

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y TEXTIL



**“PROPUESTA TÉCNICA DE ESTUDIO, INSTALACIÓN,
MONTAJE Y PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DE UNA
PLANTA DE HIDRÓGENO UHP PARA LA PURIFICACIÓN
DE ARGÓN CRUDO 95% PRODUCIDO EN UNA PLANTA DE
DESTILACIÓN CRIOGÉNICA DE GASES DE AIRE”**

TESIS

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO QUÍMICO

PRESENTADO POR:

EDIÑO MUEDAS TAIPE

LIMA - PERU

Digitalizado por:

2014

DEDICATORIA

A Dios Todopoderoso, por protegerme y otorgarme las herramientas necesarias para alcanzar mis metas. Gracias por guiarme y darme la fortaleza de seguir adelante y triunfar en la vida.

A mi madre Rolanda, mujer ejemplar y madre abnegada quien con su apoyo y comprensión me llenó de ánimos de superación para lograr todas las metas propuestas y alcanzar el éxito.

A mi padre Godofredo, hombre honorable que supo guiar mis pasos por el camino del bien, ofreciéndome su apoyo incondicional para alcanzar esta meta.

A mi esposa Cindy, ser especial quien ha sido un gran ejemplo de superación y triunfo, que me ha regalado momentos maravillosos en la vida y quien luchó conmigo para alcanzar este sueño.

A mi hija Camila Valentina, por ser fuente de inspiración por ser cada día mejor.

A mis hermanos, por su ejemplo de lucha, visión y superación, para alcanzar las metas propuestas.

A mi sobrina Marjorie, para que le sirva de ejemplo y motivación en su vida como estudiante universitaria.

De igual modo, merecen gran atención todos mis familiares y amigos para que sirva de ejemplo de amor, esfuerzo y dedicación por lo que deseamos, sigan siempre adelante y que Dios los bendiga.

AGRADECIMIENTO

A mis padres, por creer ciegamente en mí, les agradezco de corazón todo lo que han hecho en el recorrido de estos años y por estar siempre presente en mi lucha por alcanzar esta meta, los quiero.

A mi esposa por estar a mi lado brindándome su apoyo de manera incondicional en los momentos más difíciles, confiando en mí y transmitiéndome sus mejores deseos. Tu esencia pura llena de momentos gratos mi vida.

A mis hermanos por estar siempre atentos brindándome su apoyo y comprensión para alcanzar este logro, gracias por ser especiales.

A mi asesor académico, Ing. Teodoro Cárdenas, por ayudarme y brindarme sus conocimientos en el desarrollo de este trabajo.

Al Ing. Jorge Arévalo Daza, por darme las pautas necesarias para la realización de este trabajo.

A la Universidad Nacional de Ingeniería y a sus profesores, por ser patrón fundamental de mi formación profesional.

RESUMEN

El presente estudio tiene como tema fundamental la instalación, montaje y puesta en funcionamiento de una Planta de Hidrógeno UHP para lograr la purificación del argón crudo que se produce en una planta de destilación criogénica de gases del aire.

Este estudio fue realizado en las instalaciones de la empresa Messer Gases del Perú, dedicada a la fabricación de gases del aire por destilación criogénica, con el objetivo de producir argón UHP y no depender de la importación de este producto para satisfacer las necesidades del mercado nacional en sus diferentes presentaciones.

En la actualidad, Messer Gases es una planta que produce oxígeno y nitrógeno en forma líquida y gaseosa; la planta de producción de argón fue instalada hace algunos años pero no está en funcionamiento debido a la carencia de hidrógeno para lograr la purificación del argón crudo 95%.

Como se sabe el aire es una mezcla de diferentes tipos de gases, de los cuales los más importantes son los siguientes: nitrógeno 78,11%, oxígeno 20,96%, y argón (0,93%). La separación de estos componentes es un método complicado en el proceso de la destilación criogénica, siendo esta un proceso que ocurre a temperaturas muy bajas (-196°C).

Con el sistema que cuenta la empresa, se logra obtener argón a una pureza de 95% (5,0% O₂ como impurezas) y una de las formas de eliminar el porcentaje de oxígeno es inyectando gas Hidrogeno UHP en un reactor de oxidación catalítica de tal manera que esta reacción de cómo consecuencia vapor de agua, siendo este una impureza más fácil de eliminar.

El estudio involucra la realización de pruebas a nivel de planta ya que se contaban con la mayoría de los equipos para la producción de argón UHP, de tal manera que permitan determinar los parámetros del sistema y los índices de consumo y producción.

