.7.10. Tipos de sensores

Entre los tipos de sensores se tienen distintas tecnologías y distintos tipos de medición, a continuación, se detallan los criterios.

Tabla I. **Clasificación de sensores por tipo**

Tipo	Descripción
Mecánicos	Se utilizan para medir cantidades como posición, forma, velocidad, fuerza, torque, presión, vibración, deformación y masa
Eléctricos	Medición de voltaje, corriente, carga y conductividad
Magnéticos	Medición de campo, flujo y permeabilidad magnética
Otros tipos	Acústicos, ultrasónicos, químicos, ópticos, de radiación, láser y de fibra óptica

Fuente: elaboración propia.

1.7.11. Características de un sensor

Los sensores deben cumplir con una serie de requisitos que logren asegurar su fiabilidad al usuario, debe garantizar por medio de su medida la calidad de los procesos, dados esos requerimientos los sensores deben cumplir con las siguientes características:

- Rango de medida
- Linealidad
- Precisión
- Sensibilidad
- Repetitividad
- Exactitud

1.7.12. Rango de medida

Es el límite superior e inferior de la capacidad de medida del instrumento. Por ejemplo, un termómetro que en su escala inferior marca -10 °C y en su escala

superior marca 100 °C, entonces este tendrá un rango de medida de -10°C hasta 100 °C.

Figura 28. **Manómetro de 0 a 100 Bar**



Fuente: elaboración propia.

1.7.13. Linealidad

Es la capacidad de un instrumento de medición para suministrar una indicación que tenga una relación lineal con una magnitud determinada y que sea distinta de una magnitud de influencia. Esta es una de las principales características buscadas en un instrumento, ya que determina el comportamiento estable en su rango de medida y depende de su curva de calibración, en la realidad se suele expresar un valor porcentual de máxima desviación respecto a la salida lineal de instrumento patrón de calibración.

Para determinar la linealidad de un instrumento se suele utilizar el método matemático conocido como regresión matemática que buscan modelar el comportamiento el sensor.

La regresión lineal es una herramienta para la investigación de una variable dependiente, regularmente se muestra en el eje “Y” y está en función de una variable independiente “X” y busca describir su comportamiento al describir la ecuación matemática de una línea recta.

$$Y = ax + b \quad (1)$$

Donde “b” es el valor de intercepción del eje “Y” cuando la variable independiente es cero. Y “a” es el valor de la pendiente de la recta, calculando “a” de una tabulación de datos medidos se obtiene la siguiente ecuación.

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n X_i Y_i - \sum_{i=1}^n X_i \sum_{i=1}^n Y_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n X_i^2 - (\sum_{i=1}^n X_i)^2}} \quad (2)$$

Y la ecuación que define el valor “b” de que representa la pendiente de la recta está definida en la siguiente ecuación.

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i - a \sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (3)$$

Cálculo del valor “b” de intercepción del eje “Y” cuando la variable independiente es cero.

El coeficiente de Correlación “r” fue desarrollado por Carl Pearson y es un indicador de la interdependencia de la relación entre las variables “X” y “Y”, puede asumir valores entre -1 y 1, esto indica una correlación negativa y positiva, esto indica el nivel de dispersión de las medidas.

Tabla II. **Criterios de interpretación del coeficiente de correlación**

Criterios de análisis de correlación	
$r = 1$	Correlación positiva perfecta, es decir que indica una dependencia total
$0 < r < 1$	Existe una correlación positiva
$r = 0$	No existe relación lineal, no necesariamente son variables independientes ya que pudiera existir una relación no lineal
$-1 < r < 0$	Existe una correlación negativa
$r = -1$	Existe una correlación negativa perfecta, y el índice indica una dependencia total entre las dos variables llamada relación inversa, esto quiere decir que cuando una de ellas aumenta, la otra disminuye en proporción constante

Fuente: elaboración propia.

El coeficiente de correlación “r”, se calcula mediante la siguiente formula:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (4)$$

Por ejemplo, tenemos un sensor de temperatura del tipo PT100, al tener una serie de datos tabulados por medio de mediciones es factible calcular la linealidad del instrumento.

Tabla III. **Tabulación de datos en medición RTD PT100**

Medición	°C	OHMIOS
1	0	101
2	10	105
3	20	109
4	30	112
5	40	118
6	50	121
7	60	125
8	70	128
9	80	131
10	90	135
11	100	140
12	110	145
13	120	147

Fuente: elaboración propia.

Al aplicar las ecuaciones anteriores se calculan los valores “a”, “b” y “r”.

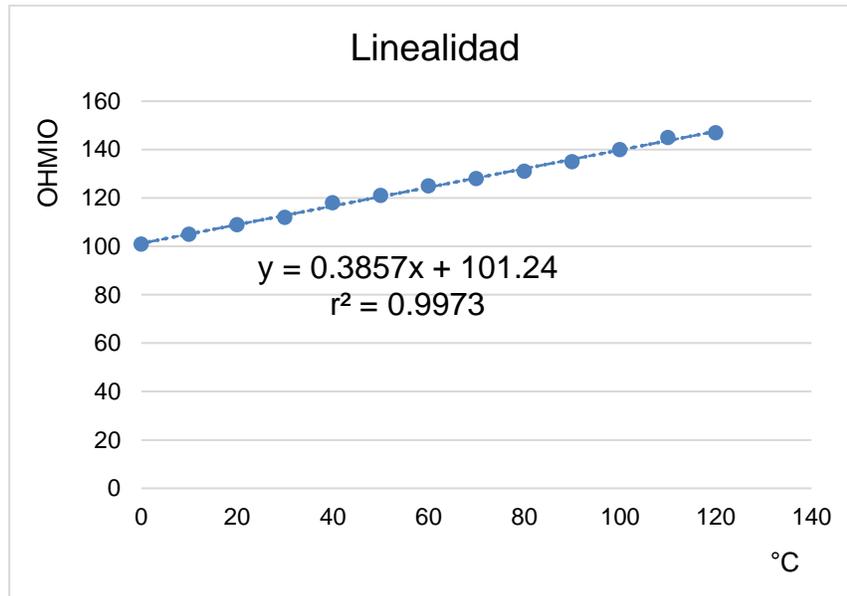
$$a = \frac{1.352.520 - 1.261.260}{845.000 - 608.400} = \frac{91.260}{236.600} = 0,3857 \text{ Ohmio/°C.}$$

$$b = \frac{1.617 - 300,86}{13} = \frac{1.316.14}{13} = 101,241 \text{ Ohmios.}$$

$$r = \frac{7.020}{(\sqrt{18.200^2})(\sqrt{2.715^2})} = \frac{7.020}{7.029,5377} = 0,9986$$

En algunas literaturas y hojas de cálculo hacen referencia al cuadrado del coeficiente de correlación, o sea que se hace referencia a: $r^2 = r \times r$, en el caso del ejemplo anterior, $r^2 = 0,9986 \times 0,9986 = 0,9973$.

Figura 29. **Linealidad de una RTD PT100**



Fuente: elaboración propia.

1.7.14. Precisión

Puede definirse como el nivel de dispersión de valores obtenidos en mediciones repetitivas de una magnitud. Cuando el valor resultante de la desviación de la dispersión es bajo se dice que la precisión es alta, por lo que se puede decir que la precisión es similar a la buena puntería.

También se dice que la precisión es la cualidad de un instrumento que tiende a dar lecturas muy próximas unas a otras. Un instrumento puede tener una mala exactitud, pero una buena precisión. Por ejemplo, un termómetro con un rango de medida de 0 a 100°C, este puede tener una buena exactitud marcando 50°C o a media escala de medición, pero puede dar diversas lecturas de 65,5°C, 65,7, 66,0°C efectuadas a lo largo del tiempo en las mismas condiciones de

servicio, para una temperatura de 70°C. Por lo que se puede decir que tendrá un error de 5°C, pero los valores medidos son muy próximos unos con otros, con una dispersión máxima 0,5°C.

Por ejemplo, un medidor de temperatura que su rango de medición de 0 a 400 °C, con una precisión de +/- 0.5 %, tendrá un error a máxima escala de +/- 2.0°C, que es igual a +/-0.5 % x 400°C, y si la medida en el instrumento marca en un instante 100°C, entonces se dice que el valor estará entre 99.5°C y 100.5°C.

Los instrumentos están diseñados por los fabricantes para ser precisos, y por medio de la calibración periódica se ajustan para que sean exactos.

Figura 30. **Precisión en puntería**



Fuente: elaboración propia.

1.7.15. Sensibilidad

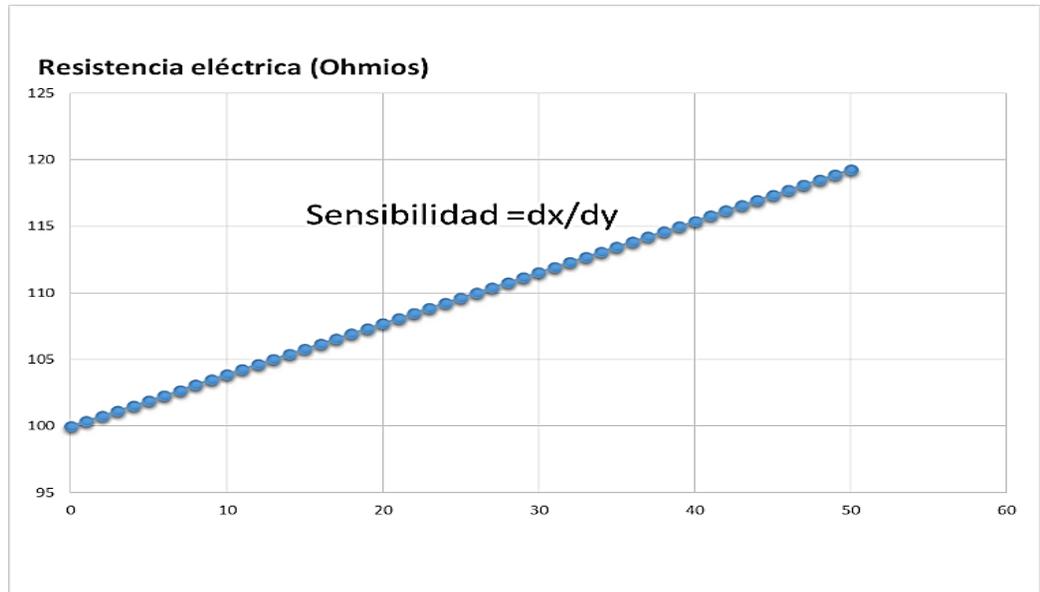
La sensibilidad de un instrumento es la relación entre el incremento de la señal de salida o de la lectura de la medida y el incremento de la variable que lo origina, después de haberse alcanzado el estado de estable y se representa matemáticamente por la siguiente ecuación:

$$Sensibilidad = \frac{\frac{(Lectura\ final - Lectura\ inicial)}{Rango\ de\ señal}}{\frac{(Valor\ final\ de\ variable - Valor\ inicial\ de\ variable)}{Rango\ de\ variable}} \quad (5)$$

Por ejemplo, si en un transmisor electrónico de presión con un rango de medición de 0-100 PSI, y en el hipotético caso que la presión suba de 60 a 65 PSI y la señal de salida eléctrica del transmisor de presión es de 13,60 a 14,45 mA c.c., la sensibilidad es el cociente:

$$Sensibilidad = \frac{(65\ PSIG - 60\ PSIG)/(20\ mA - 4\ mA)}{(14.45 - 13.60\ mA)/(100\ PSIG - 0\ PSIG)} = 0.9411\ mA/PSI$$

Figura 31. **Sensibilidad de una RTD PT 100**



Fuente: elaboración propia.

1.7.16. Exactitud

La exactitud es la cualidad de un instrumento que tiende a dar lecturas próximas al valor verdadero de la magnitud real de medida. Este valor de medida es muy cercano al auténtico.

La exactitud define los límites de los errores cometidos cuando el instrumento se emplea en condiciones normales de servicio durante un período de tiempo determinado. La exactitud se procura en términos de inexactitud, es decir, un instrumento de temperatura con un rango de medición de 0 a 100 °C, con temperatura del proceso de 100 °C y que marca 99,98 °C se aproxima al valor real en 0,02 °C, o sea tiene una inexactitud de 0,02 °C por cada 100 °C.

Figura 32. **Exactitud**



Fuente: elaboración propia.

1.7.17. Repetitividad

Es la capacidad de reproducción de las posiciones de la aguja (en caso de un indicador analógico) del índice o de la señal de salida del instrumento (en caso de ser eléctrico o electrónico), al medir repentinamente valores idénticos de la variable en las mismas condiciones de servicio y en el mismo sentido de variación, recorriendo todo el rango. A mayor repetitividad, es decir, a un menor valor numérico (por ejemplo, si en un instrumento es 0,05 % y en otro es 0,005 %, este segundo tendrá más repetitividad), los valores de la indicación o señal de salida estarán más concentrados, es decir, habrá menos dispersión y una mayor precisión. Los factores que pueden afectar la repetitividad de un instrumento de medición pueden ser los siguientes:

- Calidad del mantenimiento del instrumento de medición
- Tipo de sujeción del instrumento
- Vibración
- Cambio de temperatura y dilatación de los materiales
- Falla en la selección de la calidad o aplicación del instrumento

1.7.18. Actuadores

Los controladores industriales se complementan con fuentes de potencia para el movimiento de elementos finales de intervención de los procesos, estas fuentes comúnmente son fluidos presurizados o una fuerza electromotriz. Los actuadores también pueden clasificarse, según el tipo de energía que utilizan para su desempeño, como son los neumáticos, hidráulicos, eléctricos o electrónicos.

Los actuadores son todos aquellos dispositivos que nos sirven para llevar a cabo las actividades de fuerza a partir de un fluido de control o energía eléctrica. Por ejemplo, un líquido hidráulico puede controlar la apertura de una válvula de control de una turbina de vapor con precisión y fuerza.

El actuador neumático o hidráulico posee un regulador de presión del fluido motriz, un convertidor de señal de control a presión. Secuencialmente el controlador envía la señal que comúnmente puede ser eléctrica o electrónica, y esta se transforma por medio de dispositivos de conversión de señales, estos pueden utilizar servo válvulas, bobinas de control, válvulas piloto, posicionadores de baja potencia y ser capaces de amplificar su fuerza por medio del fluido motriz y entrega una salida necesaria para activar a un elemento final de control como lo pueden ser las válvulas, dámperes, cilindros etc.

Tabla IV. **Relación entre tecnologías de actuadores**

Medio de transmisión	Actuador Neumático	Actuador Eléctrico	Actuador Hidráulico
Fuerza generadora de movimiento	Aire comprimido	Energía eléctrica	Presión de líquido hidráulico
Elemento motriz	Émbolo, pistón o veleta	Motor eléctrico	Émbolo, pistón o veleta
Medio de transmisión de Fuerza	Eje directo o cremallera	Reductor de velocidad	Eje directo

Fuente: elaboración propia.

1.7.19. Actuadores Eléctricos

Son unos de los más usados y poseen un amplio campo de aplicación dada la disponibilidad de energía eléctrica existente, básicamente dependen de motores eléctricos y bobinas, y frecuentemente son complementados con el uso de reductores de velocidad mecánicos que incrementan su torque.

Entre los actuadores eléctricos se tienen los siguientes tipos de tecnología:

- Corriente alterna, cuando se requiere torque en él posicionamiento
- Corriente continua, utilizados frecuentemente en movimientos simples
- Motores paso a paso, utilizados en posicionamientos en lazos de control abiertos
- Servomotores, por su construcción pueden acelerar con mayor rapidez y con un buen circuito de control son muy confiables

Figura 33. **Actuador eléctrico de corriente alterna, con controles de posición y torque para válvula**



Fuente: Flowserve L120 Multi-turn electric valve actuator.
Limitorque ® L120, Installation operation Maintenance

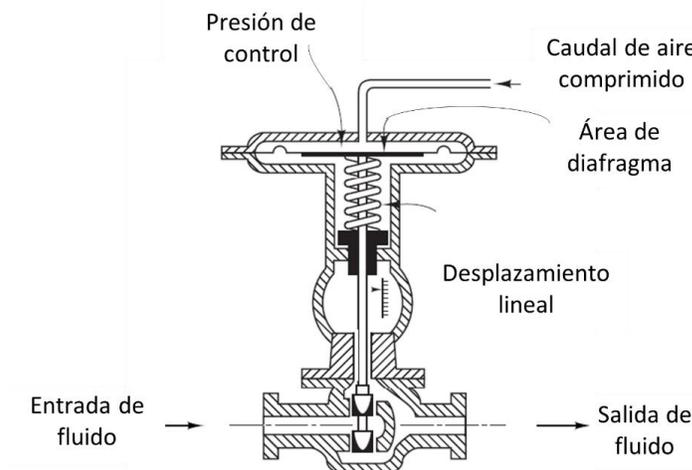
1.7.20. Actuadores neumáticos

Este tipo de actuador es aquel que utiliza aire comprimido como medio motriz, que es capaz de desarrollar los trabajos a alta velocidad y eficiencia, para un trabajo automático o semiautomático, y además con bajo costo.

Estos actuadores utilizan fuelles, diafragmas, cilindros para poder generar el movimiento. Son de muy buena respuesta en precisión y además son muy rápidos, y su reparación es relativamente fácil y económicamente viable, salvo que carecen de dificultad para trabajar en condiciones de calor extremo esto debido a su sistema de sellado, y además deben estar cerca de fuentes de aire

comprimido, por lo que resulta complicado llevarlos a trabajar lejos del sistema de distribución de aire comprimido.

Figura 34. **Diagrama esquemático de una válvula actuadora neumática**



Fuente: ingeniera de control moderna, Katsuhiko Ogata.

1.7.21. Actuadores hidráulicos

Estos actuadores se basan para su funcionamiento, en la presión ejercida por un líquido, generalmente un tipo de aceite. Las máquinas que normalmente se encuentran conformadas por actuadores hidráulicos tienen mayor velocidad y resistencia mecánica y son de gran tamaño, por ello, son usados para aplicaciones donde requieran de una carga pesada.

Cualquier tipo de sistema hidráulico se encuentra sellado herméticamente a modo que no permita, de ninguna manera derramar el líquido que contiene, de lo contrario por una pequeña fuga perderá presión y correrá el riesgo de perder la potencia. Son muy utilizados en aplicación de máquinas que requieren mucha

fuerza, como los son las troqueladoras, en maquinaria pesada o en el control de válvulas que requieren una presión de cierre alta, como pueden ser las válvulas de admisión de turbinas de vapor.

Existen ciertas ventajas y desventajas en el uso de los sistemas hidráulicos en lugar de otras tecnologías. Algunas de las ventajas son las siguientes:

- El fluido hidráulico funciona como lubricante, además de disipar el calor generado
- Los actuadores hidráulicos de un tamaño comparativamente pequeño pueden desarrollar fuerzas o pares grandes
- Los actuadores hidráulicos tienen una velocidad de respuesta más alta para arranque, paro e inversión de posición rápidos
- La disponibilidad de actuadores lineales y rotacionales aporta flexibilidad al diseño
- La disminución de la velocidad cuando se aplica una carga es pequeña
- Sin embargo, varias desventajas tienden a limitar su uso
- No es tan sencillo contar con la potencia hidráulica como con la potencia eléctrica
- El costo de un sistema hidráulico puede ser más alto que el de un sistema eléctrico comparable que realice una función similar
- Existen riesgos de incendio y explosión, a menos que se usen fluidos resistentes al fuego
- El aceite contaminado puede provocar fallos en el funcionamiento adecuado de un sistema hidráulico
- Por lo general, los circuitos hidráulicos tienen características deficientes de amortiguamiento

2. EVALUACIÓN DE LA INSTALACIÓN DE UN GENERADOR DE HIDRÓGENO

2.1. Generadores de hidrógeno operando mediante electrólisis alcalina

El hidrógeno ha sido utilizado por fines militares, industriales y comerciales desde finales del siglo 19. Hoy en día, el hidrógeno electrolítico tiene una participación de sólo el 4 % en la producción mundial, siendo este el elemento más abundante del universo. El consumo de energía eléctrica en un sistema de electrólisis alcalina constituye el mayor costo producción. Un electrolizador somete al agua a valores masivos de energía con el fin de romper las moléculas en oxígeno e hidrógeno.

La alta energía produce una descomposición electroquímica de agua, esta es relativamente alta ya que las moléculas de agua tienen una estructura estable a temperatura ambiente.

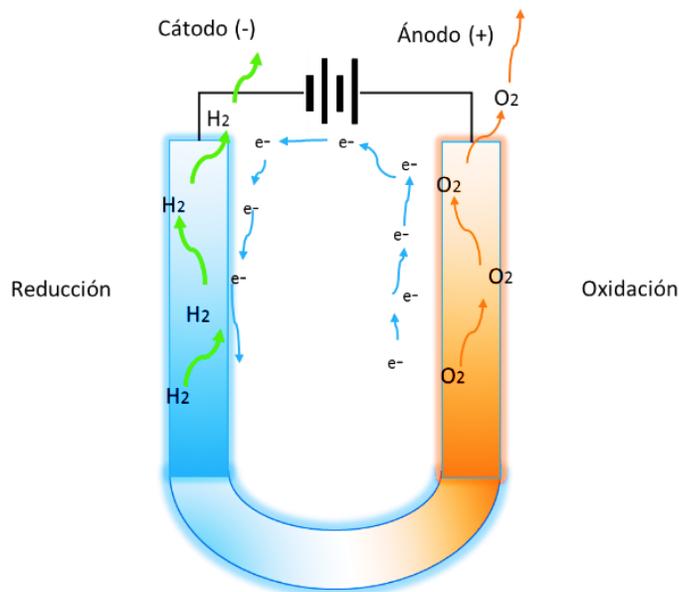
Este voltaje aplicado es también conocido como el voltaje de equilibrio de agua. Sin embargo, los niveles de tensión eléctrica mucho más altas se utilizan en células de electrólisis industriales.