Es así como Messer Gases evalúa los diferentes métodos de obtención de hidrógeno UHP y decide adquisición de una Planta de hidrógeno por electrólisis del agua, siendo parte de este trabajo el montaje y la puesta en funcionamiento de esta planta.

Luego del funcionamiento de la planta de hidrógeno, se realizan las corridas necesarias para evaluar los ratios máximos de consumo de hidrógeno así como también los de producción de argón UHP.

Finalmente, se efectúa el análisis económico del proyecto así como el respectivo análisis beneficio-costos que traería consigo la aplicación de dicha propuesta.

ÍNDICE GENERAL

	Página
RESUMEN.....	iv
ÍNDICE GENERAL.....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xv
ÍNDICE DE TABLAS.....	xviii
ABREVIATURA.....	xx
SIMBOLOGÍA.....	xxi
PRÓLOGO.....	1
INTRODUCCIÓN.....	3
CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN Y GENERALIDADES DEL PROYECTO	
1.1. Nombre de proyecto.....	4
1.2. Ubicación.....	4
1.3. Justificación y propósito.....	5
1.4. Nivel de estudio.....	7
1.5. Objetivos.....	8
1.5.1. Objetivos generales.....	8
1.5.2. Objetivos específicos.....	8
1.6. Alcances y limitaciones.....	9
1.7. Antecedentes.....	10
1.8. Clasificación.....	11

1.9. Normalización del producto.....	11
1.10. Naturaleza y extensión.....	13

CAPITULO 2: ESTUDIO DE MERCADO.

2.1. Generalidades.....	15
2.1.1. Tipo de mercado.....	16
2.1.2. Área geográfica del mercado.....	16
2.2. Materia prima y materiales indirectos.....	19
2.2.1. Definición.....	19
2.2.2. Descripción y lugar de uso.....	19
2.3. Producto.....	21
2.3.1. Definición.....	21
2.3.2. Propiedades.....	21
2.3.3. Usos y aplicaciones.....	23
2.4. Análisis de la demanda.....	24
2.5. Comercialización.....	27
2.6. Precio.....	28

CAPITULO 3: DESTILACIÓN CRIOGÉNICA DE GASES DEL AIRE.

3.1. Líquidos criogénicos.....	30
3.1.1. Introducción.....	30
3.1.2. Envases.....	31
3.1.3. Baja temperatura.....	32
3.1.4. Evolución del gas.....	33
3.1.5. Manipuleo.....	34
3.1.6. Almacenamiento.....	34
3.1.7. Normas de seguridad para el argón.....	34
3.2. Descripción del proceso de separación de gases del aire.....	36

3.2.1. Rectificación.....	37
3.3. Proceso de fabricación de gases del aire.....	40
3.3.1. Descripción del proceso productivo en Planta ASU Messer.....	40
3.3.2. Descripción del sistema para la producción de argón crudo 95%.....	47

**CAPITULO 4: ESTADO DEL ARTE DE LA ELECTRÓLISIS ALCALINA
DEL AGUA Y SU CONTRIBUCIÓN EN ESTA TESIS.**

4.1. Introducción.....	57
4.2. Conceptos básicos en la electrólisis del agua.....	58
4.2.1. Introducción.....	58
4.2.2. Principios básicos de las reacciones químicas.....	58
4.2.2.1. Termodinámica de la electrólisis del agua.....	59
4.2.2.2. Sobrevoltajes.....	63
4.2.3. Principios de operación de un electrolizador alcalino.....	65
4.2.3.1. General.....	65
4.2.3.2. Análisis energético de un electrolizador.....	67
4.3. Tecnologías de producción de hidrógeno.....	75
4.3.1. Tecnologías convencionales de producción de hidrógeno.....	75
4.3.1.1. Reformado con vapor de gas natural.....	75
4.3.1.2. Oxidación parcial de hidrocarburos.....	77
4.3.1.3. Gasificación del carbón.....	78
4.3.2. Producción biotecnológica de hidrógeno.....	80

4.3.2.1. Gasificación de biomasa.....	80
4.3.2.2. Fermentación anaeróbica de biomasa.....	81
4.3.2.3. Fotoproducción de hidrógeno.....	81
4.3.3. Electrólisis.....	82
4.3.3.1. Electrólisis alcalina.....	82
4.3.3.2. Electrólisis ácida.....	85
4.3.3.3. Electrólisis en dispositivo de electrolito de membrana polimérica (PEM).....	88
4.3.3.4. Electrólisis a alta temperatura (óxido sólido).....	89
4.4. Electrodo utilizados en la electrólisis del agua.....	90
4.5. Electrolizadores comerciales.....	92

CAPITULO 5: EQUIPOS Y METODOLOGÍA A SEGUIR PARA EL DISEÑO DEL PROYECTO.