Las densidades de corriente masivas causan un valor notable de caída de tensión óhmica no deseado entre los electrodos. Como resultado, la formación de la pérdida de energía eléctrica no deseada y los valores de eficiencia baja en el proceso son inevitables.

2.2. Principios de operación de la electrólisis alcalina

El generador de hidrógeno siempre se debe considerar como fuente de gas combustible. Cuando la unidad está en funcionamiento, puede convertir agua en hidrógeno y oxígeno, por medio de un proceso electroquímico. Cuando no está en funcionamiento, lógicamente la producción del hidrógeno se detiene.

Figura 35. **Electrólisis por medio de una solución de hidróxido de potasio como potenciador**



Fuente: elaboración propia.

La electrólisis por medio de una solución química y una fuente de energía eléctrica produce una reacción electroquímica que separa al oxígeno, O_2 y al hidrógeno, después de dicha separación el hidrógeno será considerado como un gas altamente explosivo en condiciones de baja pureza. La solución aportará el hidrógeno y oxígeno y eventualmente estos elementos se agotarán por lo que la

solución también lo hará y aparecerá una formación de sólidos los cuales pueden ser filtrados dispuestos de forma segura y luego reemplazados por una nueva solución y así periódicamente se continuara el proceso.

La protección adecuada contra la inflamabilidad de este gas en una atmósfera potencialmente explosiva dentro del generador de hidrógeno de alta pureza se logra utilizando técnicas de protección básicas descritas en las siguientes normativas:

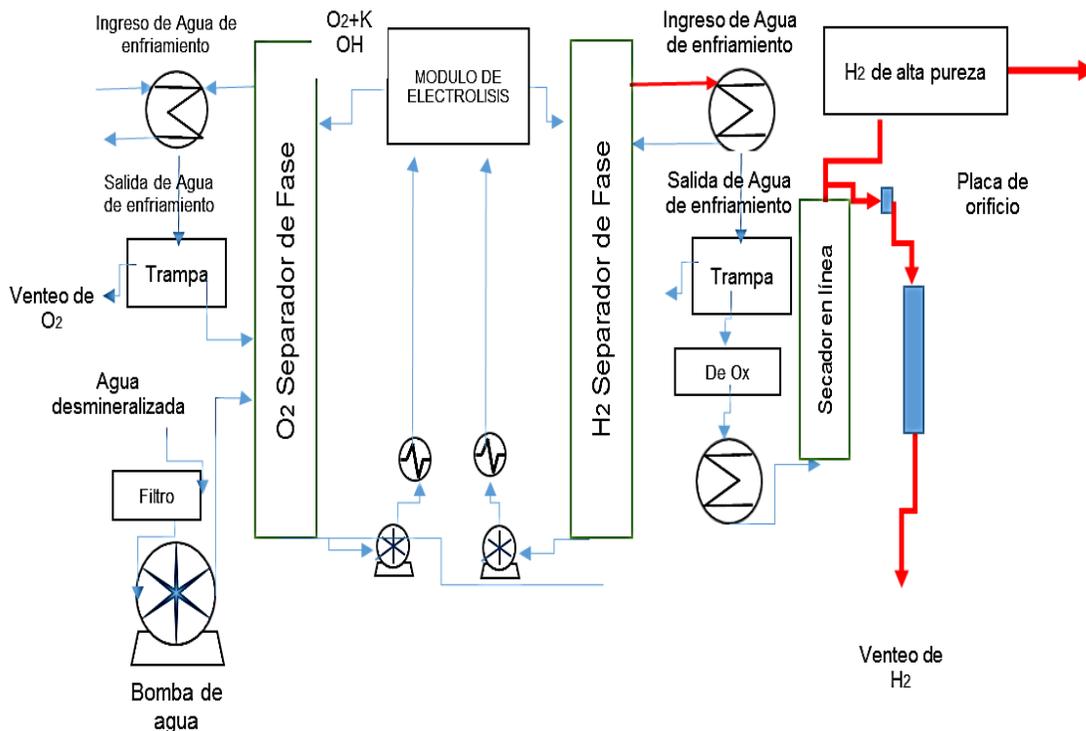
- NFPA 69, Norma sobre los Sistemas de Prevención de Explosiones
- DIN EN 1127-1, Atmósferas explosivas - Prevención y protección contra explosiones - Parte 1: Conceptos básicos y metodología

La primera protección para tomar en cuenta es el confinamiento del hidrógeno, esto se logra al contener en la mayor medida posible dentro de las tuberías del generador el gas producido, y no permitir mezclarse con el aire y formar así una atmósfera potencialmente explosiva.

La segunda protección es la dilución, un ventilador circula el aire a través de las secciones del recinto del generador de hidrógeno, a una velocidad suficiente para poder diluir la mayor cantidad de hidrógeno posible, y llevarlo a un nivel por debajo del nivel de inflamación inferior del hidrógeno. Al alcanzar la velocidad de dilución ya es suficiente para que la clasificación de área dentro del recinto se reduzca a no peligrosa. Esto se confirma mediante el análisis y ensayos conforme a norma IEC 60079-10. Además, la fuente de alimentación eléctrica del generador de hidrógeno cuenta con enclavamiento eléctricos por medio de uno o varios sensores que confirman que el ventilador de dilución esté en funcionamiento, para así garantizar una atmosfera segura.

La tercera protección que se incorpora es la eliminación de fuentes de inflamabilidad en toda atmósfera potencialmente explosiva que se encuentre dentro del generador de hidrógeno de alta pureza. Todos los equipos de distribución interna de energía y todos los componentes eléctricos se colocarán en una sección separada del recinto, aislada de la sección donde se genera el hidrógeno de alta pureza. Los componentes eléctricos que permanecen en la sección destinada a la generación de hidrógeno de alta pureza están ubicados fuera de las zonas de dilución.

Figura 36. **Esquema del funcionamiento del sistema industrial de producción de hidrógeno de alta pureza**



Fuente: elaboración propia.

2.3. Sistemas auxiliares del generador de hidrógeno

Entre los sistemas auxiliares del generador de hidrógeno de alta pureza se encuentran, las bombas de suministro de agua desmineralizada, trampas o separadores de oxígeno, sistemas de venteo de oxígeno, componentes del sistema eléctrico, a continuación, se listan de forma específica los componentes usados en la electrólisis alcalina del agua desmineralizada.

- Sistema de hidrógeno de respaldo
- Sistema de transferencia de hidrógeno, en caso de emergencia
- Sistema de suministro de energía eléctrica
- Venteo de oxígeno al ambiente
- Trampas de condensado
- Sistema de electrólisis
- Monitoreo remoto mediante conexión remota

2.4. Separador de fase de oxígeno

El separador de fase de agua y oxígeno aparta una mezcla de dos fases compuesta por gas oxígeno y agua proveniente de las pilas de celdas electrolíticas. El oxígeno puede contener normalmente hasta un 0,5 % de hidrógeno en volumen.

2.5. Control del sistema eléctrico del generador de hidrógeno

Los controles cubren la puesta en marcha automática, la capacidad de entrega del producto, el monitoreo de la seguridad y el control del funcionamiento para todos los modos de operación posibles. El sistema de control presenta las siguientes características:

- Ofrece una interfaz de usuario de fácil utilización para los operadores de equipos y el personal de reparación y mantenimiento.
- Brinda funciones opcionales de monitoreo a distancia, diagnóstico, y control.
- Circuito de seguridad incluye monitoreo de presiones y estado de interruptores, tales como: paro de emergencia, control al disyuntor principal para desactivar circuitos en el recinto del proceso en caso de presurización.

2.6. Separador de fase de hidrógeno

El separador de fase de hidrógeno separa a la mezcla de agua e hidrógeno de alta pureza y mantiene los estándares de seguridad de gases inflamables. Un sensor de gas combustible supervisa límite inferior de explosividad (por sus siglas en inglés LEL) del hidrógeno en oxígeno. En caso de falla, el sistema se detiene si se detecta un LEL del 50 %., esto para mitigar posibles incidentes que podrían iniciar explosividad en el recinto. El subsistema presentara las siguientes características:

- Minimiza la evaporación
- Permite la descarga de agua
- Mantiene y monitorea la calidad del agua
- Controla el agua disponible en el sistema
- Previene el riesgo debido de falla de la pila de celdas
- Suministra agua fría y filtrada a las tres pilas de celdas
- Rechaza el calor a través de una interfaz de agua de proceso
- Evacua oxígeno

2.7. Purga de gas

El sistema de generación de hidrógeno requiere un sistema de purga de gas para arranques y paradas. Por lo general es necesario utilizar nitrógeno de alto grado industrial. En la operación estable ya no se consume nitrógeno. Por lo general una botella estándar de nitrógeno será podrá utilizar hasta en 100 purgas del sistema.

Dadas las condiciones de seguridad de las personas e instalaciones, los costos de producción, las condiciones de logística y despacho de insumos se consideran importantes para la evaluación de un generador de hidrógeno los siguientes factores:

- El manejo seguro del sistema incluye el cumplimiento de normativas de control de gases
- El costo de inversión inicial y costo de operación y mantenimiento.
- El costo de producción por volumen
- Ventajas tecnológicas
- Manejo adecuado del Hidróxido de Potasio como potenciador de la electrólisis
- Costos de disposición de desechos

Los criterios adecuados para la selección de la tecnología se apoyan en las condiciones actuales de la planta, para esta investigación los siguientes criterios cumplen con la instalación actual:

- Tecnología existente de producción de agua desmineralizada
- Instalación y consumo actual de hidrógeno de alta pureza
- Condiciones actuales de suministro de insumos de Hidróxido de potasio y sistemas de almacenamiento
- Diseño actual del DCS y disponibilidad de módulos de control
- Capacidad del recurso humano, por instalación, operación y mantenimiento de equipo
- Control y lineamientos de seguridad industrial

Dados los criterios anteriores, los sistemas de producción de hidrógeno de alta pureza por hidrólisis alcalina del agua desmineralizada se adecuan eficazmente a la planta en sus condiciones actuales, ya que esta cuenta actualmente con:

- Agua desmineralizada de alta calidad y capacidad instalada de más de 100 galones por minuto de agua
- Instalación y procedimientos existentes de control de hidrógeno del generador eléctrico
- Control adecuado de bodega de químicos
- Sistema actual del DCS, robusto y con disponibilidad de módulos de entradas y salidas analógicas y digitales disponibles
- Sistemas de seguridad industrial

2.8. Aplicaciones típicas de esta tecnología

Las aplicaciones comunes que utilizan hidrógeno son las siguientes:

- Gas portador para componentes reactivos

- Gas de servicio para analizadores, por ejemplo, portador en cromatografía de gases
- Gas de combustión en detectores de ionización de llama.
- Industria electrónica
- Sintetizadores en procesos de producción de plásticos
- Propulsión en cohetes
- Enfriamiento en sistemas confinados

2.9. Generadores de hidrógeno operando mediante membrana de intercambio protónico o PEM

Los generadores de hidrógeno operando con una celda PEM, podrán producir energía eléctrica mediante un proceso químico, y en este contexto el hidrógeno de alta pureza este se considerará como un combustible.

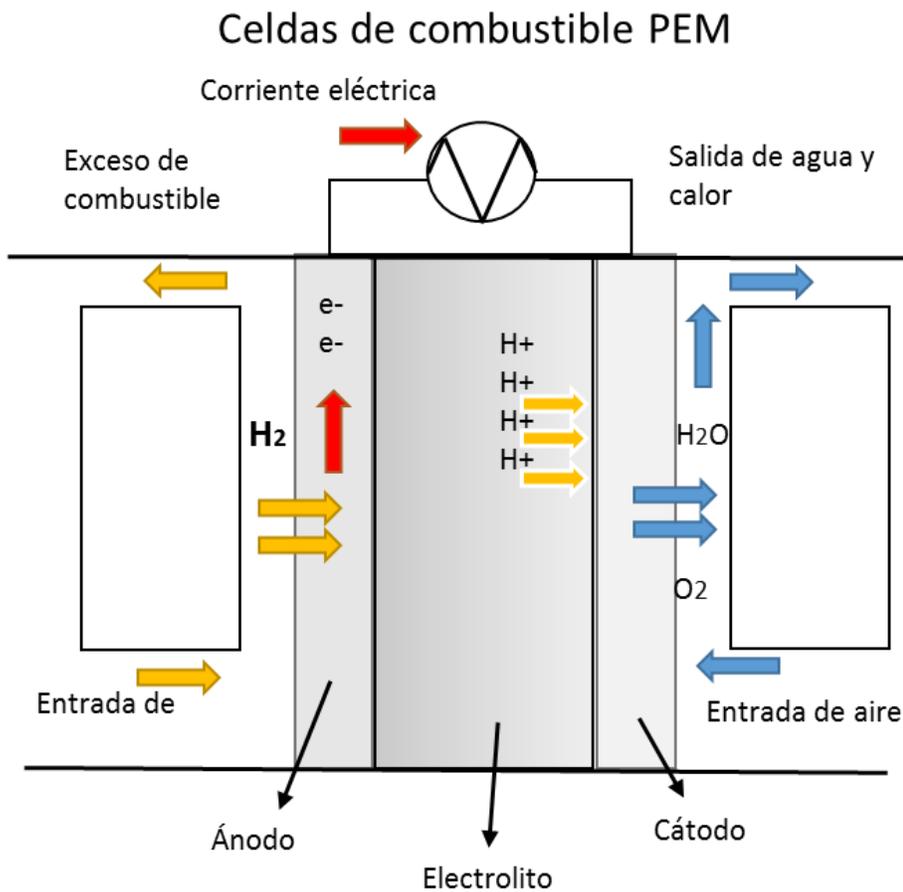
Las celdas de combustible fueron descubiertas por William Grove en 1839 y su verdadero desarrollo se dio gracias a la carrera espacial. En principio las celdas de combustible son dispositivos que producen electricidad y calor combinando oxígeno con un combustible, el cual puede ser hidrógeno. Las celdas de combustible prometen ser la tecnología para el uso en el transporte y las aplicaciones portátiles libre de emisiones de carbono en un futuro próximo.

2.10. Principios de operación de las membranas de intercambio protónico

Este tipo de celda contiene una membrana fabricada generalmente en un polímero conductor de protones, la membrana conduce los protones hacia el cátodo debido a la composición de esta, pero los electrones se ven forzados a tomar otro camino, debido a que la membrana es construida en materiales

aislantes, este camino puede ser el abastecimiento de energía, luego, los electrones que han viajado por el circuito externo y los protones empiezan a reaccionar con el oxígeno generando agua en forma de líquido o vapor, como un residuo que genera este proceso electroquímico, por lo que se considera a este proceso como del tipo cero emisiones.

Figura 37. **Celda de combustible de membrana de intercambio de protones**



Fuente: elaboración propia.

2.11. Manejo adecuado del Hidróxido de Potasio como potenciador de la electrólisis

El hidróxido de potasio, Hidróxido de potasio, es muy común en la fabricación de jabón y fertilizantes, y también es utilizado en una solución con agua desmineralizada como potenciador en la electrólisis alcalina.

El electrolito de hidróxido de potasio circula través del hidrógeno y el oxígeno mediante bomba centrífuga. El hidrógeno y el oxígeno generado serán producto de la separación del electrolito que circula por el efecto de la reacción electroquímica, también producto de la separación queda depósitos agotados por la gasificación de la solución. La circulación del electrolito también sirve para llevar agua a través de los módulos o celdas de gasificación. El calor del electrolito se minimiza por medio de en un intercambiador de calor instalado en el proceso.

Los sólidos formados en él Hidróxido de potasio se separan de la por medio de los filtros en línea.

Las variables como el nivel de Hidróxido de potasio, la temperatura y el flujo de los electrolitos se supervisan continuamente, y sí los valores salieran de rango de seguridad el sistema se apagará para prevenir daños. Los condensadores eliminan la mayoría de la humedad de los gases, y el condensado retornará al sistema de contención de los electrolitos.

2.12. Selección de la tecnología a implementar y dimensionamiento

Dados los requerimientos de consumo, seguridad y costos de la planta en sus condiciones actuales los requerimientos necesarios son los siguientes:

- Una producción de 660 a 1200 pies cúbicos de gas por día, en ambas unidades
- Consumo de energía no mayor de 40 KVA
- Manejo seguro de Hidróxido de potasio
- Manejo seguro del hidrógeno de alta pureza

En función de estos criterios que se adecuan a la planta se realizarán todos los dimensionamientos.

2.13. Definición de parámetros para la selección del equipo

Los parámetros para la selección de un sistema de producción de hidrógeno deben estar en función de los requerimientos del cliente, la accesibilidad a los insumos, las capacidades de suministro de energía y las normativas existentes del manejo seguro de gases inflamables.

Conocidos estos parámetros el cliente debe solicitar que el equipo cumpla con lo siguiente:

- Cumplir con el volumen de hidrógeno requerido por planta
- Consumir la cantidad más baja de energía eléctrica
- Consumir la cantidad más baja de agua desmineralizada
- Consumir la menor cantidad de Hidróxido de potasio
- Sistemas de producción de hidrógeno de alta pureza en instalaciones intrínsecamente seguras

2.14. Estimación de consumo de agua desmineralizada o DM, para la generación del hidrógeno

Dados los datos técnicos de los fabricantes y la producción de hidrógeno de alta pureza por cada tecnología se describe en la siguiente tabla el consumo necesario para la producción del gas.

Tabla V. Consumo de agua desmineralizada y energía eléctrica en función de la producción de hidrógeno de alta pureza

Tipo de consumo	Teledyne HMXT-50		Proton H2m Series	
	Valor	Unidad de Ingeniería	Valor	Unidad de Ingeniería
Agua Desmineralizada	0.42	GPH < 1 μ s/cm	0.375	GPH < 0.1 μ s/cm
Producción de hidrógeno de alta pureza	106	SCF/H	76	SCF/H

Fuente: elaboración propia.

2.15. Estimación del consumo eléctrico en auxiliares para la generación de hidrógeno

Según los datos técnicos de los fabricantes del generador de hidrógeno de alta pureza, Teledyne HMXT 50 y Proton H2m, y la relación energía eléctrica versus hidrógeno es la siguiente:

Tabla VI. **Consumo de energía eléctrica en función de la producción de hidrógeno de alta pureza**

Tipo de consumo	Teledyne HMXT-50		Proton H2m Series	
	Valor	Unidad de Ingeniería	Valor	Unidad de Ingeniería
Producción de hidrógeno	106	SCF/H	76	SCF/H
Consumo eléctrico	30	KVA	22	KVA

Fuente: elaboración propia.

2.16. Comparación técnica entre tecnologías consideradas para la implementación

Para poder implementar una tecnología de producción de hidrógeno de alta pureza es necesario plantear los requerimientos existentes en la planta, entre estos están, el consumo diario de hidrógeno, presiones de operación de los fluidos a controlar, demanda del sistema de suministro de energía eléctrica, dados estos factores los siguientes modelos son competitivos para la planta.

- Teledyne HMXT-50 100 SCF/H de hidrógeno
- Proton H2M SERIES 76 SCF/H de hidrógeno

En el capítulo 5 se realiza un comparativo para la implementación económica de los dos modelos y se comparan en función de sus consumos de agua desmineralizada, y energía eléctrica, así como los gastos por mantenimiento en cada tecnología.

3. IMPLEMENTACION DEL GENERADOR DE HIDRÓGENO POR ELECTRÓLISIS ALCALINA MEDIANTE EL CONTROL ELECTRONICO

3.1. Desarrollo del proyecto

3.1.1. Elaboración de diagrama, proceso e instrumentación para el generador de hidrógeno

Los diagramas de proceso e instrumentación y control, por sus siglas en inglés, P&IDs, describen rápidamente las conexiones entre los procesos y las variables inmersas en los mismos, estos diagramas ayudan de forma rápida al entendimiento del proceso en cuestión, brinda brevemente un detalle de las capacidades de tubería, equipos eléctricos y de instrumentación y direccionamiento de los flujos del proceso.

Se describe a continuación una breve inspección de la simbología utilizada en los P&IDs según la ANSI/ISA-S5.4.

Figura 38. **Simbología utilizada en el sistema P&ID**

		Simbología	
	Rotámetro		Placa de orificio
	Filtr		Instrumento
	Válvula		Válvula de alivio de ángulo
	Válvula manual		Control primario de PLC
	Válvula de		Proceso
	Válvula autoregulada		Señal eléctrica
	Válvula operada a motor		Señal de comunicación binaria
	Válvula		Tubería aislada
	Reducido		

Fuente: ANSI ISA 5.1 del 2009.

Data la simbología básica de los P&IDs, esto servirá para esquematizar los diagramas de proceso y proporcionaran un mejor entendimiento del proceso básico relacionado a Sistema de producción de hidrógeno de alta pureza.

3.2. **Elaboración de las listas de mapeo de señales analógicas y digitales para monitores en DCS**

El diseñador del sistema de generación de hidrógeno de alta pureza suministra una tabla de mapeo para la adecuación, monitoreo y comunicación, en el caso de sistema de Teledyne suministra un listado de señales muy completo a mapear a un sistema de control y este se representa en la siguiente tabla VII:

Tabla VII. **Mapeo de alarmas digitales, tipo BIT del sistema HMXT 50**

Tipo	Descripción de la señal discreta	Rango de acción	Ubicación en memoria
Entrada	Secador 1 en línea	1= Encendido	100.00
Entrada	Secador 2 en línea	1= Encendido	100.01
Entrada	Indicador de producción	1= Generando	100.02
Entrada	Alarma de paro	1= Paro	100.03
Entrada	Cierre válvula de agua DM	1= Abierta	100.04
Entrada	Venteo de válvula de H2	1= Abierta	100.05
Entrada	Válvula de agua de enfriamiento	1= Abierta	100.06
Entrada	Válvula de purga de secador	1= Abierta	100.07
Entrada	Venteo de secador	1= Abierta	100.08
Entrada	Válvula de purga de nitrógeno	1= Abierta	100.09
Entrada	Calentador encendido de secador 1	1= Encendido	100.11
Entrada	Calentador encendido de secador 2	1= Encendido	100.12
Entrada	Bomba de Hidróxido de potasio	1= Encendida	100.13
Entrada	Bomba de agua de alimentación	1= Encendida	100.14
Salida	Alarma remota normalmente abierta	1= Paro	100.15
Salida	Alarma remota normalmente cerrada	1= Paro	101.16

Fuente: mapeo de señales digitales del generador de hidrógeno de alta pureza
 Generador de hidrógeno HMXT 50.

Tabla VIII. Mapeo de señales de salida analógicas tipo entero correspondientes del Generador de Hidrógeno de alta pureza

Descripción de la señal discreta	Rango	Unidad de ingeniería	Ubicación
Tasa de producción	0-100	%	D6000
Porcentaje de apertura de válvula de enfriamiento	0-100	%	D6002
Tiempo restante de secado	0-360	Minutos	D6004

Fuente: mapeo de señales analógicas del generador de hidrógeno de alta pureza
Generador de hidrógeno HMXT 50.

En las siguientes tablas VIII y IX se mapean las señales de entrada analógica para el control de temperatura del proceso de producción de hidrógeno de alta pureza, así como también se mapean las señales de monitoreo de presión, porcentaje de humedad, porcentaje de explosividad, niveles y voltaje de celdas, estas variables proporcionan a los controladores los datos necesarios para la toma de decisión del proceso de producción y protección del recinto:

Tabla IX. **Mapeo de señales de entrada analógicas de nivel, % de humedad, presión, pureza, explosividad y voltaje, del tipo entero correspondientes del Generador de Hidrógeno de alta pureza, Teledyne**

Descripción de la señal discreta	Rango	Unidad de ingeniería	Ubicación
Calidad de agua de alimentación	0 a 6000	μS	D6006
Presión de H2	0 a 6000	PSI	D6008
Diferencial de presión	0 a 6000	Pulgadas	D6012
Presión de secador 1	0 a 6000	PSI	D6014
Presión de secador 2	0 a 6000	PSI	D6016
Presión de nitrógeno	0 a 6000	PSI	D6018
Nivel en función de presión diferencial	0 a 6000	Pulgadas	D6020
Voltaje de salida de fuente de poder	0 a 32760	Voltios DC	D6034
Corriente d salida de fuente de poder	0 a 32760	Voltios DC	D6036
Higrómetro, medición de humedad en el aire	0 a 6000	% humedad	D6038
Traza de O2	0 a 6000	ppm	D6040
Sensor de explosividad	0 a 6000	% LEL	D6042
Sensor de H2 en O2	0 a 6000	% Hidrógeno	D6044

Fuente: mapeo de señales analógicas del generador de hidrógeno de alta pureza.

Generador de hidrógeno HMXT 50.

Tabla X. **Mapeo de señales de entrada analógicas de temperatura tipo entero correspondientes del Generador de Hidrógeno de alta pureza**

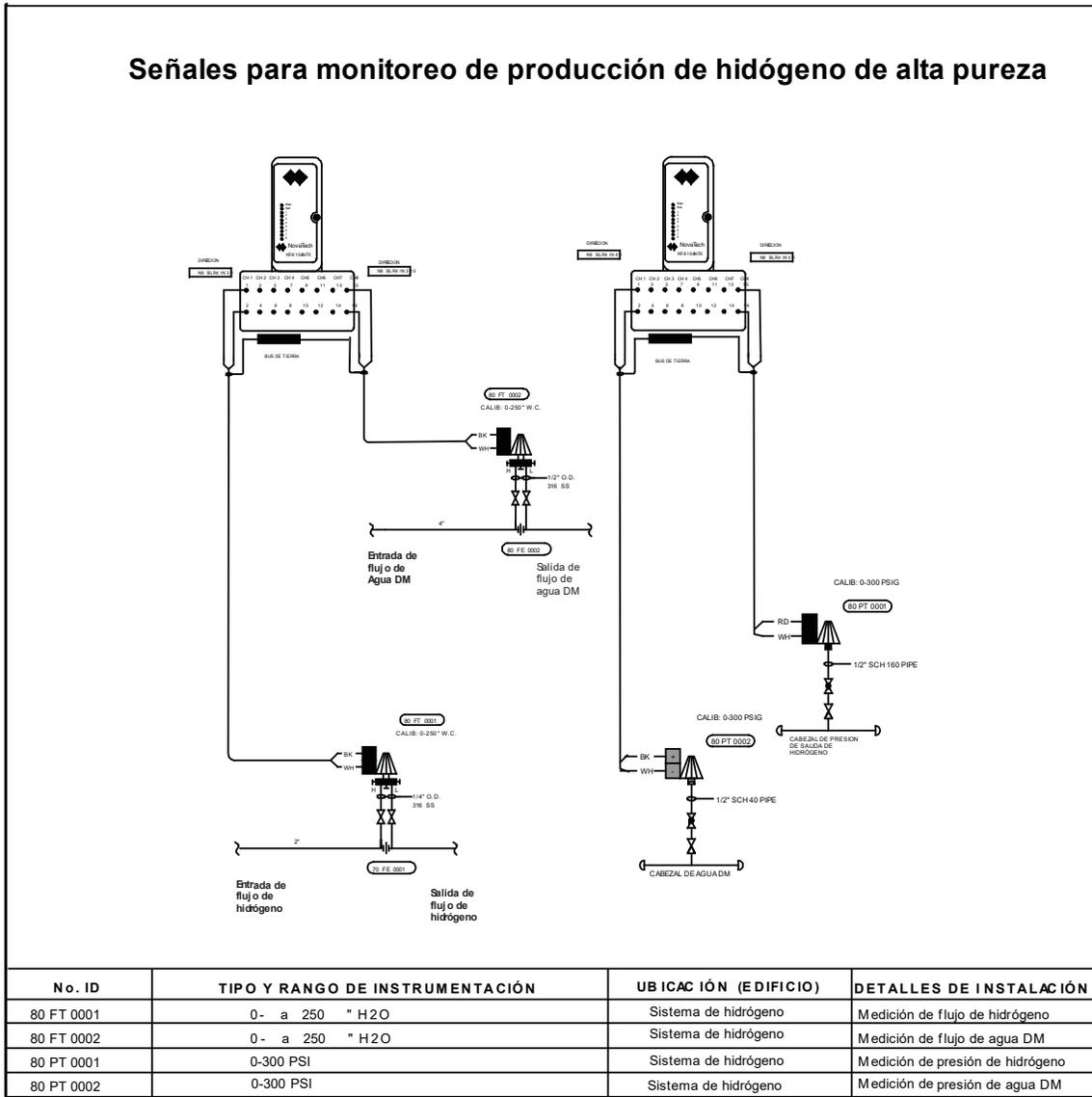
Descripción de la señal discreta	Rango	Unidad de ingeniería	Ubicación
Control de temperatura de entrada de Hidróxido de potasio	-1000 a 12000	°C	D6022
Temperatura de salida del Hidróxido de potasio en hidrógeno	-1000 a 12000	°C	D6024
Temperatura de salida del Hidróxido de potasio en el lado de O2	-1000 a 12000	°C	D6026
Temperatura ambiente	-1000 a 12000	°C	D6030
Temperatura del tanque	-1000 a 12000	°C	D6032

Fuente: mapeo de señales analógicas del generador de hidrógeno de alta pureza.
Generador de hidrógeno HMXT 50.

Para la seguridad para el control de la producción de hidrógeno de alta pureza, es necesario tener dispositivos de medición continua.

A continuación, se muestra un diagrama de conexionado para de campo a los canales de los módulos NovaTech® NT-8103-AI-TX, está conformado por cuatro señales de campo, dos de medición de presión y dos de medición de flujo (medición indirecta de presión diferencial).

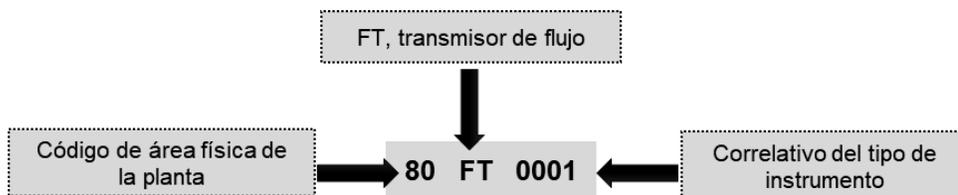
Figura 39. Señales de monitoreo de la producción de hidrógeno de alta pureza



Fuente: elaboración propia, utilizando Inkscape.

La descripción de la codificación de las señales se realiza según su área en la planta, el tipo de instrumento o elemento de control, y su número de identificación, a continuación, se presenta una imagen que describe dicho código.

Figura 40. **Señales de monitoreo de la producción de hidrógeno de alta pureza**



Fuente: elaboración propia.

Para este caso el área con numeración 80 corresponderá todo el recinto de producción de hidrógeno en la planta, y estará ubicado en un área que posee una buena fluidez de la ventilación. El tipo de instrumento o elemento de control estará identificado por dos o tres literales, como por ejemplo FT, por sus siglas en inglés Flow Transmitter, a continuación, se presenta una tabla con esta subcategorización por tecnología:

Tabla XI. **Definición de la codificación de los instrumentos de medición**

Código de instrumento	Descripción	Explicación
FE	Elemento de para medición de flujo	Placa de orificio, tubo de Venturi, etc.
FT	Transmisor de flujo	Transmisores de flujo, 4-20mA, Profibus, etc.
PI	Indicador de presión	Manómetro.
PT	Transmisor de presión	Transmisor de presión, 4-20mA, Profibus, etc.
TE	Elemento de temperatura	Termocupla, RTD, termistor, etc.
TT	Transmisor de temperatura	Transmisor de temperatura, 4-20mA, Profibus, etc.
LI	Indicador de nivel	Visor de nivel de un tanque, o indicador de fluido.
LT	Transmisor de nivel	Transmisor de nivel, Presión diferencial, medición por conductividad de electrodos, 4-20mA, Profibus, etc.

Fuente: elaboración propia.

3.3. Diseño de red de comunicación para el control y monitoreo del sistema de producción de hidrógeno y control del enfriamiento del generador eléctrico

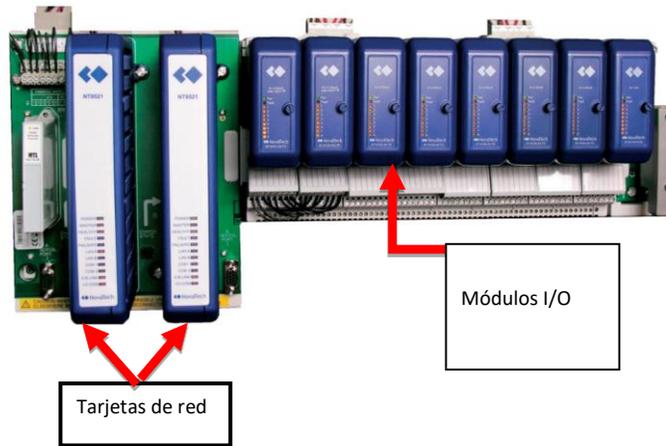
El diseño contempla la estructura de comunicación existente tomando en cuenta el hardware y software existentes en la planta, se aprovechará también las condiciones de producción de agua desmineralizada, el suministro eléctrico y la estructura de suministro de hidrógeno de alta pureza.

3.4. Esquemas de conexiones de los módulos 8000 I/O

Se esquematizan los sistemas de conexión del módulo de entradas y salidas, tanto analógicas y digitales de los módulos 8000 I/O.

A continuación, se ejemplifica el sistema 8000 I/O, el cual cuenta de un rack, módulos de comunicación y módulos de entrada y salida.

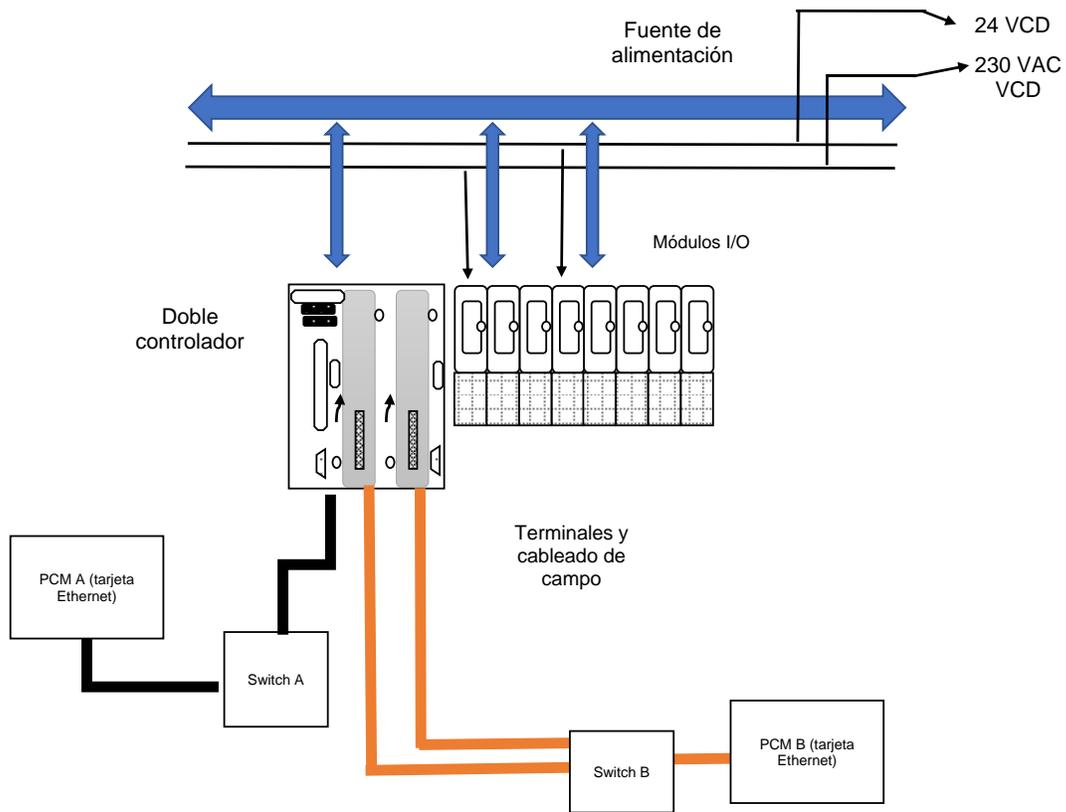
Figura 41. Sistema 8000 I/O



Fuente: catálogo Novatech de controlador 8000 Series I/O

El sistema remoto de control 8000 I/O, tiene una configuración redundante en comunicación y de energía, esto con el fin de garantizar una perpetuidad de la operación, como se muestra en la siguiente figura.

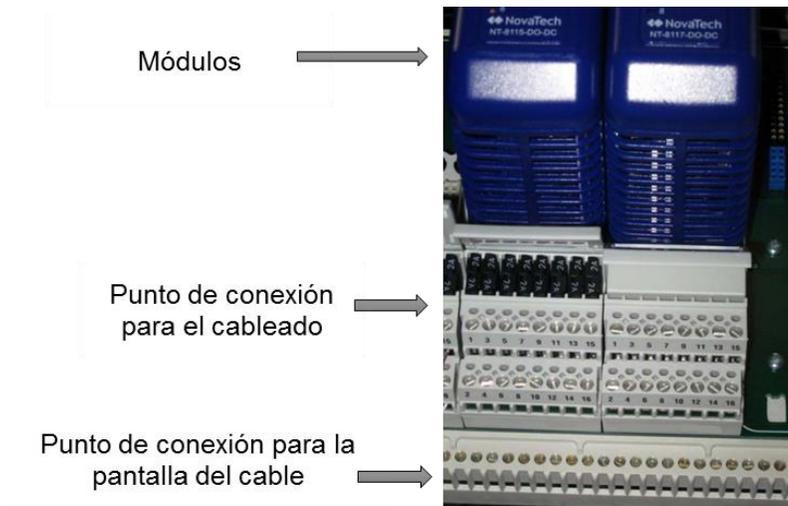
Figura 42. **Conexión del 8000 I/O**



Fuente: elaboración propia.

Cada tipo módulo posee una configuración distinta de sus terminales de conexión según sea la aplicación, así se muestra en la siguiente figura.

Figura 43. **Esquema de conexionado de módulos 8000 I/O**



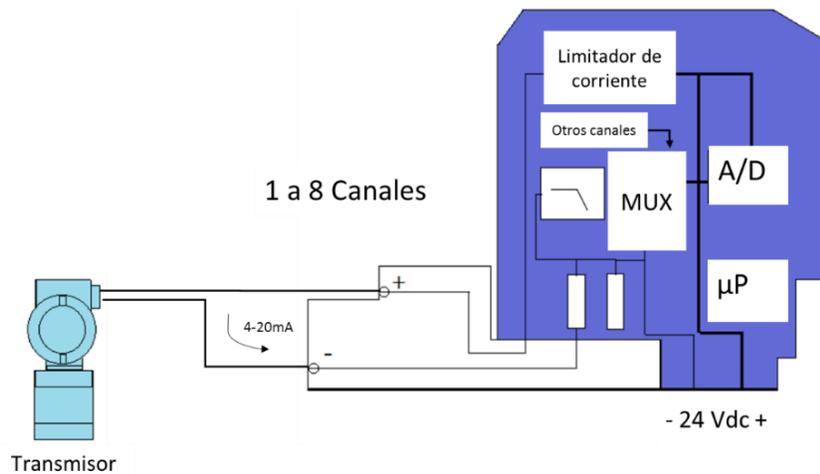
Fuente: NovaTech® 8000 Series I/O Hardware User's Guide

Internamente cada módulo independiente del su tipo posee una lógica interna que consta de los siguientes bloques:

- Limitador de corriente
- Convertidor A/D, analógico a digital
- Microprocesador
- Multiplexor
- Fuente de alimentación
- Terminales para conexionado

A continuación, se presenta un corte transversal de la configuración de un módulo de entradas analógicas en un sistema de control de 4-20 mA.

Figura 44. **Módulo NT8101-AI-TX, configuración interna**



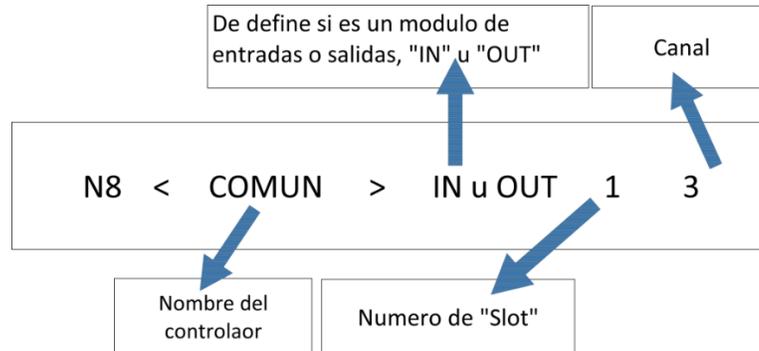
Fuente: elaboración propia.

Los módulos NovaTech ® 8000 I/O, se codifican en cinco secciones que describen su aplicación y sus características de construcción y aplicación.

- N8, Familia de controladores de campo
- Nombre de la estación controladora
- Tipo de modulo, entradas o salidas
- Numero de slot
- Canal de campo

Por ejemplo, se tiene una identificación N8 COMM IN 3 2, esto significara que es un controlador de señales de campo de la familia 8000, está en la estación controladora o remota COMM, es una entrada, está ubicada en el slot 3 y canal 2. En la siguiente figura se resume el significado de este código.

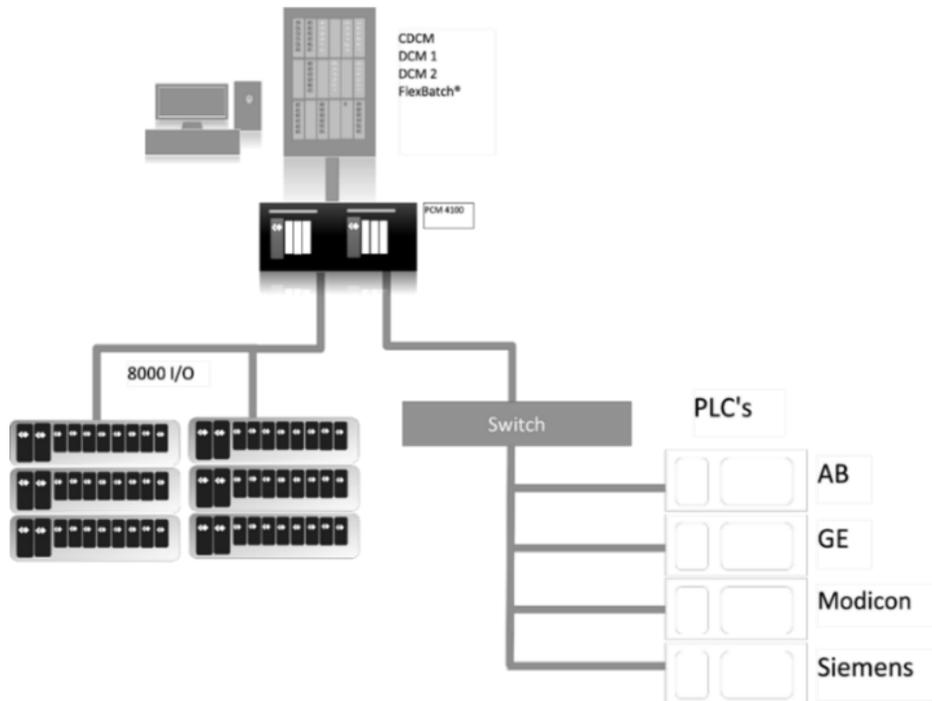
Figura 45. **Significado de la configuración de un módulo de I/O**



Fuente: elaboración propia.