5.1. Determinación y descripción de los equipos y componentes principales para la producción de argón crudo.....	97
5.1.1. Intercambiador de calor de argón crudo.....	97
5.1.2. Compresor de argón.....	97
5.1.3. Separador.....	97
5.1.4. Reactor DEOXO.....	98
5.1.5. Intercambiador de calor refrigerado por aire.....	98
5.1.6. Intercambiador de calor refrigerado por agua.....	98
5.1.7. Secador de argón.....	98

5.1.8. Intercambiador externo de argón.....	99
5.1.9. Reboiler de argón puro.....	99
5.1.10. Columna de argón puro.....	99
5.1.11. Caja fría.....	100
5.2. Elaboración de fichas técnicas de los equipos y componentes principales.....	100
5.3. Pruebas realizadas para la obtención de argón crudo.....	102
5.4. Obtención de hidrógeno estándar para pruebas de purificación de argón crudo.....	105
5.5. Cálculos de requerimiento de hidrógeno.....	105
5.6. Procedimiento para la purificación de argón crudo en planta ASU.....	106
5.7. Resultados y evaluación de pruebas realizadas con hidrógeno estándar.....	113

CAPITULO 6: SELECCIÓN, MONTAJE E INSTALACIÓN DE PLANTA PRODUCTORA DE HIDRÓGENO UHP.

6.1. Tipo de Planta.....	116
6.2. Ubicación.....	116
6.3. Seguridad de la Planta.....	117
6.4. Tamaño de la Planta.....	117
6.5. Especificaciones de la Planta.....	118
6.6. Capacidad de la Planta.....	118
6.7. Reconocimiento y listado de equipos y accesorios de planta de hidrógeno.....	118

6.8. Procedimiento general de montaje de la planta de hidrógeno.....	122
6.9. Trabajos a realizar en la obra.....	123
6.9.1. Alcances de los trabajos de la primera etapa.....	123
6.9.2. Alcances de los trabajos de la segunda etapa.....	125
6.10. Desarrollo y características de los equipos de la planta de hidrógeno.....	128
6.10.1. Generación de hidrógeno.....	128
6.10.1.1. Electrolizador.....	131
6.10.1.2. Sistema purificador.....	134
6.10.1.3. Sistema de control.....	138
6.10.1.4. Convertidor AC/DC.....	142
6.10.2. Instalaciones auxiliares.....	146
6.10.2.1. Tratamiento de agua de alimentación.....	146
6.10.2.2. Instalación contra incendios.....	152
6.10.2.3. Sistema de nitrógeno para inertización.....	153
6.10.2.4. Sistema de aire de instrumentación.....	154
6.10.3. Sistema de control y adquisición de datos.....	155
6.10.3.1. Adquisición de datos.....	156
6.10.3.2. Control de procesos.....	158
6.11. Equipos de almacenamiento.....	169

CAPITULO 7: PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DE PLANTA PRODUCTORA DE HIDRÓGENO UHP.

7.1. Plan de ensayos previos al arranque de planta.....	171
7.1.1. Potencia eléctrica.....	171
7.1.2. Pantalla táctil del generador.....	173
7.1.3. Verificación del funcionamiento del gas inerte.....	175
7.1.4. Entrada de agua de alimentación.....	175
7.1.5. Estados de válvulas manuales durante operación.....	176
7.1.6. Llenado y recirculación de agua.....	177
7.1.7. Prueba de presión en el sistema.....	177
7.1.8. Despresurización del sistema.....	178
7.1.9. Llenado y recirculación del electrolito.....	178
7.2. Arranque de planta de hidrógeno.....	180
7.2.1. Revisiones y acciones al pre-arranque.....	180
7.2.2. Procedimiento de arranque del generador.....	181
7.2.3. Precalentamiento del sistema y aprovechamiento de los valores prefijados.....	184
7.2.3.1. Presión y corriente DC.....	184
7.2.3.2. Control de temperatura de KOH.....	185
7.2.4. Ajustes en operación.....	186
7.2.4.1. Control de flujo de gas hacia la sonda.....	186
7.2.4.2. flujo de agua hacia el condensador.....	186

7.2.5. Ciclo normal de funcionamiento.....	187
7.2.5.1. Purga de trampas de los filtros.....	187
7.2.5.2. Ciclo de regeneración de secadores.....	187
7.2.5.3. Adición de agua de alimentación.....	189
7.2.6. Parada del proceso de electrólisis.....	194
7.2.6.1. Parada normal.....	194
7.2.6.2. Condición de alarma.....	195
7.2.6.3. Pérdida de potencia.....	195
7.3. Monitoreo del generador y recopilación de datos.....	196
7.4. Mantenimiento en planta de hidrógeno.....	198
7.4.1. Frecuencias de mantenimiento.....	198
7.5. Precauciones y advertencias de seguridad.....	201
 CAPITULO 8: COSTO DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO UHP.	
8.1. Introducción.....	205
8.2. Equipos.....	205
8.3. Inversión.....	207
8.4. Producción de hidrógeno.....	209
8.5. Costos de operación y mantenimiento.....	210
 CAPITULO 9: ANÁLISIS ECONÓMICO PLANTA DE PRODUCCIÓN DE ARGÓN UHP.	
9.1. Inversiones.....	213

9.1.1. Generalidades.....	213
9.1.2. Inversión en activos fijos.....	213
9.1.3. Inversión en capital de trabajo.....	215
9.2. Financiamiento.....	217
9.2.1. Generalidades.....	217
9.2.2. Fuentes de financiamiento.....	217
9.3. Evaluación económica.....	218
9.3.1. Generalidades.....	218
9.3.2. Criterios de evaluación.....	218
9.3.2.1. Valor actual neto VAN/VPN.....	218
9.3.2.2. Tasa interna de retorno TIR.....	220
9.3.2.3. Valor presente neto acumulado VPNA.....	221
9.3.2.4. Punto de equilibrio.....	222
9.3.2.5. Relación Beneficio/Costo (B/C).....	223
CAPITULO 10: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	
10.1. Conclusiones.....	225
10.2. Recomendaciones.....	226
BIBLIOGRAFÍA.....	227
ANEXOS.....	229

ÍNDICE DE FIGURAS

		Página
Figura 1.	Participación de ventas de gases industriales en el Perú 2012.....	17
Figura 2.	Participación de ventas de argón en el Perú 2012.....	18
Figura 3.	Historial de ventas de argón en Messer Gases.....	18
Figura 4.	Tanque de almacenamiento de argón líquido.....	32
Figura 5.	Funcionamiento de separación del aire.....	39
Figura 6.	Operación en plato de destilación.....	39
Figura 7.	Balance de materia en Planta ASU.....	46
Figura 8.	Perfil típico de purezas en columnas de destilación.....	48
Figura 9.	Condensador de la columna de argón crudo.....	50
Figura 10.	Perfil de temperatura en el condensador de argón crudo.....	50
Figura 11.	Balance de materia en planta purificadora de argón crudo.....	52
Figura 12.	Termodinámica de la electrólisis del agua.....	62
Figura 13.	Influencia de la presión sobre parámetros termodinámicos de la electrólisis del agua.....	62
Figura 14.	Esquema de funcionamiento de una celda electrolítica alcalina...	66
Figura 15.	Dependencia del voltaje reversible y termoneutro con la temperatura.....	69
Figura 16.	Curvas Intensidad-Voltaje de un electrolizador alcalino.....	71
Figura 17.	Influencia de la temperatura en la eficiencia de Faraday.....	73
Figura 18.	Esquema del proceso de reformado con vapor de agua.....	77

Figura 19.	Diagrama de flujo de una planta de oxidación parcial de hidrocarburos.....	78
Figura 20.	Diagrama de flujo de una planta de gasificación de carbón.....	80
Figura 21.	Esquema de funcionamiento de un electrolizador alcalino.....	83
Figura 22.	Pantalla de estabilidad de columna para lograr producir argón crudo al 95 %.....	103
Figura 23.	Pantallas de analizador AE-0520 que mide pureza de argón crudo.....	103
Figura 24.	Pantalla de estabilidad de columna de argón crudo.....	111
Figura 25.	Pantalla de estabilidad de columna de argón puro.....	112
Figura 26.	Pantalla de desoxigenación de argón crudo en reactor deoxo....	112
Figura 27.	Diagrama P&ID del proceso.....	121
Figura 28.	Esquema de principio de la planta de producción de H ₂	128
Figura 29.	Generador EC-750 en Messer Gases.....	129
Figura 30.	Esquema simplificado de la producción de H ₂	129
Figura 31.	Disposición del stack.....	133
Figura 32.	PLC de generador EC-750.....	139
Figura 33.	Tarjetas de entrada y salida de generador EC-750.....	139
Figura 34.	Gabinete de suministro de potencia de generador EC-750.....	146
Figura 35.	Planta de agua desionizada.....	151
Figura 36.	Sistema de suministro de gas inerte.....	154
Figura 37.	Suministro de aire de instrumentación.....	155