Luego de coleccionar o controlar cada módulo ubicado en cada sistema remoto, estos deben ser capaces de comunicarse de los 8000 I/O a los PMC 4200 redundantes por lo cual es necesario una red de comunicación abierta, que proporciona cabida a las propias y también a las distintas tecnologías de control, como se muestra en la siguiente figura:

Figura 46. **Esquema de comunicación del sistema D/3®**

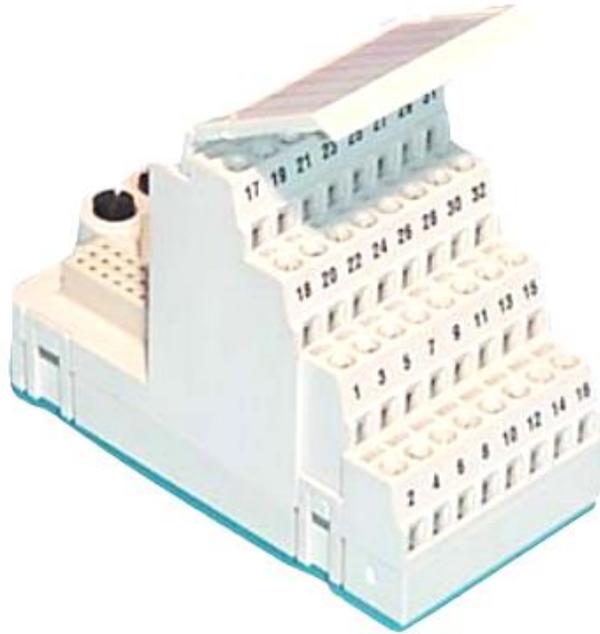


Fuente: elaboración propia.

3.5. **Terminales de campo**

Las terminales de campo proporcionan la interfaz entre los módulos 8000 I/O, el cableado de campo y los sensores de campo. Las terminales de campo Incluyen fusible y la desconexión segura. Una sujeción mecánica confiable del sistema evita que un módulo de I/O incorrecto sea conectado a una terminal que no corresponda. Las terminales para los módulos NovaTech® 8000 I/O son compatibles con las MTL Eaton.

Figura 47. **Terminales para Modulo 8000 I/O**



Fuente: terminales de campo, MTL Eaton.

Dadas las múltiples variables que se involucran en los procesos industriales, se debe contar con muchos tipos de sensores y tecnologías de conexionado, según su aplicación las terminales se catalogan de la siguiente forma y se muestran en la siguiente tabla XII:

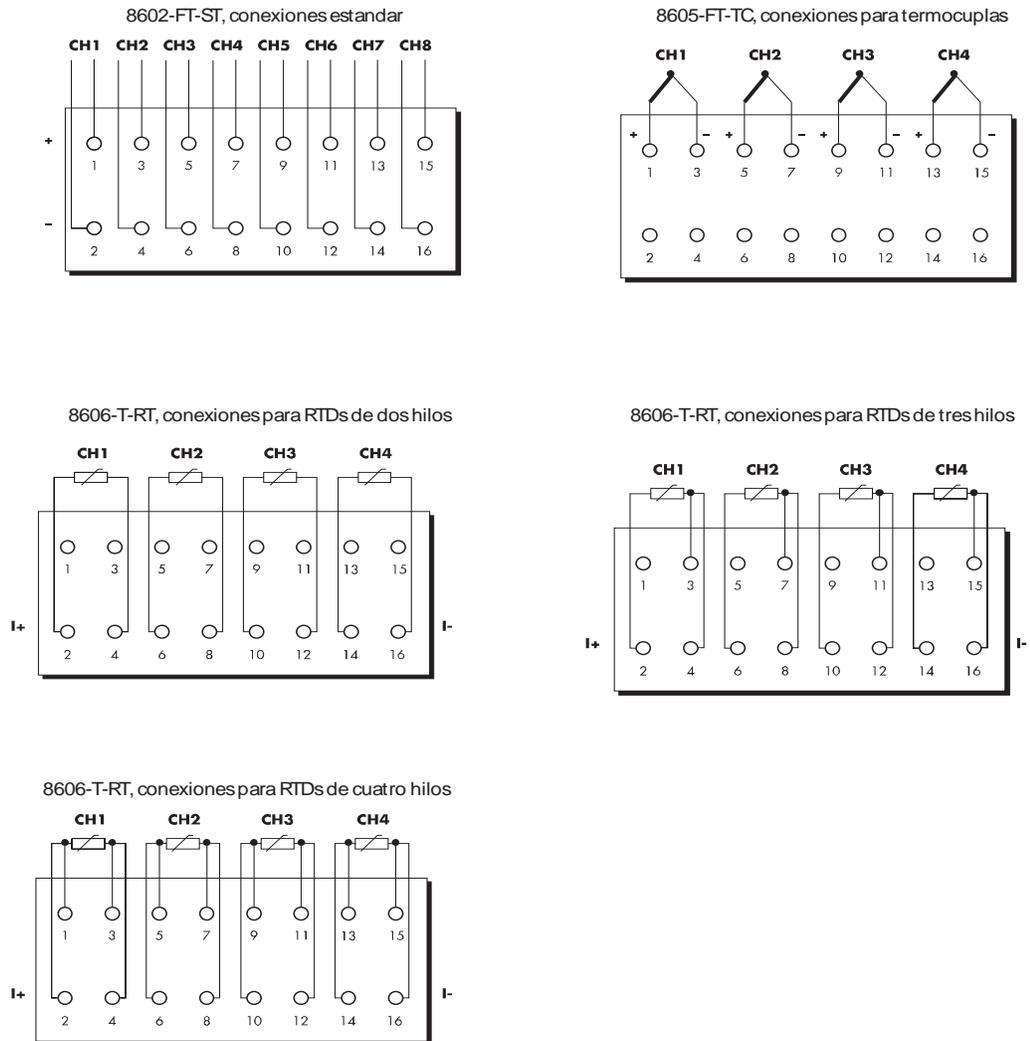
Tabla XII. **Codificación de terminales de módulos 8000 I/O**

Descripción de terminal de campo	Numero de parte
Estándar	8602-FT-ST
Con fusible	8604-FT-FU
Termopar	8605-FT-TC
RTD	8606-FT-RT
Transmisor de 4 hilos	8615-FT-4W
16/30-channel DI	8617-FT-NI
16-pin Terminación a masa	8618-FT-MT
44 pin Terminación a masa	8619-FT-MT

Fuente: codificación de terminales de campo, MTL Eaton.

Sabiendo ya el diseño de modulo a implementar, es necesario saber el tipo de conexión según el sensor de campo, en la figura que se presenta a continuación se muestra el tipo de conexionado del cableado y sensores de campo.

Figura 48. **Conexión de sensores a terminales módulos 8000 I/O**



Fuente: codificación de terminales de campo, MTL Eaton.

Además del tipo de instrumento a conectar al módulo, también es necesario seleccionar el módulo adecuado al rack, a continuación se listan en las tabla IX de señales de entrada y X de salida, además se especifican los tipos de módulos según el tipo de sensor o transmisor de campo y por tipo de señal.

Tabla XIII. **Clasificación de señales de entrada módulos 8000 I/O**

Módulos	Tipo	Especificaciones	Canales
NT-8101-HI-TX	AI	Entrada analógica, 4-20 mA con HART de 2- o 4-hilos	8
NT-8103-AI-TX	AI	Entrada analógica, 4-20 mA de 2- o 4-hilos	8
NT-8119-VI-05	AI	Entrada de voltaje, 1-5Vdc	8
NT-8132-AI-UN	AI	Entrada analógica aislada, 4-20 mA, termopar, RTD y entrada de voltaje	8
NT-8105-TI-TC	AI	Termopar o milivoltios	4
NT-8106-TI-RT	AI	Entrada de RTD	4
NT-8109-DI-DC	DI	Entrada digital, alimentación con 24 voltios, aislado	8
NT-8110-DI-DC	DI	Entrada digital, alimentación con 24 voltios, no aislado y energizado	8
NT-8121-DI-DC	DI	Entrada digital, 24 voltios no aislado, modulo energizado	16
NT-8122-DI-DC	DI	Entrada digital aislada, 24 voltios	16
NT-8111-DI-AC	DI	Entrada digital aislada, 115 voltios AC	8
NT-8112-DI-AC	DI	Entrada digital no aislada, 115 voltios AC	8
NT-8113-DI-AC	DI	Entrada digital aislada, 230 voltios AC.	8
NT-8114-DI-AC	DI	Entrada digital no aislada	8
NT-8140-DI-AC	DI	Entrada digital aislada, 115 voltios AC	16

Fuente: Manual de operación y mantenimiento D/3®.

Tabla XIV. **Clasificación de señales de salida módulos 8000 I/O**

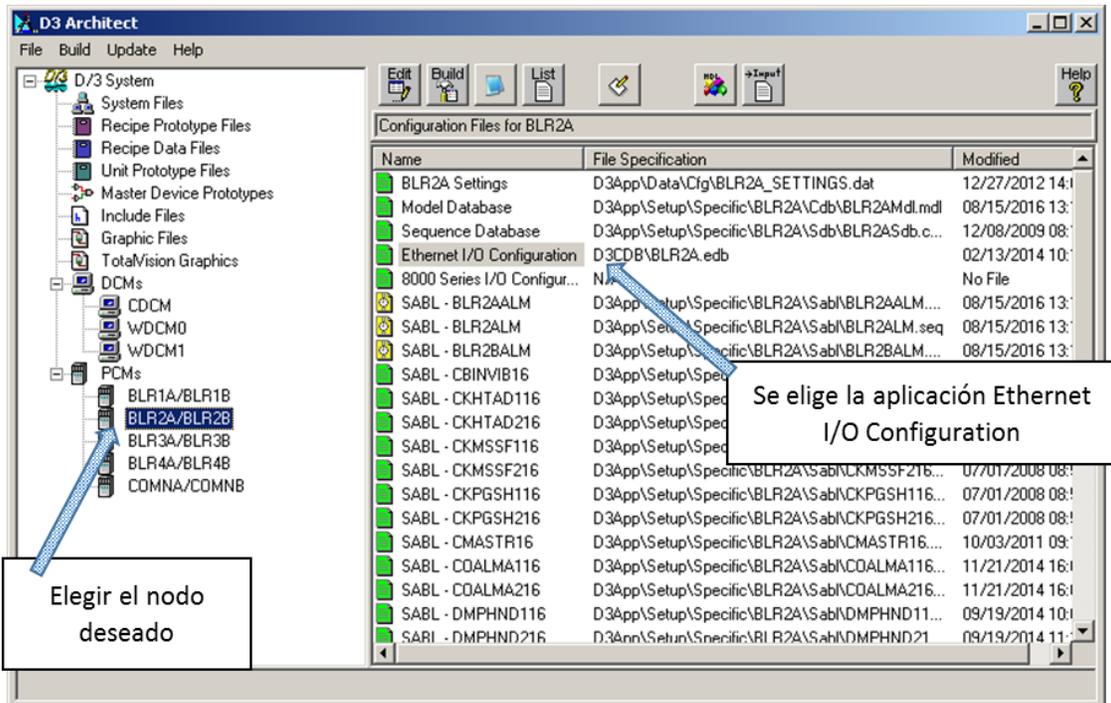
Módulos	Tipo	Especificaciones	Canales
NT-8102-HO-IP	AO	Salida analógica de 4-20mA con HART	8
NT-8104-AO-IP	AO	Salida analógica de 4-20mA	8
NT-8115-DO-DC	DO	Salida digital no aislada	8
NT-8117-DO-DC	DO	Salida digital aislada, 2-60 voltios DC	8
NT-8116-DO-AC	DO	Salida digital no aislada, modulo energizado, 250 voltios AC	8
NT-8118-DO-AC	DO	Salida digital aislada, de 20 a 250 voltios AC	8
NT-8142-DO-DC	DO	Salida digital, de 12 a 42 voltios, no aislado, y modulo energizado	16

Fuente: Manual de operación y mantenimiento D/3®.

3.6. Implementación de comunicación entre DCS y PLC

Se realiza el mapeo para poder hacer la comunicación eficaz entre el DCS y el PLC del fabricante del sistema de generación de hidrógeno de alta pureza, esto se hace mediante los protocolos de comunicación Ethernet. Se utiliza la herramienta suministrada por NovaTech® D3 Architect, la cual proporciona una interfaz al usuario para la configuración de los mapas de datos, luego se elige la aplicación NovaTech ® Ethernet I/O Configuration, como se muestra en la siguiente figura.

Figura 49. Configuración de parámetros desde el D3 Architect

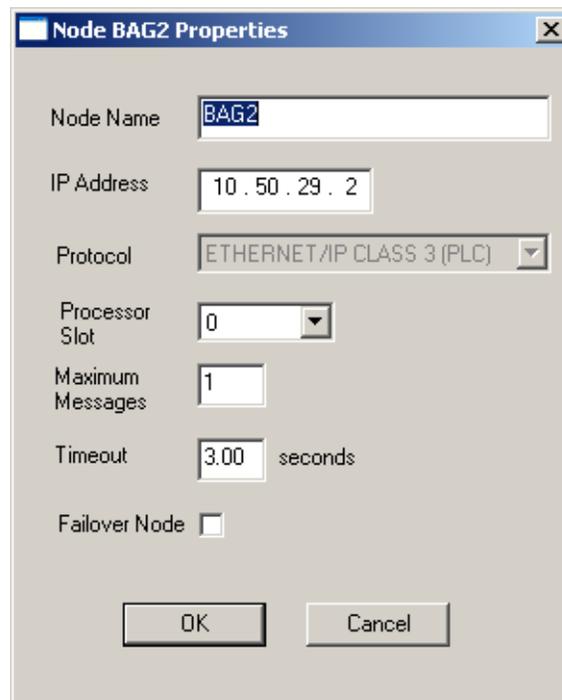


Fuente: toma de pantalla del sistema D3 Architect.

En este caso se configurará un nodo existente llamado BAG2 que corresponde al PCM citado como BLR2A, que por su ubicación física es el más apropiado para la colección y control de variables relacionadas al proyecto. Se abrirá una ventana de edición que indica los campos a configurar, entre los parámetros a configurar se entran:

- Node name, nombre del nodo a configurar para la colección de datos
- IP address, dirección lógica y jerárquica de la estructura del protocolo de comunicación IP, de un nivel de una red TCP/IP
- Por defecto utilizara el protocolo EthernetIP clase 3
- Processor slot, numero de puerto
- Maximum messages, el número máximo de mensajes
- Timeout, se define el tiempo de solicitud de servicio para la detección de un enrutador o un servidor
- Failover node, se configura con un cuadro de cheque la condición de respaldo secundario por falla en el nodo

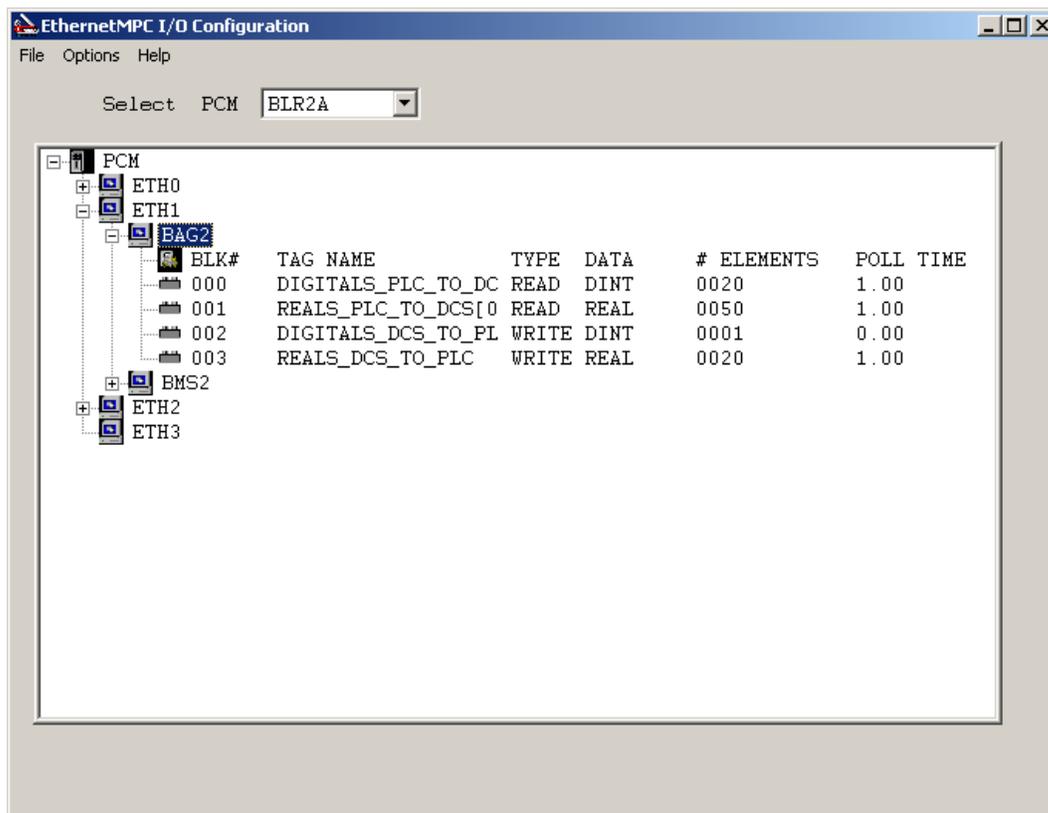
Figura 50. **Editando el nodo de comunicación BAG2**



Fuente: toma de pantalla del sistema D3 Architect.

Se continúa utilizando la aplicación NovaTech® Ethernet I/O Configuration y en este punto se definen los nombres de las variables, siguiendo el patrón de la planta, que en la estructura del nombre se define su naturaleza, Digital o analógica, el sentido de comunicación si es del PLC al DCS, y es en sentido DCS al PLC debe configurar a través del Ethernet I/O Configuration del RSLogix 5000.

Figura 51. **Configurado el mapeo de señales en el software EthernetMPC I/O configuration**

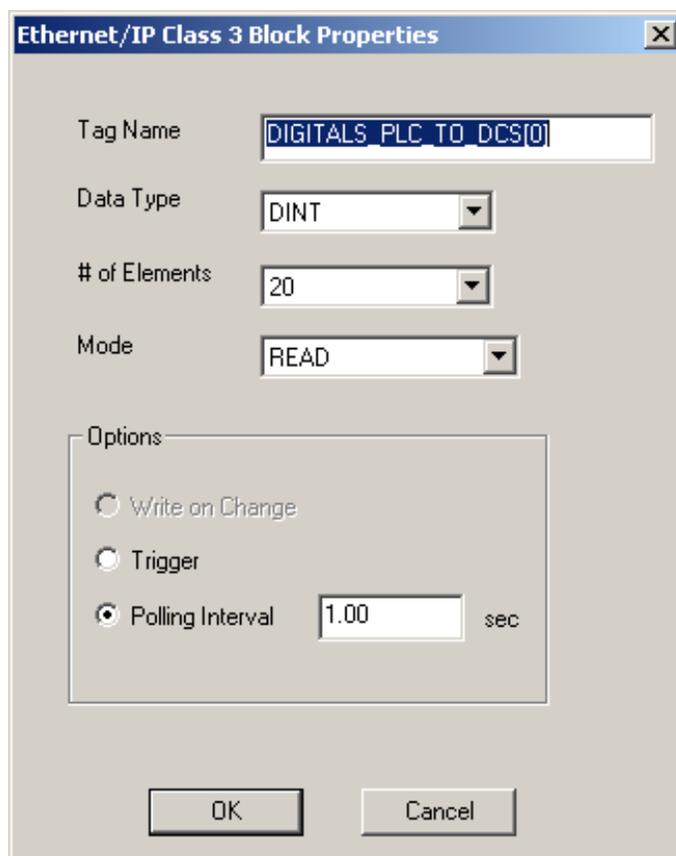


Fuente: toma de pantalla del sistema EthernetMPC I/O configuration.

En este caso se definirá una variable, DIGITAL_PLC_TO_DCS, está configurada como DINT o doble entero y leerá datos del PLC al DCS, en la figura

anterior también hay una variable DIGITAL_DCS_TO_PLC esta escribirá del DCS al PLC o como en toda comunicación y en otras palabras el PLC leerá del DCS.

Figura 52. **Configuración de mapeo de señales de mapeo en el protocolo Ethernet/IP Clase 3**

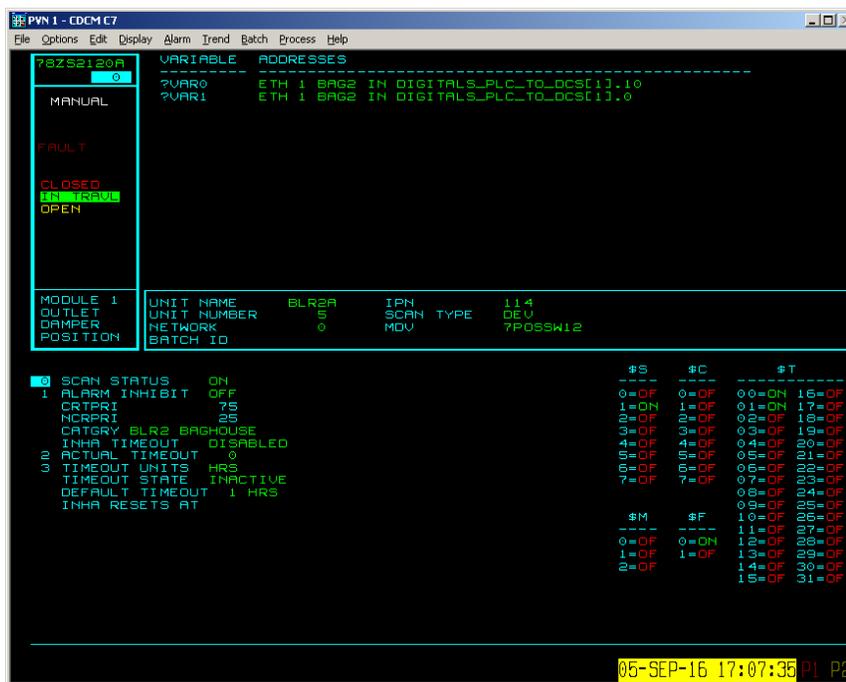


Fuente: toma de pantalla del sistema D/3®.