Figura 38.	Control de flujo de agua de enfriamiento.....	161
Figura 39.	Control de nivel del líquido.....	162
Figura 40.	Control del sistema de presión.....	164
Figura 41.	Control delta de presión – venteo de oxígeno.....	166
Figura 42.	Sistema de detección de gases de O ₂ en H ₂ e H ₂ en O ₂	169
Figura 43.	UPS Suministro de potencia ininterrumpible.....	173
Figura 44.	Pantalla de generador de gas – READY.....	174
Figura 45.	Pantalla de generador de gas – GENERATING.....	174
Figura 46.	Pantalla del sistema de enfriamiento – COOLING SYSTEMS.....	186
Figura 47.	Pantalla del sistema de secado – DRYERS.....	189
Figura 48.	Pantalla del agua de alimentación – FEED WATER.....	191
Figura 49.	Pantalla de control de gases – GAS CONTROL.....	191
Figura 50.	Pantalla de fuente de poder – POWER SUPPLY.....	192
Figura 51.	Pantalla de información del sistema – SYSTEM INFORMATION.....	192
Figura 52.	Pantalla DATA LOGGING.....	193
Figura 53.	Pantalla de gráfica de tendencias - trend.....	193
Figura 54.	Pantalla de alarmas.....	196
Figura 55.	Composición porcentual de la inversión en equipos.....	207
Figura 56.	Tasa interna de retorno TIR.....	221
Figura 57.	Valor presente neto acumulado y periodo de recupero.....	222

ÍNDICE DE TABLAS

		Página
Tabla 1.	Materiales indirectos para la producción de argón UHP.....	20
Tabla 2.	Propiedades físicas del argón.....	22
Tabla 3.	Cálculos de mínimos cuadrados para proyección de ventas de argón en Messer Gases.....	26
Tabla 4.	Costos de argón importado.....	29
Tabla 5.	Componentes principales del aire.....	36
Tabla 6.	Concentraciones normales del aire.....	36
Tabla 7.	Impurezas del aire.....	37
Tabla 8.	Comportamiento de purezas de argón.....	56
Tabla 9.	Reacciones electroquímicas de la electrólisis del agua.....	66
Tabla 10.	Ficha técnica de equipos para purificación de argón crudo.....	101
Tabla 11.	Pruebas realizadas para la estabilidad del argón crudo.....	104
Tabla 12.	Requerimientos de hidrógeno para purificación de argón crudo.....	106
Tabla 13.	Pruebas realizadas para purificación de argón crudo.....	114
Tabla 14.	Pruebas realizadas para la producción de argón UHP.....	115
Tabla 15.	Lista de equipos y accesorios de Generador EC-750.....	120
Tabla 16.	Principales características de Planta de Hidrógeno.....	130
Tabla 17.	Características del stack EC-750.....	132
Tabla 18.	Puntos de consigna del sistema de control.....	143

Tabla 19.	Análisis de agua de alimentación a sistema ósmosis.....	147
Tabla 20.	Análisis de agua producto del sistema de ósmosis.....	150
Tabla 21.	Alarmas que generan parada de Planta de Hidrógeno.....	168
Tabla 22.	Estado de válvulas manuales.....	176
Tabla 23.	Formato de control de datos de Planta de Hidrógeno.....	197
Tabla 24.	Plana anual de mantenimiento Planta de Hidrógeno.....	200
Tabla 25.	Especificaciones técnicas de equipos y unidades de Planta de H ₂	206
Tabla 26.	Costo de adquisición de equipos Planta de Hidrógeno.....	208
Tabla 27.	Ratios de consumo y productividad de Hidrógeno.....	209
Tabla 28.	Costos de operación y mantenimiento de Planta de Hidrógeno..	211
Tabla 29.	Costos de producción de Hidrógeno UHP.....	212
Tabla 30.	Costos de equipos para producción, almacenamiento y distribución de argón UHP.....	214
Tabla 31.	Flujo de caja proyectada – Evaluación económica.....	219
Tabla 32.	Cálculo del Valor Actual Neto VAN.....	220
Tabla 33.	Cálculo del punto de equilibrio.....	223

ABREVIATURAS

APU	Unidad Purificadora de Argón.
ASU	Unidad Separadora de Gases del Aire.
CIU	Clasificación Internacional Industrial Uniforme
DCAC	Enfriamiento posterior por contactor directo.
GAN	Nitrógeno Gas.
GAR	Argón Gas.
GFAAS	Horno de grafito de espectrometría de absorción atómica.
GOX	Oxígeno Gas.
ICP	Plasma de acoplamiento inductivo.
INDECOPI	Instituto nacional de defensa y de la protección de la propiedad intelectual.
ISO	Organización de Estándares Internacionales.
LAR	Argón Líquido.
LIN	Nitrógeno Líquido.
LOX	Oxígeno Líquido.
LP	Low pressure (Baja presión).
STD	Estándar (pureza 99,5%)
TAG	Código único de registro de equipos.
UHP	Alta pureza mayor a 99.999%.
VOD	Descarbonización por oxígeno en vacío.

SIMBOLOGÍA

a_i	Parámetros experimentales.
A	Área del electrodo.
Abs	Absolutas.
AC	Corriente alterna.
Ar	Argón.
Atm	Atmósfera.
°C	Grado centígrado.
CaO	Óxido de calcio.
C_p	Calor específico.
Cr	Cromo.
CO	Monóxido de carbono.
CO ₂	Dióxido de carbono.
DC	Corriente continua.
F	Constante de Faraday.
GAL	Galones
GPM	Galones por minuto.
H ₂	Hidrógeno.
h	Hora.
HCl	Ácido clorhídrico.
H ^o _f	Entalpía de formación.

HP	Caballos de fuerza.
ΔH	Variación de entalpía.
I	Intensidad de corriente.
K	Grado kelvin.
k	Constante de equilibrio.
KV	Kilovoltio.
KW	KiloWatt.
m	Metro.
m_{H_2}	Flujo másico de hidrógeno.
m^3	Metro cúbico.
m^3/h	Metro cúbico por hora.
MgO	Óxido de magnesio.
Mscfh	Pies cúbicos estándar por hora.
MPa	Mega pascal.
NiO	Óxido de níquel.
n	Número de moles.
η	Número de electrodos intercambiados.
n_F	Eficiencia de Faraday.
n_c	Número de celdas.
Nm^3	Metro cúbico normal.
N_2	Nitrógeno.

Ni	Níquel.
O ₂	Oxígeno.
P	Presión.
Psig	Libras por pulgada cuadrada.
r	Resistencia óhmica del electrolizador.
R	Constante universal de los gases.
S _f ⁰	Entropía de formación.
s,t	Coefficientes experimentales representativos del sobrevoltajes de los electrodos.
ΔS	Variación de entropía.
T	Temperatura.
Th	Múltiplo por 1000.
V	Voltaje.
V _{rev}	Voltaje reversible.
V _{tn}	Voltaje termoneutro.

PRÓLOGO

La preparación y evaluación de proyectos es una tarea de gran importancia, pues de ella depende la realización de obras, generalmente de envergadura, que tienen en muchos casos una considerable gravitación en la economía del país y de las regiones o de las empresas que la encaran.

Por otro lado, no es solo la economía del proyecto la que interesa, a menudo los grandes proyectos involucran transformaciones en la sociedad donde están inmersos. En el presente proyecto, se han tratado de contemplar en su mayoría, aspectos que conciernen e involucran a uno del tipo de factibilidad en el sector industrial de nuestro medio.

Es por esto, que a la presentación del mismo expreso mi satisfacción, ya que significa un primer trabajo, y de envergadura, realizado en el centro de trabajo donde laboro por espacio de cuatro años, en el cual se puso dedicación, interés personal e institucional para su realización.

Dicho estudio consta básicamente de 9 capítulos, en los cuales se desarrollan y detallan aspectos fundamentales para la instalación de una Planta de Hidrógeno UHP para la purificación del argón crudo al 95%.

En el capítulo 1 se hace mención a la introducción y generalidades del proyecto, dándose a conocer el objetivo principal y los objetivos específicos que se lograrán al final del proyecto.

En el capítulo 2 se realiza el estudio de mercado del argón en diversas presentaciones, especialmente en el mercado nacional.

En el capítulo 3 se describe brevemente el proceso de destilación criogénica que se lleva a cabo en un Planta de destilación de gases del aire para obtener argón crudo al 95%, ya que ésta será la materia prima para producir argón UHP.

En el capítulo 4 se realiza un estudio a los métodos de obtención de hidrógeno y las características de la electrólisis alcalina.

En el capítulo 5 se realiza la metodología a seguir para el desarrollo del proyecto, aquí se realizan las pruebas que servirán como soporte para la adquisición de una Planta de hidrógeno UHP.

En el capítulo 6 y 7 se lleva a cabo la instalación, montaje y funcionamiento de una planta de producción de hidrógeno UHP.