Después de configurar las variables de que se comunicarán entre el DCS y el PLC o viceversa estas se podrán verificar en el DCS por medio de la

herramienta NovaTech® Loop Maintenance que se abre en una pantalla PVN, y en esta se podrá monitorear su estado.

Figura 53. Pantalla de control, PVN



Fuente: toma de pantalla de D/3®.

Este proceso conlleva a mapear señales del PLC al DCS para ello utilizamos el mapa y sus direcciones, los tipos de variables, o sea que debíamos conocer a donde queríamos llegar y cómo hacerlo, pero en el caso contrario del DCS al PLC, debemos configurar las herramientas de comunicación y programación de los PLC, que para este caso será un ControlLogix 5000, para ello se hará uso del software RSLogix 5000, como condición preliminar el PLC debe estar en la posición Remoto y debe tener una comunicación previa con el software RSLinks, se abre el software RSLogix 5000, en el capítulo 4 se realizarán las configuraciones del caso.

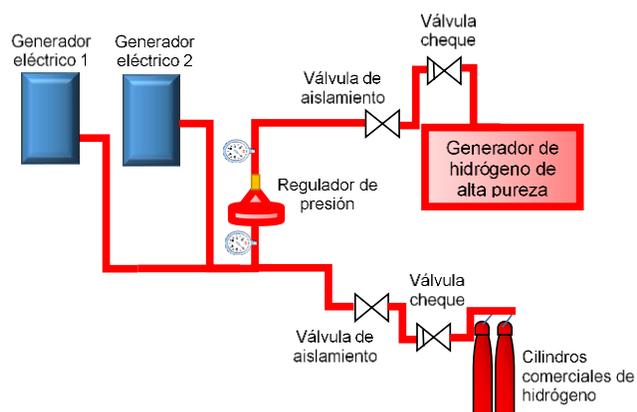
3.7. Diseño de la Instalación del equipo

El equipo se acoplará al sistema actual colocándolo en una zona que contenga un recinto seguro, ventilado, con buen suministro de energía y cumpliendo con las normas de seguridad eléctrica y de manejo de gases inflamables.

3.8. Punto de conexión para la alimentación de agua desmineralizada

Dadas las condiciones actuales de la planta, se toma agua desmineralizada del suministro de agua de la planta de producción de agua desmineralizada en una tubería de 4" de diámetro tubería estándar, se conecta al sistema que se encuentra actualmente, se muestra en la siguiente figura.

Figura 54. **Diseño de nuevo sistema de suministro de hidrógeno de alta pureza a las carcassas de los generadores eléctricos**



Fuente: elaboración propia.

3.9. Selección de protecciones

Para poder garantizar la seguridad de las personas, la maquinaria o equipos y la operación, se deben considerar los riesgos asociados a la producción de hidrógeno de alta pureza, así como también el ambiente de trabajo en una termoeléctrica, se consideran las normativas internacionales que ya contemplan estos riesgos.

Tabla XV. **Normativas de seguridad industrial para el buen manejo de los equipos de producción de hidrógeno de alta pureza**

Normativas internacionales	
Agencia / Código	Título de la normativa
DIN EN 1127-1	Atmósferas explosivas. Prevención y protección contra la explosión. Parte 1: Conceptos básicos y metodología.
ASME - B31.3	Tuberías de proceso
Norma IEC 60079-10-1	Normativa de aparatos eléctricos en ambientes con gases explosivos, Part 10-1: Clasificación de áreas de peligro.
NFPA – 69	Norma sobre sistemas de prevención de explosiones.
NFPA – 70	Por sus siglas en ingles National Electric Code

Fuente: normativas de operación de Teldyne y Proton.

Se deben definir las protecciones, tanto eléctricas como mecánicas. Dichas protecciones están definidas por los riesgos a librar, para este tipo de proyecto los riesgos son los siguientes:

- Sobrecalentamientos en el generador eléctrico
- Mala calidad de agua desmineralizada, por medio de conductividad eléctrica y partes por billón de sílice del agua
- Falla eléctrica en el equipo de suministro de agua desmineralizada

3.10. Pasos para la elaboración de una conexión intrínsecamente segura

El hidrógeno es un gas inflamable y debe ser monitoreado constantemente, los sistemas de producción de hidrógeno de alta pureza están diseñados para considerar los riesgos de explosividad por lo que deben hacer énfasis en los siguientes puntos:

- Tuberías de transporte y proceso
- Recipientes de almacenaje de hidrógeno de alta pureza

Por cualquier potencial fuga de hidrógeno en un recinto con una concentración de 1 % de hidrógeno en aire, los sensores de detección de hidrógeno se activarán.

- La producción de hidrógeno no se podrá iniciar hasta que el sistema de dilución se ha iniciado y dirigido por una cantidad de tiempo prescrita para ventilar el recinto
- Pérdida de dilución inicia una parada de emergencia
- Producción de hidrógeno cesa inmediatamente

El hidrógeno en el sistema se ventila para separarlo de las fuentes de ignición y se aleja de las mezclas de gases inflamables. Cualquier equipo eléctrico y de instrumentación, debe encontrarse fuera del recinto y de las zonas de dilución, y frecuentemente debe ser verificado el recinto por análisis de gases explosivos previo a la operación y mantenimiento, y también es necesario verificar temperaturas por bajo del punto de inflamabilidad para evitar que se pueda encender el hidrógeno.

3.11. Diseño eléctrico

Las protecciones contra riesgos eléctricos son proporcionadas por técnicas normadas, incluyendo puestas a tierra, aislamiento, protección de sobrecorriente y cortocircuito de protección IP 43 o mejores recintos. Entre las normas a considerar están las siguientes:

Tabla XVI. **Normativas de protección eléctrica para equipos del generador de hidrógeno**

Norma	Descripción
NFPA 70	Nacional Electric Code ® (por sus siglas en inglés)
NFPA 79	Electrical Standard for Industrial Machinery (por sus siglas en inglés)
CEI/IEC 60204-1	Seguridad de máquinas: Equipo eléctrico de las maquinas Parte 1: Requisitos generadores eléctricas
UL 61010-1	Safety Requirements for Electrical Equipment for Measurement, Control, and Laboratory Use - Part 1: General Requirements

Fuente: elaboración propia.

3.12. Mecanismos de cerramientos y protecciones de la máquina de producción de hidrógeno

El acceso al recinto debe ser controlado y registrado. También se proporcionan protecciones de las máquinas locales para evitar el contacto con las piezas en movimiento incluso con las puertas abiertas con el fin de proteger al personal de servicio / mantenimiento, estas protecciones pueden ser guardas de aislamiento de partes en movimiento y otra medida es el uso de herramientas de cero emisiones de chispa como las fabricadas en bronce.

El sistema de enfriamiento en las tecnologías de producción de hidrógeno es vital para su operación y desempeño. El sistema de protección desactiva las fuentes de alimentación eléctrica de los equipos de producción de hidrógeno si se pierde la señal de presión y flujo del agua de refrigeración. Las fuentes de alimentación ya incorporan protección de sobrecalentamiento, dependiendo del tipo de fuente de alimentación.

Compatibilidad electromagnética los equipos de producción de hidrógeno de alta pureza están diseñados para ser inmune a influencias eléctricas externas y controlar las emisiones electromagnéticas.

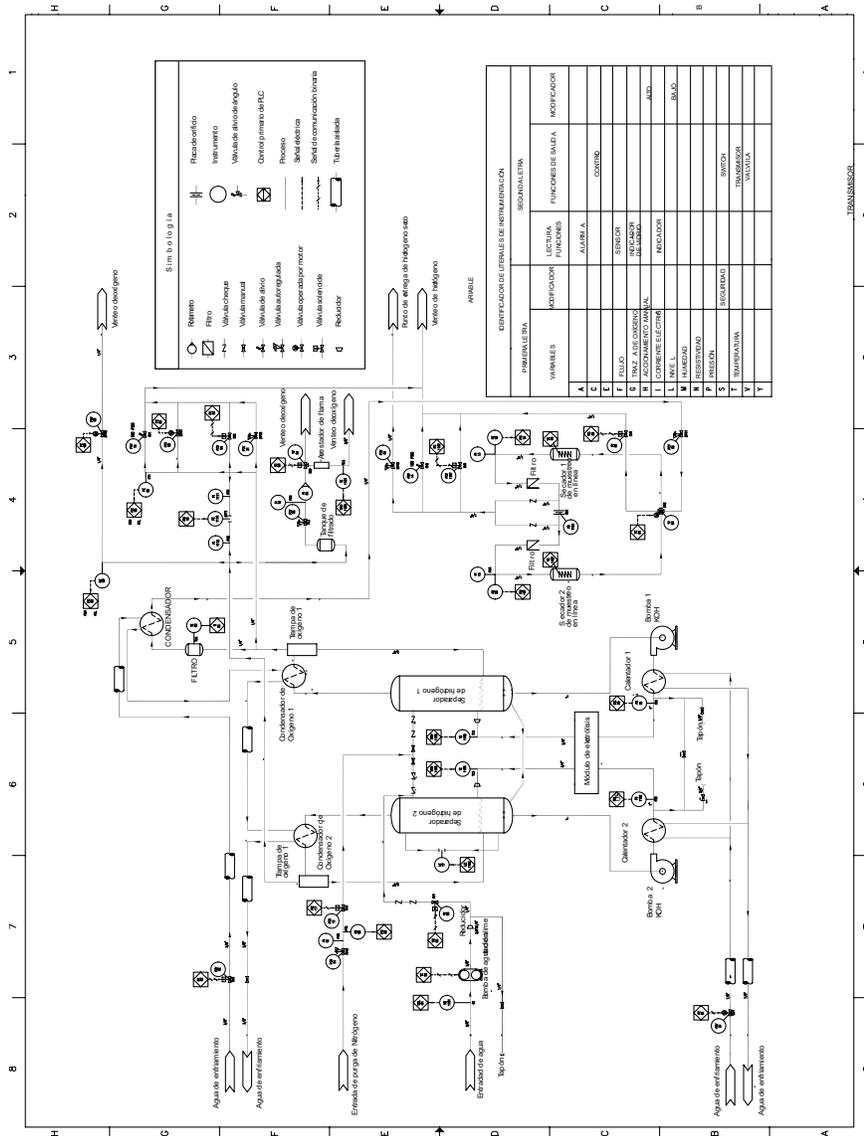
Compatibilidad electromagnética los equipos de producción de hidrógeno de alta pureza están diseñados para ser inmune a influencias eléctricas externas y controlar las emisiones electromagnéticas.

Los generadores de hidrógeno producen gas con presiones lo suficientemente altas como para ser considerado un peligro, Teledyne 148 PSI y Proton 240 PSI. Estas presiones están contenidas dentro de las tuberías de proceso, contenedores y válvulas que tienen rangos de presión por diseño considerablemente más altas que las presiones producidas. Las pilas de celdas de electrólisis del agua son la única fuente de presión y por naturaleza alivian antes de una explosión. Los sistemas de generación de hidrógeno proporcionan por norma una válvula de alivio de presión de seguridad cumpliendo con la norma ASME. Además, todas las tuberías de proceso, componentes y válvulas se encuentran dentro del contenedor de fluidos.

3.13. Punto de conexión de descarga de hidrógeno

Dada la ubicación determinada para el sistema de producción de hidrógeno, se determinó que el costado “Este” de la planta es el lugar adecuado para la conexión, se desarrolló un esquemático de la conexión de hidrógeno de alta pureza, que además de ser un punto seguro es muy buen ventilador.

Figura 55. P&ID del sistema de producción de hidrógeno de alta pureza



Fuente: elaboración propia, utilizando Inkscape.

3.14. Diseño de sistema de altermo de inyección con botellas por caída de presión

El diseño alternativo de inyección de hidrógeno esta implementado mediante un punto de conexión al sistema antiguo ya instalado en la Planta, este consta de una caseta para el suministro de hidrógeno mediante botellas portátiles suministradas por las empresas locales.

El diseño contempla una eventualidad o falla en la que sea necesario recurrir al proveedor local del gas para suplir la necesidad, esta área se encontrara ubicada en la zona más ventilada de planta y considerando una caseta de resguardo de gases inflamables, además la conexión constara de un sistema de control de presión y válvulas tipo cheque para el direccionamiento correcto del gas al generador únicamente, además todos los sistemas tanto móviles como de generación de hidrógeno de alta pureza constaran de sistemas de alivio de presión a ambientes de evacuación segura, dígase venteos seguros.

3.15. Diseño de puntos de venteo de oxígeno e hidrógeno

Los puntos de venteo de hidrógeno son de suma importancia ya que por la operatividad deben existir una purga, además los sistemas de medición de pureza de hidrogeno necesitan ventear cantidades pequeñas para realizar la medición.

El generador de hidrógeno de alta pureza produce hidrógeno y diluye oxígeno en la corriente de aire de ventilación. Es importante que los usuarios conozcan, comprendan y cumplan con todas las exigencias locales en materia de seguridad relacionadas con la manipulación del hidrógeno y los gases comprimidos. Es importante que los gases, hidrógeno y oxígeno se venteen en

direcciones contrarias y que poseen una distancia considerable para que no se combinen por corrientes de aire cercanas.

El oxígeno producido en el generador se controla continuamente para determinar el contenido de hidrógeno. La cantidad de hidrógeno en el oxígeno es una indicación directa de la integridad del módulo de electrólisis. La detección de hidrógeno en oxígeno se lleva a cabo utilizando un electrodo catalizado que combina químicamente los dos gases.

Dichos venteos deben dirigirse al punto más alto de la planta como principal parámetro de la planta, ya que, por ser gas liviano, de darse inflamabilidad no será riesgo para las personas, la planta y la operación.

3.16. Implementación de funcionalidad operativa o sistemas de gestión de procesos

La funcionalidad operativa o sistemas de gestión de procesos describen concisamente los pasos a seguir de tal forma que los operarios sean guiados para asumir sus tareas de uniformemente, estos documentos son modelos para que se lleven a cabo las tareas en la interfaz del sistema de control, considerando también las condiciones previas y de falla de los sistemas.

Esto se refiere a que se deben considerar los manuales de los fabricantes de equipos, en este caso el generador de hidrógeno de alta pureza y elaborar instructivos y procedimiento que contemplen las secuencias de chequeo de medio ambiente, salud y seguridad, rutinas de control mediante listas de chequeo, e inspecciones periódicas, y reportes de fallas según el diseño del fabricante.

Generalmente elaboran sus manuales en otros idiomas, por lo que tener documentos establecidos para la planta en español es importante para poder suministrar a los trabajadores la guía a seguir para efectuar de forma segura y controlada sus tareas.

3.17. Diseño de rutas operativas y listas de rutinas de chequeo

Las rutas operativas para el control, manipulación o manejo de sistema de producción de hidrógeno de alta pureza deben considerar todos los trayectos clave para el control total de la maquinaria, así como el establecimiento de la frecuencia de monitoreo.

Las listas de rutina de chequeo deben contener las siguientes mediciones de variables según las normas de control de hidrógeno de alta pureza:

- Periodicidad de los chequeos de pureza de hidrógeno
- Medición del límite de explosividad en el recinto de producción de hidrogeno
- Lecturas periódicas de los acumulados de producción de hidrógeno de alta pureza
- Lecturas periódicas de los acumulados de flujo de purga de O₂
- Lecturas periódicas de consumo de agua DM
- Lecturas periódicas de consumo de energía eléctrica
- Redacción de cualquier condición insegura que se observe en el recinto

El formato de lecturas debe contemplas la periodicidad, y tener una secuencia lógica de medición de variables y atributos del sistema de generación de hidrógeno de alta pureza.

Esta información debe ser procesada y evaluada por la supervisión de seguridad industrial, personal operativo y mantenimiento.

3.18. Propuesta de rutinas de mantenimiento periódicas de sistema

Según los lineamientos de los fabricantes de equipos de producción de hidrógeno de alta pureza se deben cumplir los mantenimientos rutinarios para preservar el desempeño óptimo. En la siguiente tabla se muestra el control de mantenimiento propuesto.

Tabla XVII. **Programación de mantenimiento del sistema de producción de Hidrógeno Teledyne**

Cronograma de mantenimiento del sistema de producción de Hidrógeno				
Tarea de Mantenimiento en horas	2000	4000	6000	8000
Celda de H2 en O2	X	X	X	X
Electrolitos de gravedad específica	X	X	X	
Módulos de chequeo	X	X	X	X
Cambio de electrolito		X		X
Limpieza de filtro de Hidróxido de potasio	X	X	X	X
Reemplazo de filtro de agua		X		X
Limpieza de filtro de agua de enfriamiento		X		X
Inspección de módulos internos		X		X
Inspección de bomba de Hidróxido de potasio				X
Inspección de los indicadores de presión		X		X
Mantenimiento de válvula cheque				X
Mantenimiento de válvula de alivio				X
Mantenimiento de interruptor de flujo				X
Mantenimiento de orificio del secador				X
Reemplazo del filtro del secador				X
Reemplazo del sensor de H2 en O2				X

Fuente: Manual de operación y mantenimiento de Teledyne

4. DESARROLLO DE LOS PROGRAMAS DE MONITOREO Y CONTROL DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO DE HIDRÓGENO E INTERFAZ DE USUARIO EN EL SISTEMA DE CONTROL DISTRIBUIDO

4.1. Diseño de Diagramas de flujo del control y monitoreo del sistema de control distribuido, DCS

Se desarrollan a continuación las rutinas para el control de la producción segura y continua de hidrogeno de alta pureza, para lo cual se detalla cómo se evalúan las señales a utilizar para el monitoreo seguro.

4.1.1. Evaluación de señales para el control y monitoreo del sistema de producción y control de hidrógeno para el generador

Las señales que se necesitan para poder mantener un ambiente seguro a las personas, instalaciones, equipos y las operaciones son los siguientes:

- Flujo de hidrógeno de alta pureza
- Flujo de agua desmineralizada
- Flujo de oxígeno en el venteo
- Consumo de energía
- Presión de hidrógeno
- Presión de agua desmineralizada

4.1.2. Evaluación de señales para el control y monitoreo del sistema de producción y control de hidrógeno para el generador

Siempre será necesario mantener la integridad de las personas, maquinaria y operación, por lo que las rutinas de disparo salvaguardarán estos valores, dadas las condiciones de peligro inherentes del hidrógeno de alta pureza, se seleccionaron como variables de monitoreo y control, los flujos y presiones de agua desmineralizada e hidrógeno de alta pureza.

4.1.3. Diseño de rutinas de control para implementación de señales de alarmas y disparo

Se listan los procesos de control y monitoreo de alarmas según los límites establecidos en el proceso de producción de hidrógeno.

4.1.3.1. Despliegue de Alarma

El PCM generará una alarma cuando un valor de proceso alcance o exceda un límite de alarma predefinido. La alarma se enviará a una cola de Alarma. Los despliegues de alarma son actualizados en colas.

En estas ventanas se visualizarán las alarmas, pueden ser vistas, y también dadas por vistas. En los despliegues se mostrará información específica sobre la alarma, como son:

- Fecha y hora de la alarma
- PCM que genero la alarma
- Para cual EPN es la alarma
- Descripción del EPN
- Alarma actual

4.1.3.2. Ventana Alarma

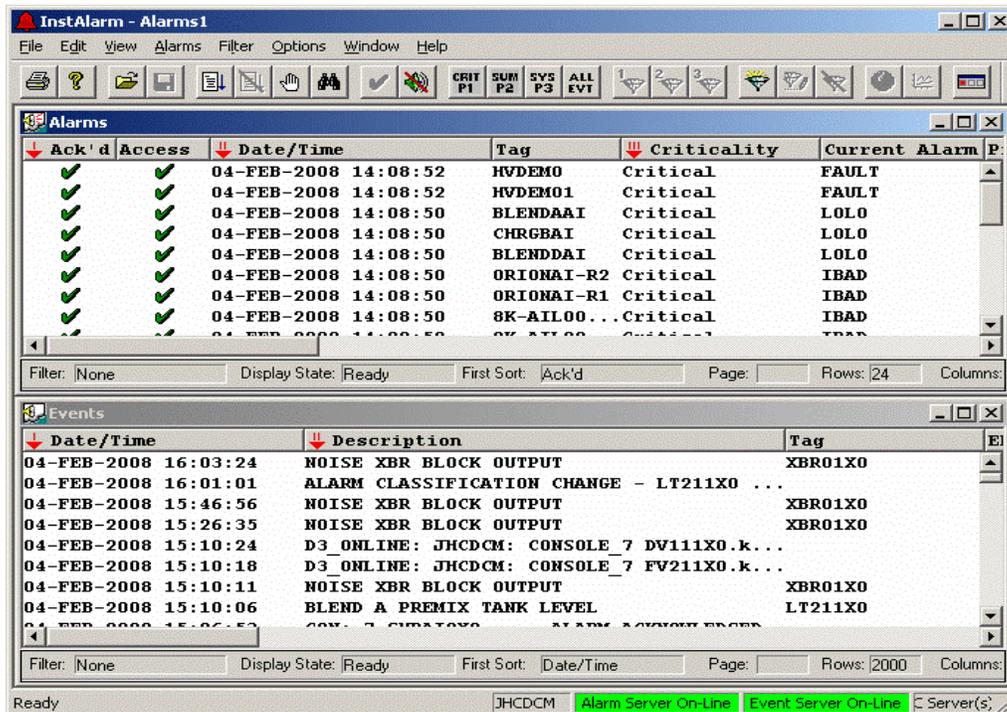
La aplicación InstAlarm™ es una ventana que muestra las alarmas y eventos de procesos en el D/3®. El display InstAlarm™ contiene dos ventanas, la ventana alarma y la ventana evento. La ventana alarma muestra alarmas de procesos actuales y la ventana evento muestra un historial las veces en que ocurren los eventos.