En el capítulo 8 se realiza los costos de producción de hidrógeno UHP y en el capítulo 9 se realiza el análisis económico para la producción de argón UHP.

INTRODUCCIÓN

El proyecto que a continuación se presenta, se enfoca en el estudio, montaje y puesta en marcha de una planta productora de gas hidrógeno UHP con la finalidad de poder utilizarlo como agente oxidante y eliminar la mayor cantidad de oxígeno presente en el argón crudo que se produce en una Planta de destilación criogénica de gases del aire.

El objetivo final del proyecto es producir argón líquido de alta pureza (LAR UHP) por ser considerado un producto de mayor costo en el mercado comparado con el resto de los productos que se obtiene en la columna de destilación de gases del aire.

Con los equipos que cuenta Messer Gases, solo se logra obtener argón crudo a una pureza del 95% siendo este producto de bajo costo y de poca utilidad en el mercado, es así como nace la necesidad de eliminar las impurezas de oxígeno, ya que las impurezas de nitrógeno se eliminarán en una columna de purificación.

El presente trabajo consta de los estudios previos realizados para adquisición de una planta de hidrógeno, montaje del generador, montaje eléctrico, instalación de compresor de alta presión, pruebas realizadas y capacitaciones en arranque y parada de planta. Así mismo se realiza un estudio sobre los riesgos que existen en dicha planta.

Además se proporcionará una herramienta de apoyo para el área de mantenimiento de la planta de hidrógeno con la finalidad de poder realizar un plan anual de trabajo como parte del mantenimiento predictivo.

Luego de realizar las pruebas en la planta de hidrógeno, se realizan las pruebas de inyección de hidrógeno UHP al argón crudo 95% con la finalidad de eliminar la mayor cantidad de impurezas con respecto al oxígeno.

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN Y GENERALIDADES DEL PROYECTO

1.1. NOMBRE DEL PROYECTO.

“Propuesta técnica de estudio, instalación, montaje y puesta en funcionamiento de una planta de hidrógeno UHP para la purificación de argón crudo 95% producido en una planta de destilación criogénica de gases del aire”.

1.2. UBICACIÓN.

Messer Gases se encuentra ubicado en:

Distrito : Chimbote.

Provincia : Santa.

Departamento : Ancash.

Altitud : 11 msnm.

Temperatura promedio : 20 °C

La planta de destilación criogénica de gases del aire ASU (Unidad Separadora de Aire) se encuentra en los interiores de la empresa Siderúrgica SIDER PERÚ – GERDAU a 330 km al norte de Lima.

En la actualidad, Messer Gases es una planta que produce gases industriales (oxígeno, nitrógeno) necesarios para la producción del acero en Sider Perú. El oxígeno es insumo fundamental para las acerías, ya que ayuda a la combustión del carbono y a la desfosforación y, en los proceso de reducción directa genera reacciones exotérmicas que mejoran la productividad. El nitrógeno es utilizado para crear atmosferas inertes

siendo sus principales consumidores las plantas de reducción directa, los recocidos y las acerías. El argón que se compra para suministrar a Sider Perú es usado en las acerías para agitar y homogeneizar térmica y químicamente el baño del acero líquido. También ayuda a la flotación de inclusiones y a la desulfuración.

Aparte de los gases industriales (oxígeno y nitrógeno), dado que el punto de ebullición del argón está entre el del nitrógeno y el del oxígeno, se puede obtener una mezcla rica en argón de la reacción de las capas correspondientes a la columna de destilación de baja presión, a este flujo llamaremos argón crudo que con una pureza del 95% es un producto no útil ni rentable en el mercado nacional y una de las formas de poder purificar dicho argón crudo es mediante el uso de hidrógeno gaseoso de alta pureza UHP.

Es por ello que nace la carencia del hidrógeno para el proceso de purificación de argón crudo al 95% producido en la planta de destilación criogénica de gases del aire.

1.3. JUSTIFICACIÓN Y PROPÓSITO.

1.3.1. JUSTIFICACIÓN.

El producto es el argón UHP, el mismo que deberá ser purificado haciendo uso de hidrógeno UHP para un fin comercial.

Dicho proyecto es justificable por las siguientes razones:

- a. La necesidad de desarrollar un sistema que permita la purificación del argón crudo al 95% de pureza proveniente de la destilación criogénica de los gases del aire, hasta llegar a niveles de alta pureza UHP (99,999% de pureza) para ser utilizado en la industria, siendo este el gas más costoso que se pueda separar del aire.