Entre los mensajes relacionados a alarmas de procesos en el D/3® enviados a InstAlarm™ están:

- Las ocurrencias de una alarma de proceso
- Mensajes de alarmas dadas por vistas
- Mensajes de alarmas borradas
- Mensajes de alarmas deshabilitadas

Todas las alarmas pueden ser dadas por vistas desde la ventana InstAlarm™, claro que esto requiere una acción de verificación previa, y evitar caer en actos negligentes de supresión de mensajes de forma arbitraria.

Figura 56. Configuración de alarmas del sistema D/3®



Fuente: toma de pantalla de InstAlarm™.

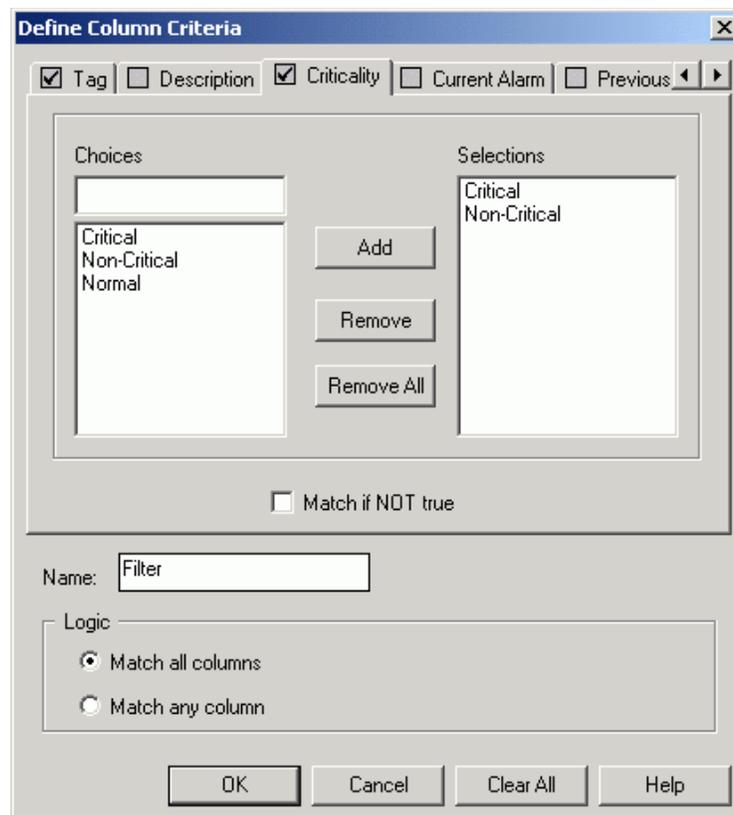
4.1.3.3. Filtros de alarmas

Los usuarios autorizados pueden crear filtros para limitar la cantidad de datos mostrados en la ventana InstAlarm™. Por ejemplo, un usuario podría definir un filtro sencillo que mostraría alarmas para una categoría en particular, o una que mostraría alarmas ocurridas en los últimos 5 minutos, o uno que mostraría alarmas relacionadas a un EPN en particular.

También se podrían crear filtros más complejos. La selección estaría basada en más de una condición. Por ejemplo, seleccionar alarmas críticas y no críticas para una etiqueta (en inglés Tag) en particular que hayan ocurrido dentro

los últimos 30 minutos. Estas múltiples condiciones pueden ser combinadas con una palabra lógica “AND” u “OR”. Los filtros se pueden guardar y volver a abrir desde InstAlarm™. En la selección del software “Define Column Criteria” del sistema de alarmas pueden definirse estos filtros, en la siguiente figura se muestra como poder definirlos.

Figura 57. **Criterios de selección del tipo de alarma**



Fuente: toma de pantalla de InstAlarm™.

4.1.3.4. Tipos de alarmas

Hay tres tipos de alarma: P1, P2 y P3. Alarmas críticas se mostrarán como P1, alarmas no críticas serán como P2, y alarmas de sistema propio de control como P3.

La categorización de una alarma como crítica, no crítica o de sistema se determina con el software de configuración D/3®. Las alarmas se pueden ver y ser dadas por vistas desde las páginas de las alarmas. La información que se muestra en una página de alarma incluye: una descripción de la alarma, hora de incidencia, nombre del EPN, nombre del nodo generador de alarma, y el nombre de la alarma.

4.2. Implementación de interfaces de usuario para el monitoreo y control de sistema de producción de hidrógeno

La implementación de las interfaces de usuario está diseñada en el software de Novatech®, este software es llamado Veditor, es amigable para el usuario, en el cual se podrán manejar figuras básicas de elemento de control, así como esquemáticos de equipos de procesos industriales, los cuales podrán tener indicativos con cambio de estado, como por ejemplo cambiar de color en condiciones de operación como los son arranque, paro o fallo. En este software se enlazan los datos de las variables almacenadas en los PCMs e interactúan en tiempo real en las pantallas definidas por el usuario. Dando como resultado un software de manejo o interfaz para el control y monitoreo de variables de proceso confiables y respaldadas por sus calibraciones periódicas.

4.3. Implementación de graficas de control y manejo de alarmas

Se inicia en el programa Veditor la creación de la pantalla de interfaz de usuario la cual debe ser amigable e intuitiva para que el Operario pueda relacionar fácilmente el proceso con el control y monitoreo de las variables.

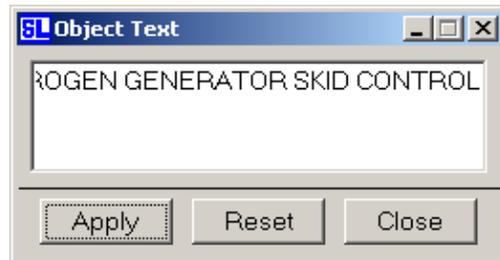
Este software posee muchas herramientas de dibujo, y de vinculación con las variables de proceso, haciendo así un enlace entre el sistema de control distribuido en tiempo real.

Este software posee muchas herramientas de dibujo, y de vinculación con las variables de proceso, haciendo así un enlace entre el sistema de control distribuido en tiempo real.

Este software posee muchas herramientas de dibujo, y de vinculación con las variables de proceso, haciendo así un enlace entre el sistema de control distribuido en tiempo real.

El programa se inicia abriendo un archivo nuevo con el nombre que queremos registrarlo. Para ellos abrimos el programa Veditor, luego en el archivo “, File” y nuevo.

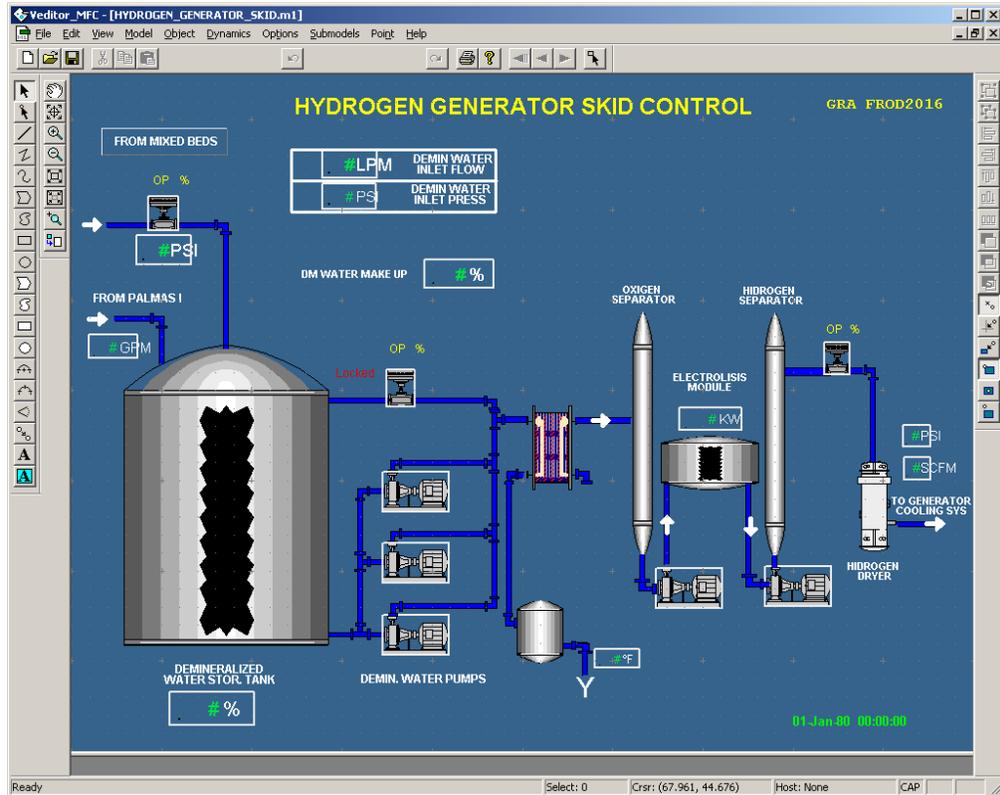
Figura 58. **Iniciando el modelado de pantalla**



Fuente: toma de pantalla de software Veditor.

Se realizan los esquemáticos del sistema de generación de hidrógeno de alta pureza por medio de las herramientas de dibujo y se enlazan las variables de control a la pantalla, la cual posee cambio de estado con válvulas, motores, generara alarmas según sus datos.

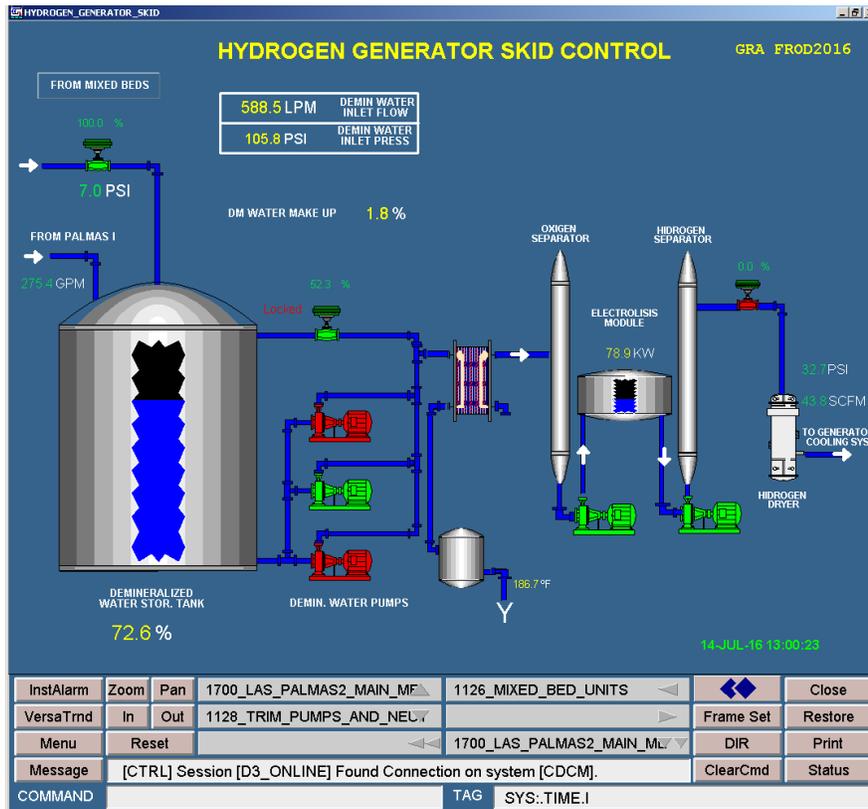
Figura 59. Implementación de pantalla de control y monitoreo de producción de hidrógeno



Fuente: toma de pantalla de software Veditor

Luego de dibujarla debe ponerse en funcionamiento por lo cual se carga a la base de datos de un programa que carga las pantallas llamado NovaTech® TotalVision ® para el manejo y visualización del proceso, y también llevando a todos los DCMs para poder interactuar en las pantallas de operación con los usuarios finales del control operativo, en la siguiente figura se muestra a la pantalla en operación.

Figura 60. **Pantalla en línea para el control y monitoreo de producción de hidrógeno, GRA FROD2016**



Fuente: toma de pantalla de Totalvision.

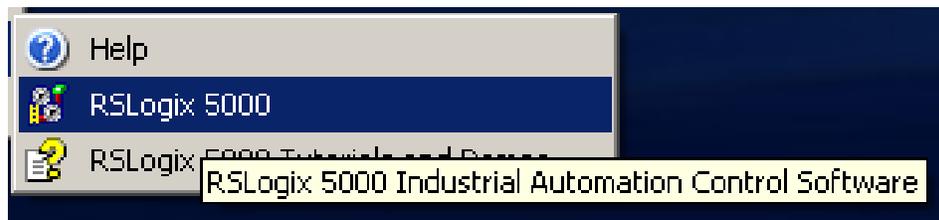
4.3.1. **Diseño de rutinas de disparo seguro para el sistema de producción de hidrógeno y enfriamiento del generador eléctrico**

Para el diseño de rutinas de alarma, disparo y control del sistema de producción de hidrógeno se utilizará un PLC ControlLogix 5000, en la programación del PLC se utiliza el programa RSLogix 5000, este programa brinda una interfaz para poder acceder, diseñar, cargar el programa y tener acceso a los

datos de monitores, también se designan los puntos de disparo para mantener de forma segura la operación de la generación de hidrógenos de alta pureza.

Para esto abrimos desde Windows el programa RSLogix 5000, previamente el PLC debe está en modo remoto y en el software RSLinks ya debe está configurado y corriendo en la red de PLCs.

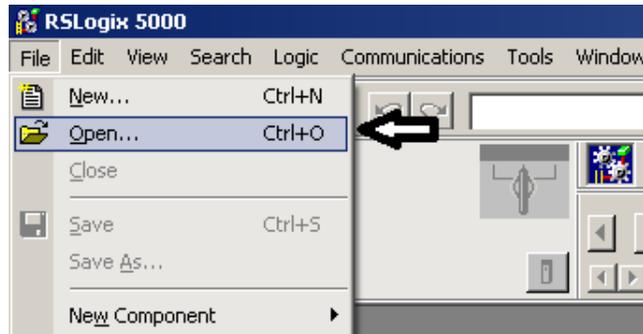
Figura 61. **Apertura del software RSLogix 5000 desde la barra de inicio de programas de Microsoft™ Windows®**



Fuente: toma de pantalla de Windows™.

Luego presionar en la barra de herramientas, en la ventana de “File”, luego “Open” y se buscará en la carpeta de almacenaje el archivo que contiene el programa a modificar.

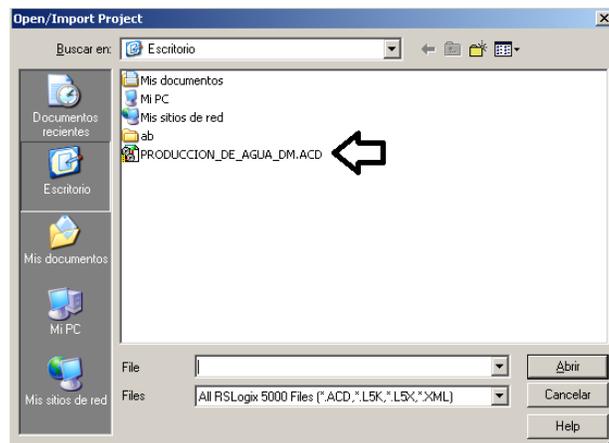
Figura 62. **Archivo para modificar en software de control**



Fuente: toma de pantalla de Windows™ y RSLogix 5000.

Luego abrimos un programa ya iniciado en el cual implementaremos las rutinas de control, en este caso el programa se llama PRODUCCION_DE_AGUA_DM.ACD.

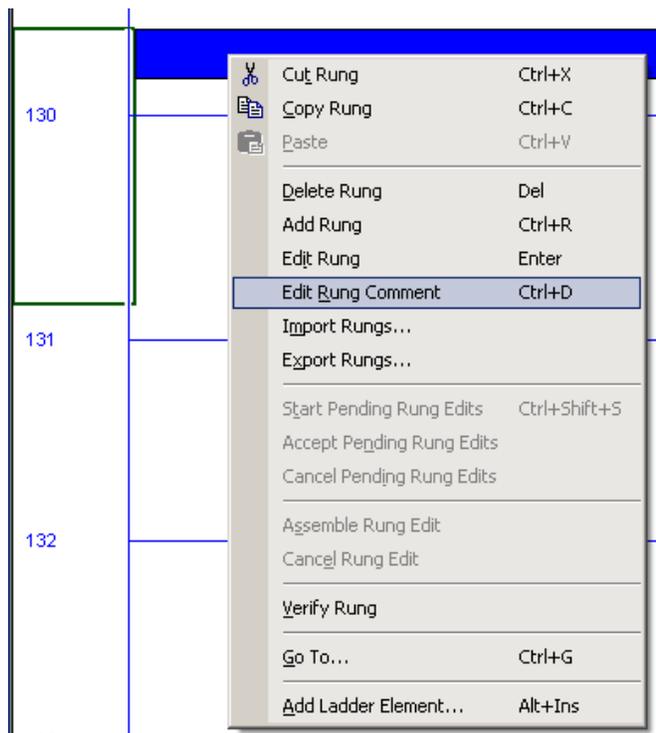
Figura 63. **Seleccionando archivo en formato ACD para edición**



Fuente: toma de pantalla de Windows™ y RSLogix 5000.

Luego entramos a las rutinas de control e identificamos los puntos para poder hacer las secuencias de disparo y monitores y alarmas, por medio del lenguaje de programación conocido como escalera.

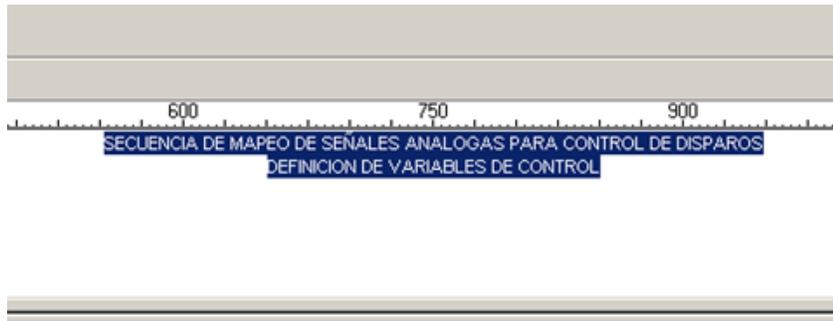
Figura 64. **Agregando comentario a programación escalera.**



Fuente: toma de pantalla de RSLogix 5000.

Se agrega un comentario de inicio que identifica las siguientes rutinas de secuencia. Esto abrirá un cuadro de texto donde se podrá editar el texto que identificará.

Figura 65. **Adición de texto de referencia en programación tipo escalera**



Fuente: toma de pantalla de RSLogix 5000.

Luego se inicia con la implementación de las rutinas, la primera contemplará las condiciones de la presión de hidrógeno, si supera cierto valor este dispara y librerá la falla.

Se inicia leyendo una señal de presión que está siendo leída por el PLC en el Rack 3, módulo de entrada 1, y canal 1, este dato se trasladará a una variable llamada "HIDROGEN_PRESS_MONITOR", en la siguiente tabla se muestran la relación entre las variables por lo cual leeremos una señal:

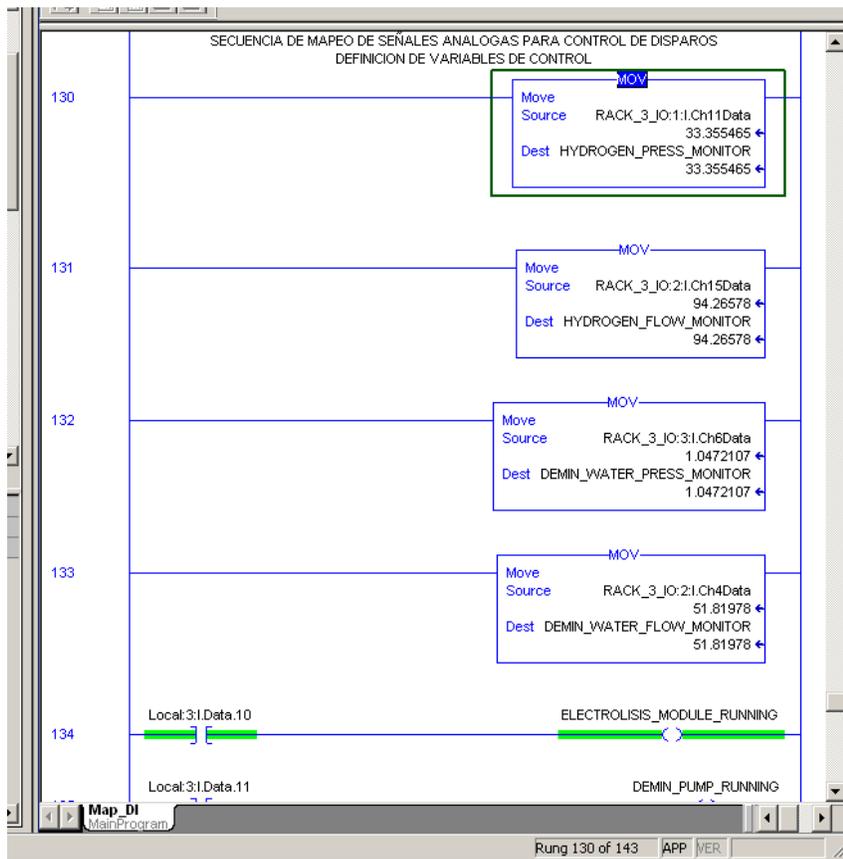
Tabla XVIII. **Datos de implementación de protección en PLC**

PLC	Variable en memoria PLC	Tipo de dato
MOV (RACK_3_IO:1: I.Ch11Data, HYDROGEN_PRESS_MONITOR)	MOV (RACK_3_IO:1: I. Ch11Data, HYDROGEN_PRESS_MONITOR)	Real
MOV (RACK_3_IO:2: I. Ch15 Data, HYDROGEN_FLOW_MONITOR)	MOV (RACK_3_IO:2: I. Ch15 Data, HYDROGEN_FLOW_MONITOR)	Real
MOV (RACK_3_IO:3: I. Ch6 Data, DEMIN_WATER_PRES S_MONITOR)	MOV (RACK_3_IO:3: I. Ch6 Data, DEMIN_WATER_PRESS_MONITOR)	Real
MOV (RACK_3_IO:2: I. Ch4 Data, DEMIN_WATER_FLOW_MONITOR)	MOV (RACK_3_IO:2: I. Ch4 Data, DEMIN_WATER_FLOW_MONITOR)	Real

Fuente: elaboración propia.

Se Implementación de lógica en software de diseño de control en PLC, se definen las variables previamente mapeadas en la tabla XI.

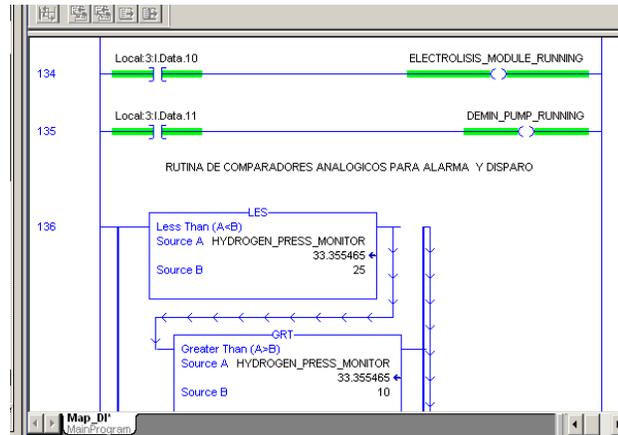
Figura 66. **Implementación de variables de control**



Fuente: toma de pantalla de RSLogix 5000.

Luego se elaboran las rutinas comparadoras para determinar las alarmas y disparos de las variables de control y generar un libramiento de falla.

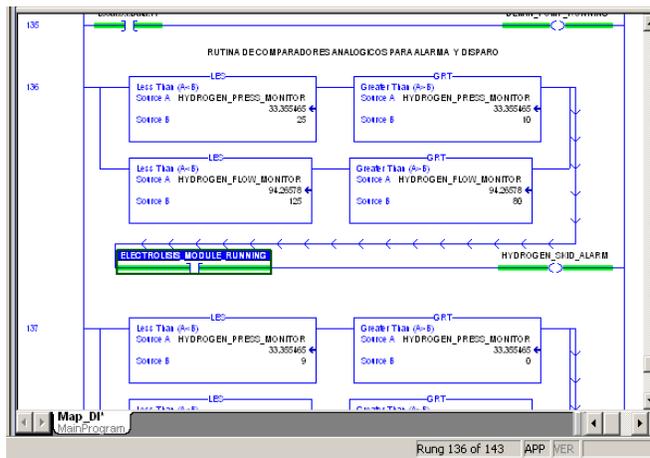
Figura 67. **Transfiriendo variables de campo a variables del PLC**



Fuente: toma de pantalla de RSLogix 5000.

Rutina para comparadores de alarmas y disparos por parámetros de control fuera de rango.

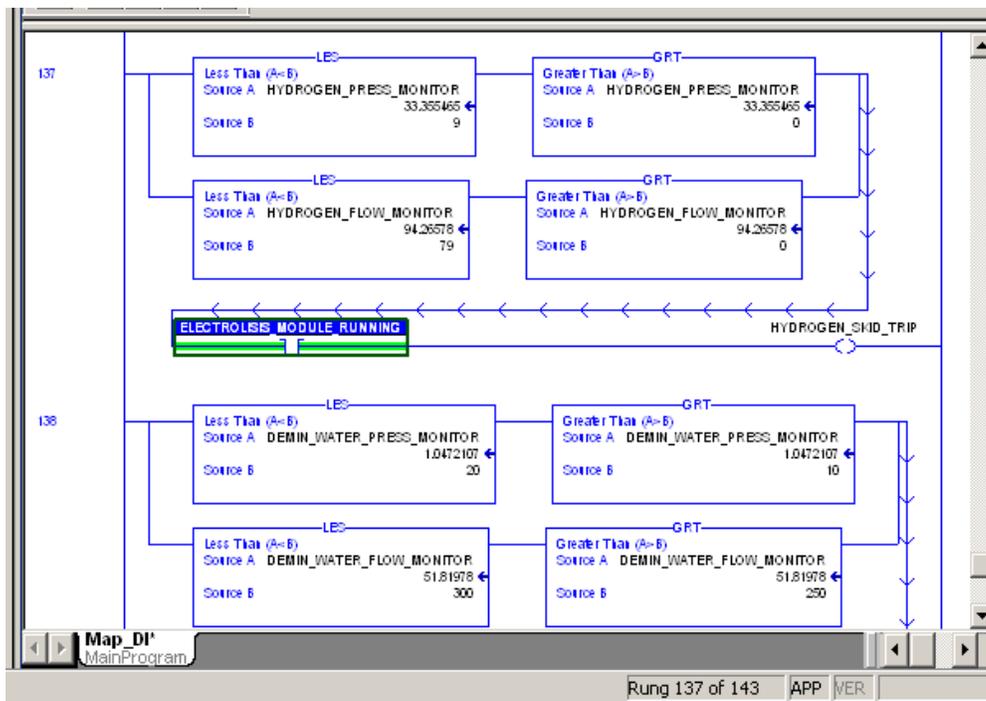
Figura 68. **Rutina de verificación de alarmas y disparos**



Fuente: toma de pantalla de RSLogix 5000.

Diseño de rutina de disparo y libramiento de falla por parámetros de presión y flujo fuera de rango operativo

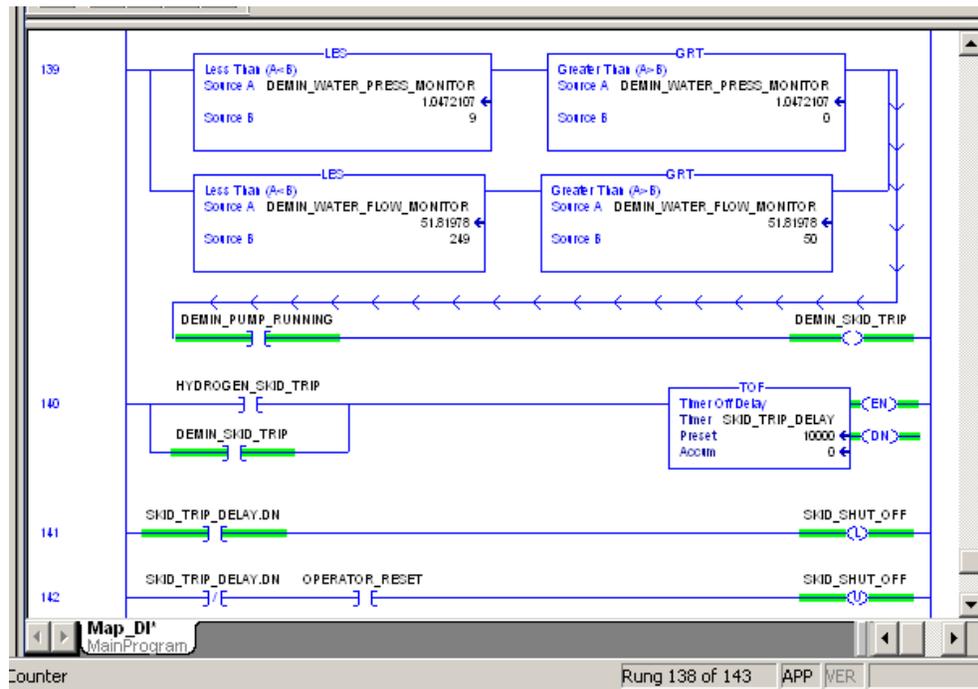
Figura 69. Rutina de monitoreo y comparación de variables de proceso



Fuente: toma de pantalla de RSLogix 5000.

Se considera para la lógica de disparo, que cualquiera de los parámetros de presión y flujo este fuera de rango, que esté funcionando el sistema de generación de hidrógeno de alta pureza, de darse estas condiciones se librará la falla apagando bomba de agua DM, y librando el sistema eléctrico del generador de hidrógeno, como se muestra en la siguiente figura.

Figura 70. Rutina final de disparo del sistema de generación de hidrógeno de alta pureza



Fuente: toma de pantalla de RSLogix 5000.

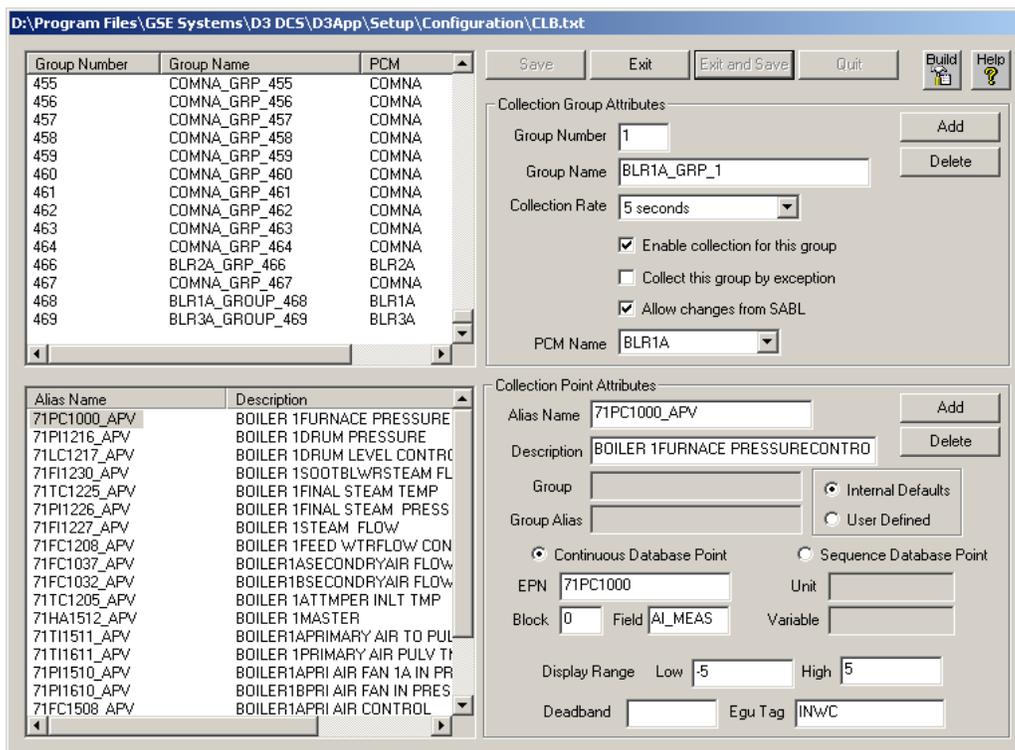
4.3.2. Diseño de parámetros de trazabilidad, selección de variables y gráficas de control de hidrógeno de alta pureza en base de datos en servidores del sistema de control distribuido

El DCS, como estándar maneja bases de datos de monitoreo de variables de procesos, también brinda soporte de respaldo para el almacenaje, exportación y auditoria de todas las variables que se configuren con categoría de tendencia.

4.3.3. Selección de variable de control para ser monitoreadas y almacenadas en base de datos de servidores del DCS

Para ello deben de configurarse para que el sistema las considere y las almacene con su jerarquía, en este proceso se debe saber el nombre de la variable, su tipo, la periodicidad, el PCM al que está cargada la variable.

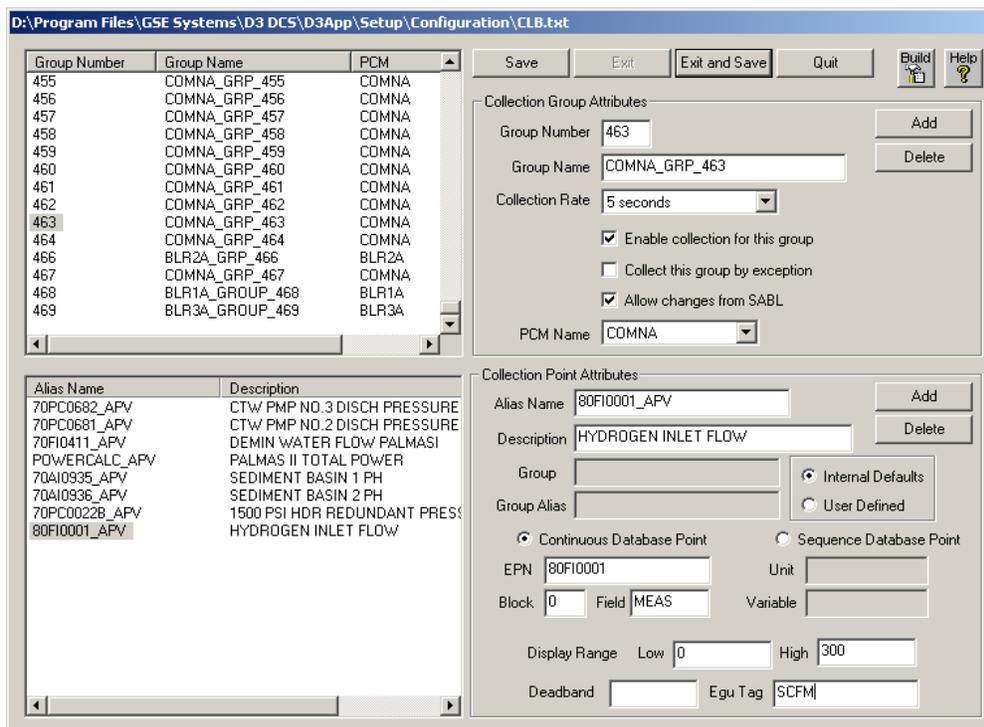
Figura 71. Abriendo base de datos de variables de proceso



Fuente: toma de pantalla de configurador de base de datos de NovaTech®.

Configuración de la base de datos de tendencias para agregar la variable de monitoreo, para este caso se configuró la variable 80FI0001, que representa la medición de flujo de hidrógeno.

Figura 72. Configuración de variable para monitoreo de tendencias

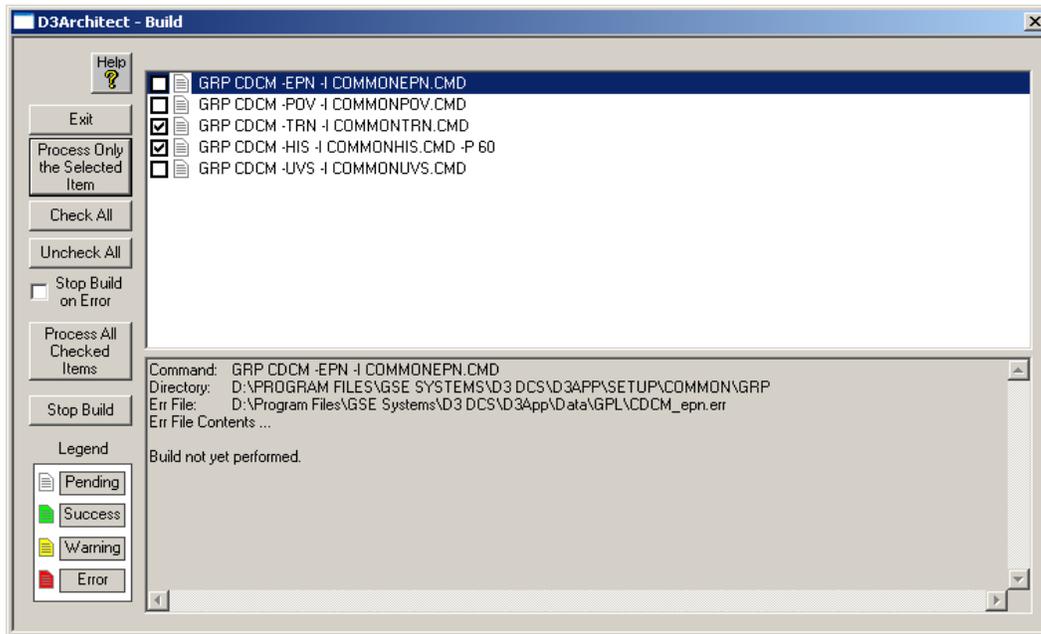


Fuente: toma de pantalla de configurador de base de datos de NovaTech®.

Se selecciona en el sistema de D/3 de manejo de archivos la base de datos de configuración del TrendR Collection List, en el cual se procederá a configurar en la base de datos de tendencias la variable que deseemos monitorear y agregar a la base de datos.

Al cargar la variable al sistema de tendencias, es necesario realiza el proceso de grabado en la base de datos, luego se podrá tener la tendencia de la variable agregada.

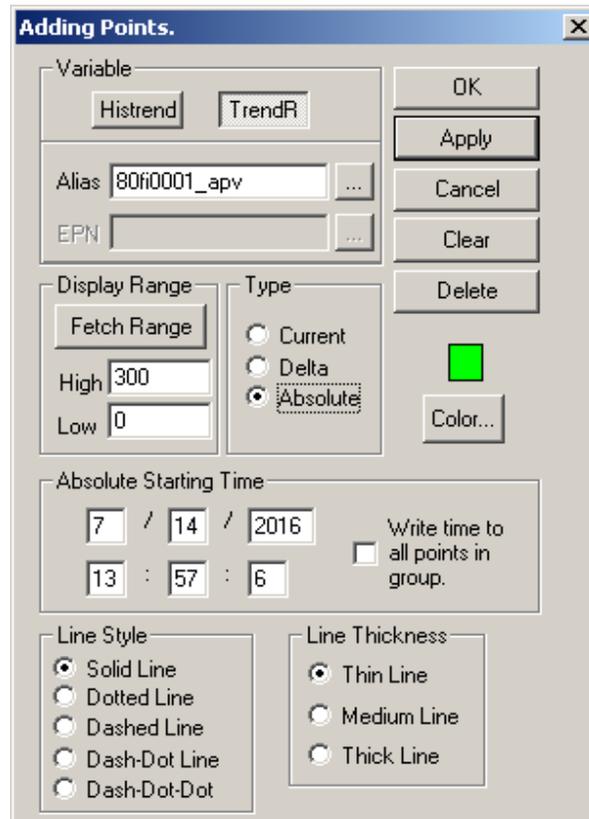
Figura 73. D3 Architec – Build



Fuente: toma de pantalla de NovaTech® D3 Architec -Build.

Luego se puede abrir una pantalla de tendencias en el PVN, y se podrán configurar las fechas y los intervalos de los históricos.

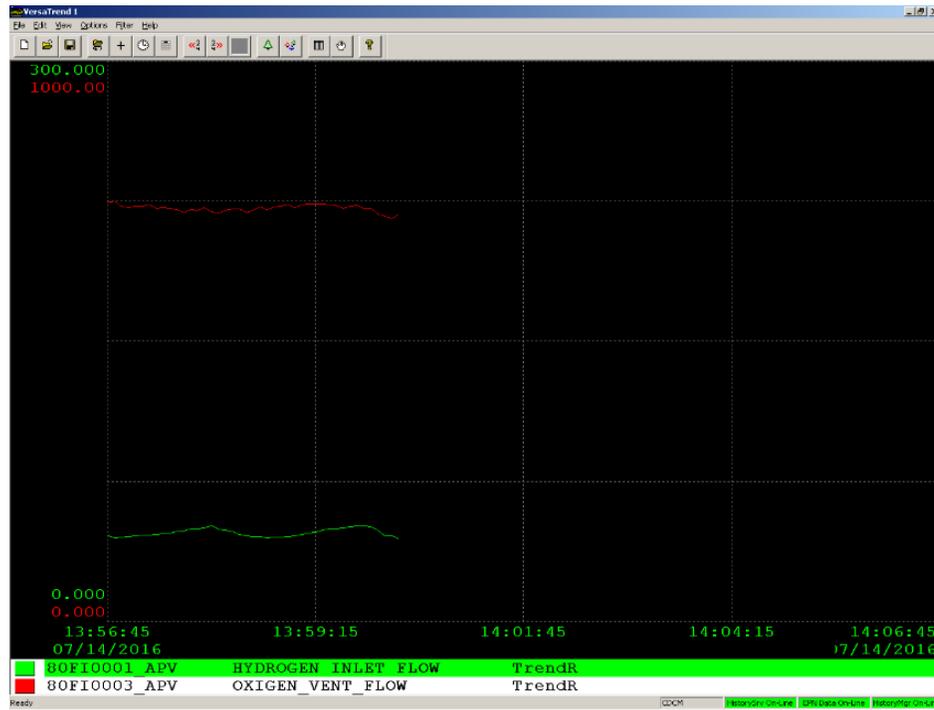
Figura 74. **Añadiendo variable al sistema de monitoreo de tendencias**



Fuente: toma de pantalla Adding Points en el sistema de tendencias.

Se añaden los puntos de monitoreo en la base de datos de tendencias y estas iniciaran a almacenarse con la finalidad de calcular tendencias, evaluar condiciones de operativas comparándolas con otras variables de proceso, y tener respaldo legar de la operación de los equipos.

Figura 75. VersaTrent, visualizando las variables de control del sistema de hidrógeno



Fuente: toma de pantalla NovaTech® VersaTrent.

5. ANALISIS ECONÓMICO Y FINANCIERO DE LA PREFACTIBILIDAD DEL PROYECTO

5.1. Análisis de costos operacionales previo a la implementación

Para el análisis de costos se consideran todas las actividades a realizar, montaje, mantenimientos, así como insumos operativos a utilizar durante la producción de hidrógeno de alta pureza.

5.1.1. Costos del hidrógeno

Se analizan los datos típicos del consumo por día en condiciones de la operación de hidrógeno de alta pureza que está en función de los MVAs, como se muestra en la curva de capacidad del generador eléctrico presentada en el capítulo 1.

Se consideran los datos típicos del costo de hidrógeno utilizado en la planta por año en función de la producción de energía. Se calcula que se consume \$. 0.29, por cada MWh en promedio.

5.1.2. Costo de insumos utilizados habitualmente

Principalmente se considera a los equipos como arrestadores de llama, reguladores de presión, interruptores del sistema de presencia de hidrógeno, analizadores de hidrógeno, patrones de calibración de H₂ en O₂, CO₂ en H₂ con el uso frecuente, pero con un costo mínimo respecto a los insumos que se presentan en la siguiente tabla.

Los principales gastos y consumos se listan a continuación

Tabla XIX. **Gastos operacionales de los sistemas de hidrógeno propuestos**

Consumos de agua, gas de purga, electricidad				
Tipo de consumo	Teledyne HMXT-50 de 100		Proton H2M SERIES de 76	
	SCF/H		SCF/H	
Agua Desmineralizada	0.42	GPH < 1 µs/cm	0.375	GPH < 0.1 µs/cm
Energía eléctrica	0.1927	kWh/ CU. FT	0.212	kWh/1 CU. FT
Nitrógeno utilizado en arranque y paro de sistema	200	Litro / por cada arranque y paro*	0	Litro/ por cada arranque y paro, no se utiliza purga
Agua de enfriamiento, para el sistema en general	11	GPM	15	GPM @ 41-95°F
Agua de enfriamiento a condensador	1	GPM @ 50 °F	0	No utiliza

Fuente: Manual de instalación y especificaciones técnicas HMXT GENERATOR y H2 Series 76SCF/H.

5.2. Costo de oportunidad por pérdida de generación por falta de disponibilidad de hidrógeno

El costo de oportunidad por pérdida de generación está en función de la potencia programada y el costo promedio de energía, en el caso esta investigación el costo de oportunidad estará en función de la potencia programada por el AMM, en el caso de planta, es de 76 MW.

El precio de oportunidad de la hora está definido como el costo en que incurre el sistema eléctrico para suministrar un kilovatio-hora (kWh) adicional de energía a un determinado nivel de demanda de potencia y considerando el parque de generación y transmisión efectivamente disponible.

La planta consta de dos unidades generadoras, y el sistema de suministro de hidrógeno es común a ambas unidades, por lo que el agotamiento del gas afectará la potencia completa de la planta.

5.3. Costo de oportunidad por pérdida de generación por falta de disponibilidad de hidrógeno

Se consideran los costos de compra de equipo al extranjero, costos de operación y mantenimiento por anualidad.

5.3.1. Costo del equipo y transporte e impuestos de exportación

Se considera la tributación en el estado de Guatemala de un 12 % y en base al conocimiento de costos de transporte de un 8 %, ambos pagos frecuentemente

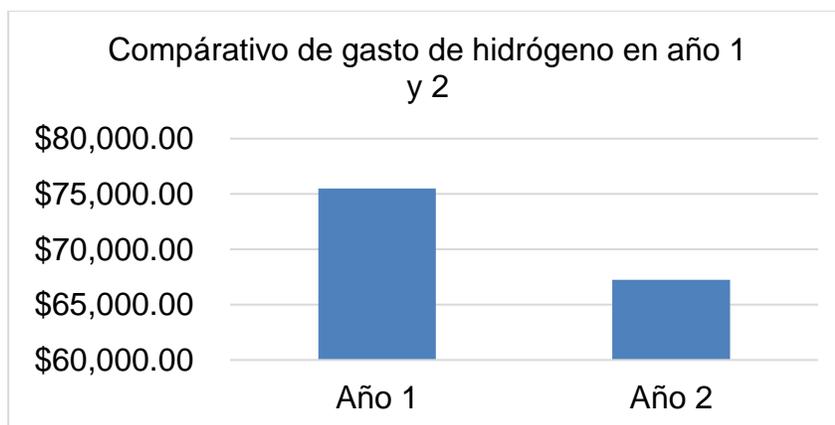
incrementan el costo de los insumos y equipos hasta en un valor de 20 % dato que será utilizado en los calculo financieros.

5.3.2. Costo del equipo y transporte e impuestos de exportación

Los costos de operacionales son los gastos que están relacionados con la operación del negocio. Estos son los necesarios para mantener la perpetuidad de la operación. Estos costos están en función de los insumos y los pagos relacionados.

Entre los consumos anuales se considera la compra de hidrógeno como el más relevante, para consideraciones de la investigación se comparan dos primeros años de operación, que fueron los años de mayor operación de la planta.

Figura 76. **Comparativo de gastos de hidrógeno por compra local**



Fuente: elaboración propia.

Al realizar el análisis se considera que la operación de los generadores eléctricos en el año 2 fue más estable que el año 1, y también que el valor más acertado para el análisis debe ser \$69.236,82 el cual está distribuido en el tiempo de operación de 11 meses, considerando un mes de mantenimiento anual, entonces el costo mensual será de \$6.294,26 por consumo de hidrógeno de alta pureza para la operación.

5.3.3. Costos de mantenimiento anual

Tomando datos base del costo promedio del mantenimiento anual del generador de hidrógeno, se define como el valor del tiempo que cada tecnología lleve en su reparación, para este caso se definen en la siguiente tabla:

Tabla XX. **Resumen de mantenimiento sugerido por cada tecnología**

Mantenimiento por tecnología (horas de operación)		
	Teledyne	
Periodicidad	XMXT 50	Proton H2m
Cada 3 meses	0	0.5
Cada 6 meses	4	0
Cada año	10	12
Horas totales de mantenimiento	14	13.5

Fuente: elaboración propia.

A continuación, se consideran los costos económicos por tipo, en la siguiente tabla se incluyen los costos por cada tecnología.

Tabla XXI. **Costo por mantenimiento anual**

Descripción del repuesto	Teledyne HMXTY (\$)	Proton H2m (\$)
Kit de mantenimiento anual \$	5.309	1.071
Costo de botella de hidrógeno \$	41,15	41,15
Costo del hidrógeno en botellas	246,92	246,92
Total, de costos anuales	5.555,92	1.317,92

Fuente: elaboración propia.

Se calculan según los datos de operación mantenimiento de Teledyne XMXT 50 y Proton H2m, estos son considerados para una operación continua durante un año. Se suman todos los costos por mantenimiento de cada equipo, para ello se revisan los manuales tomando en consideración los mantenimientos rutinarios, menores y mayores según las tecnologías de Proton y Teledyne.

Además de hacer una tabla comparativa numérica, también se agregan comentarios justificando cada tipo de costo por tecnología de cada ofertante del sistema de producción de hidrógeno de alta pureza.

Tabla XXII. Costo por mantenimiento periódico e inversión inicial

Cuadro comparativo de precios de equipos, por primera inversión			
Descripción de la inversión	Costo en tecnología XMXT 50 (\$)	Costo en tecnología H2m (\$)	COMENTARIO.
Generador de hidrógeno	138.264,80	146.619,00	Inversión inicial
Fuente de poder	48.579,53	0,00	H2m no lo incluye
Acondicionador de voltaje	0,00	14.422,00	H2m no lo incluye
Comisionamiento	11.677,77	15.725,00	Considerado
Kit de mantenimiento	4.959,78	1.071,00	Por mantenimiento
KIT de mantenimiento de filtrado	0,00	2.463,00	Por operación
Kit de reparación de válvula de aislamiento	0,00	1.191,00	HMXT no utiliza este diseño
Regulador de presión	1.177,12	728,00	Ambos
Válvula de 3 vías para venteo de 1/4"	0,00	320,00	Solamente lo requiere H2m
Trampa de fluidos	0,00	471,00	H2m lo requiere
TOTAL	204.659,00	183.010,00	

Fuente: elaboración propia.

5.4. Análisis financiero

Para el análisis financiero se utilizan las herramientas como el valor actual neto y la tasa de retorno de la inversión, a continuación, se describen sus principios y aplicaciones.

5.4.1. Definición del valor actual neto del proyecto o VAN

Tomando datos base del costo promedio del mantenimiento anual del generador de hidrógeno, se define como el valor del tiempo que cada tecnología lleve en su reparación, para este caso se definen en la siguiente tabla:

El VAN es un indicador financiero que mide los flujos de los futuros ingresos y egresos que tendrá un proyecto en el tiempo, para así determinar luego de descontar la inversión inicial, evaluar si nos quedaría alguna ganancia, y sí el resultado de la operación matemática es positivo, el proyecto es viable.

Basta con hallar VAN de un proyecto de inversión para saber si dicho proyecto es viable o no. El VAN también nos permite determinar cuál proyecto es el más rentable entre varias opciones de inversión. Incluso, si alguien nos ofrece comprarnos nuestro negocio, con este indicador podemos determinar si el precio ofrecido está por encima o por debajo de lo que ganaríamos de no venderlo.

La fórmula del VAN es:

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{V_t}{n(1+k)^t} - I_0 \quad (6)$$

Donde:

V_t , representa el flujo de caja en cada periodo.

I_0 , es el valor de desembolso inicial de la inversión

n , el número de periodos

k , es el interés

Tabla XXIII. **Criterios de aceptación del VAN.**

Condición	Significado	Decisión que tomar
$VAN > 0$	La inversión proporcionará ganancias por encima de la rentabilidad	Aceptable
$VAN < 0$	La inversión produciría pérdidas por debajo de la rentabilidad	Replantear el proyecto
$VAN = 0$	La inversión no produciría ni ganancias ni pérdidas	Dado que la rentabilidad no se ve afectada, se sugiere replantear el criterio, así como analizar los comportamientos de mercados.

Fuente: elaboración propia.

5.4.2. Definición de la tasa de retorno de inversión del proyecto, TIR

La tasa interna de retorno, TIR, es una tasa de rendimiento utilizada en el presupuesto de capital para medir y comparar la rentabilidad de las inversiones.

En el contexto de ahorro y préstamos al término TIR también se le conoce como la tasa de interés efectiva.

La tasa interna de retorno de una inversión o de un proyecto es la tasa efectiva anual compuesto de retorno o tasa de descuento que hace que el valor actual neto de todos los flujos de efectivo (tanto positivos como negativos) de una determinada inversión igual a cero.

En términos más específicos, la TIR de la inversión es la tasa de interés a la que el valor actual neto de los costos (los flujos de caja negativos) de la inversión es igual al valor presente neto de los beneficios (flujos positivos de efectivo) de la inversión.

Las tasas internas de retorno se utilizan habitualmente para evaluar la conveniencia de las inversiones o proyectos. Cuanto mayor sea la tasa interna de retorno de un proyecto, más deseable será llevar a cabo el proyecto. Suponiendo que todos los demás factores iguales entre los diferentes proyectos, el proyecto de mayor TIR probablemente sería considerado el primer y mejor realizado.

Fórmula de la TIR:

$$TIR = \sum_{t=0}^n \frac{F_n}{(1+i)^n} \quad (7)$$

Donde:

t, el tiempo del flujo de caja

i, la tasa de descuento (la tasa de rendimiento que se podría ganar en una inversión en los mercados financieros con un riesgo similar).

n, numero de periodos.

F_n, Flujos de caja en cada periodo "n".

5.4.3. Comparación técnica de la implementación

Para ello se realizó el siguiente cálculo para la implementación de la instalación, en la siguiente tabla se listan los costos.

Tabla XXIV. **Costo de implementación de sistemas auxiliares**

Instalación	Costo (\$)
Cimentación	1.000
Caseta	750
Tubería para agua desmineralizada	300
Tubería para agua de enfriamiento	150
Válvulas para agua de enfriamiento y desmineralizada	100
Cable de potencia	1.000
Tubería y canaletas para cableados	200
Cable de control	500
TOTAL \$	4.000

Fuente: elaboración propia.

Dada la necesidad y características necesarias en el proyecto, se comparan los gastos de implementación de dos marcas de sistemas de producción de hidrógenos de alta pureza, Teledyne y Proton.

Tabla XXV. **Gastos de implementación del generador de hidrógenos de alta pureza**

Descripción del gasto	XMXT 50 (\$)	H2m (\$)
Total, de costos de operación y mantenimiento anuales del generador de hidrógeno	16.096,30	12.847,20
Inversión de compra e instalación del equipo	204.659,00	183.010,00
Impuestos y logística	40.931,80	36.602,00
Obra civil e instalación	4.000,0	4.000,00
Costo de 14 horas anuales de personal dedicado a la instrumentación	167,2	161,30
Total	265.854,30	236.620,50

Fuente: elaboración propia.

Al darse la implementación del proyecto independientemente de la marca, se obtendrá un ahorro, por lo que será positivo para la empresa, teniendo este dato y el costo total de implementación es factible determinar el TIR, en la siguiente tabla se calcula el ahorro y el TIR.

Tabla XXVI. **Cálculo de TIR**

Ahorro	Teledyne	Proton
Costo anual de comprar hidrógeno (ahorro) (\$)	69.236,80	69.236,80
Totales (\$)	69.236,80	69.236,80
Retorno de inversión, TIR (años)	3,80	3,40

Fuente: elaboración propia.

Tomando solamente al TIR como único parámetro de toma de decisión el sistema Proton es el más ventajoso, ya que se logra recuperar la inversión en menor tiempo que Teledyne, sin embargo, el análisis debe completarse utilizando el VAN, para tomar en cuenta los flujos en el tiempo, al complementar los dos métodos de selección de proyecto se podrá determinar cuál de los dos sistemas se adecua más al sistema a trabajar en Guatemala.

Tabla XXVII. **Cálculo del VAN del proyecto**

Ahorro en compra de hidrógeno proyectado a 15 años.	Valor
Ahorro mensual del hidrógeno	\$6.294,26
Aumento anual del costo del hidrógeno	7,00 %
Periodo (meses)	180
VAN	\$1.058.846,87

Fuente: elaboración propia.

En la siguiente tabla se muestra los gastos de consumos operacionales anuales de un sistema de producción de hidrógeno de alta pureza:

Tabla XXVIII. Gastos anuales por consumos de los sistemas de producción de hidrógeno de alta pureza.

Descripción del rubro	Teledyne HMXT-50 100 SCF/H		Proton H2M SERIES 76 SCF/H	
	Valor	Costo / Periodo	Valor	Costo / Periodo
Agua desmineralizada	66,10	\$ / anuales	44,68	\$ / anuales
Energía eléctrica	10,439.10	\$ / anuales	11,484.6 3	\$ / anuales
Una botella de nitrógeno anualmente	35.17	\$ / anuales	0.00	\$ / anuales
TOTALES	10,540.37	\$/ anuales	11,529.3 1	\$/ anuales

Fuente: elaboración propia.

A continuación, se calculan los costos del personal de mantenimiento para el sistema de producción de hidrógeno por hidrólisis alcalina del agua desmineralizada, para ello se utilizará la herramienta financiera, VAN.

Tabla XXIX. **Gastos de operación y mantenimiento a 15 años**

Gastos en operación y mantenimiento proyectado a 15 años.	Teledyne	Proton
Costos mensuales de personal de mantenimiento	\$13.94	\$13.44
Costo de la vida anual	3.00 %	3.00 %
Periodo meses	180	180
VAN de costos de personal de mantenimiento	\$2,435.28	\$2,348.30

Fuente: elaboración propia.

A continuación, se calculan los gastos de insumos y repuestos de cada tecnología.

Tabla XXX. **Costos por insumo proyectados a 15 años**

Costos insumos y repuestos proyectados a 15 años.	Teledyne	Proton
Gastos mensuales en repuestos	\$462,99	\$109,83
Tasa de interés	7,00 %	7,00 %
Periodo en meses	180	180
VAN, costos de parte e insumos	\$77.886,77	\$18.475,56

Fuente: Elaboración propia.

Considerando costos por personal de mantenimiento, costos de insumo y repuestos, se tiene como resultado el costo anual por operación anual.

Tabla XXXI. **Costos totales proyectados anualmente**

Costos proyectados por 15 años	Teledyne	Proton
VAN, costos por mano de obra de mantenimiento	\$2.435,28	\$2.348,30
VAN, costos por insumos y repuestos	\$77.886,77	\$18.475,56
VAN, costos totales	\$80.322,05	\$20.823,86

Fuente: elaboración propia.

Dados estos datos y tomando en cuenta el ahorro por cambio de tecnología, y considerando los costos por cada marca, se determina la última tabla, con la diferencia, se define el ahorro neto proyectado a 15 años, el cual toma el ahorro total por cambio de tecnología y sustrae el valor de los costos totales.

Tabla XXXII. **Comparativo proyectado de evaluación del ahorro del proyecto**

Ahorro neto proyectado a 15 años	Teledyne (\$)	Proton (\$)
Ahorro por compra externa de hidrógeno (suma)	1.058.846,87	1.058.846,87
Costos de producción de hidrógeno por hidrólisis alcalina del agua DM (resta)	80.322,05	20.823,86
Ahorro neto calculado (diferencia)	978.524,83	1.038.023,01

Fuente: elaboración propia.

Tomando en cuenta que la tecnología planteada por Proton, que posee un TIR de 3.4 menor y un ahorro mayor de \$1.0387.023,01, es la opción para implementar en la planta, sin menospreciar a la otra marca, que tiene un TIR de 3.85 y un ahorro de \$978.524,83 que es un valor muy similar, por lo que se deberán considerar otros factores como garantía, atención en la instalación, suministro de repuestos, los cuales podrán validar con el tiempo la decisión.

CONCLUSIONES

1. Los sistemas de producción de hidrógeno de alta pureza utilizando hidrólisis alcalina son la opción económica para una planta termoeléctrica, dado el aprovechamiento del agua desmineralizada, sistemas de control con capacidad de expansión y el suministro constante de energía eléctrica.
2. La producción en sitio de hidrógeno de alta pureza es la opción más favorable para poder asistir una emergencia sin verse afectada la disponibilidad de la planta.
3. El enfriamiento por medio de un sistema de hidrógeno de alta pureza es mejor método de preservar el aislamiento de generador eléctrico.
4. En sistema de control distribuido es la mejor opción para la automatización de una industria, dada la capacidad de expansión de control, versatilidad operativa, operaciones con bases de datos de recolección de variables de proceso y análisis de tendencias en tiempo real.

RECOMENDACIONES

1. Valorar las consideraciones técnicas y económicas para poder hacer de manera justa la compra de un equipo de producción de hidrógeno de alta pureza, y no se deben prescindir de marcas o modelos de equipos, y además verificar bajo condiciones operativas y condiciones existentes en la planta de generación de energía eléctrica.
2. Evaluar como opción de automatización y control de una planta de generación de energía eléctrica un sistema de control distribuido, ya que este puede ser expandido a futuro según así lo requiera las necesidades de la planta.

BIBLIOGRAFÍA

1. Baca, Guillermo, Ingeniería económica, 8ava edición, editorial Fondo Educativo Panamericano, Bogotá Colombia, 2000. 397p.
2. Cresu, Antonio, Instrumentación Industrial, 6ta edición, Editorial Alfaomega edición original publicada por Marcombo, S. A., España, 1997. 794 p.
3. D/3® Ethernet I/O Network Configuration, NovaTech, [en línea]. <https://back.novatechautomation.com/wp-content/uploads/2011/03/WP_D3Ethernet_0824091.pdf> [Fecha de consulta: mayo 2016].
4. Hydrogen Generator H-Series Spec sheet y Hydrogen Generator S-Series Spec sheet, [en línea]. <<https://www.protononsite.com/sites/default/files/2017-04/PD-0600-0062%20Rev%20F.pdf>> [Fecha de consulta: junio 2016].
5. Kitcher, Christopher y Watkins, A. J. Electrical installation calculation basic. 9a. Level 2, Reino Unido, 2014. 214p.
6. López. Francisco, Sistemas distribuidos, Universidad autónoma metropolitana, Mexico. 2015. 193 p.

7. Manual de entrenamiento de operación y mantenimiento M-440, Generator Components. General Electric. Estados Unidos. 1977. 22 p.
8. H Series Hydrogen Generation Systems, HOGEN® Serie H, [en línea]. <<https://www.protononsite.com/sites/default/files/2017-04/PD-0600-0062%20Rev%20F.pdf/>> [Fecha de consulta: mayo 2017].
9. Norma DIN EN 1127-1: Atmósferas explosivas. Prevención y protección contra la explosión. Parte 1: Conceptos básicos y metodología. 2012. 10 p.
10. Norma IEC 60079-10-1. Atmósferas explosivas - Parte 10-1: Clasificación de áreas. 2015. 23 p.
11. Norma NFPA 69: Norma sobre sistemas de prevención de explosiones. 2014. 87 p
12. Norma Standard ANSI/ISA 5.4 Instrument Loop Diagrams. 1991. 22 p.
13. OGATA, Katsuhiko, Ingeniería de control moderna, 5ta edición, Pearson Educación, S.A., Madrid, 2010, 908p.
14. HMXT Generator Operations and Maintenance Manual, TELEDYNE TITANTM HMXT GENERATOR SERIES. Estados Unidos 2014, 109 p.
15. TITAN™ HMXT SERIES, Technical Description. [en línea]. <<https://www.teledyne.com/products/Hydrogen%20Oxygen%20>

Generation%20Systems/Product%20Files/HMXT%20Spec%20Sheet.pdf> [Fecha de consulta: mayo 2017].