- b. Con el sistema que cuenta la empresa, se logra obtener argón a una pureza de 95% (~5% O₂ como impurezas) y una de las formas de eliminar el porcentaje de oxígeno es inyectando gas hidrogeno UHP en un reactor de oxidación catalítica de tal manera que esta reacción de cómo consecuencia vapor de agua, siendo este una impureza más fácil de eliminar.
- c. Actualmente se cuenta en el Perú con una planta de producción de hidrógeno estándar (99,9% de pureza) por el método de electrólisis del agua y una planta de producción de hidrógeno UHP (99,999% de pureza) por el método de reformado de hidrocarburos. Estas empresas solo producen hidrógeno de baja pureza o como sub producto de uno de sus procesos.
- d. El incremento del uso del hidrógeno en las industrias tales como: refinerías, alimentarias, farmacéuticas, químicas, electrónica, etc., y el potencial uso en el parque automotor.
- e. Disminución del gasto en divisas por los siguientes factores:
 - ✓ Compra de argón UHP a competidores locales o importación para el suministro a empresa siderúrgica y ventas a clientes.
 - ✓ Compra de hidrógeno UHP para la purificación del argón crudo 95%.
- f. Mejora de la competitividad de argón UHP en el mercado por razones de precio.
- g. Por la experiencia en la producción y aplicación de dicho producto purificándolo con hidrógeno estándar.

- h. La disponibilidad de contar con un mercado existente, consolidado y conocido.
- i. Ser una alternativa de inversión acorde y a la medida de nuestras actividades industriales y comerciales.
- j. La necesidad de contar con una planta productora de gas hidrógeno UHP para distribuirla y comercializarla como producto terminado debido a una amplia gama de aplicaciones.

1.3.2. PROPÓSITOS.

- a. Estudio de los aspectos generales, los mismos que son necesarios en el desarrollo del proyecto.
- b. Estudio de los aspectos técnicos, los que determinarán parámetros necesarios de operación para el buen desempeño de la planta de hidrógeno y de la planta de producción de argón UHP.
- c. Evaluar el aspecto económico-financiero cuantitativamente, el mismo que se tendrá en consideración para la aceptación, rechazo o postergación del proyecto.

1.4. NIVELES DE ESTUDIO.

El presente estudio como todo de propuesta técnica, es uno de pre inversión el mismo que tiene por finalidad decidir entre la ejecución, rechazo o postergación de la alternativa de invertir.

Dicho estudio presenta dos tipos de variables, las cuales deberán ser necesariamente analizadas; una del tipo de definición y la otra de optimización. Las primeras como su nombre lo indica, definen el proyecto y están relacionadas al tamaño, localización y la tecnología; las segundas contribuyen al mejoramiento del uso de los recursos tanto para la

producción de hidrógeno UHP como para la purificación del Argón crudo.

Por último; dicho estudio será sometido a una evaluación del tipo económico, haciendo uso de los elementos agregados de juicio basados en parámetros de rentabilidad, los que conducirán a la factibilidad de dicha inversión.

1.5. OBJETIVOS.

1.5.1. OBJETIVO GENERAL.

Presentar una propuesta técnica respecto al estudio, instalación, montaje y puesta en funcionamiento de una planta de hidrógeno UHP para la purificación de argón crudo que produce Messer Gases en la planta de destilación criogénica de gases del aire, tomando en consideración la existencia de los equipos para la producción de argón crudo.

1.5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- a. Realizar un estudio sobre las aplicaciones del argón en el mercado nacional e internacional.
- b. Evaluar la conveniencia de la producción de argón UHP frente a la importación de dicho producto.
- c. Evaluar las formas de producción de hidrógeno UHP para poder purificar el argón crudo que produce Messer Gases.
- d. Evaluar la conveniencia del montaje y puesta en servicio de una planta de hidrógeno para la purificación de argón crudo, respecto a la compra de hidrógeno del mercado nacional o internacional.

- e. Seleccionar una actividad tecnológica de mantenimiento predictivo a realizar a una planta de hidrógeno, en consideración a la identificación de sus posibles fallas.

1.6. ALCANCES Y LIMITACIONES.

1.6.1. ALCANCES.

El presente estudio pretende los siguientes:

- a. Determinación de la cantidad nominal de argón UHP que puede purificarse haciendo uso de hidrógeno UHP, la misma que puede satisfacer la demanda proyectada.
- b. Conocimiento e información de aspectos referidos al uso, propiedades y comercialización del producto argón UHP.
- c. Estimación del tamaño y localización de una planta productora de hidrógeno UHP para la purificación del argón crudo.
- d. Selección del método y planta productora de hidrógeno UHP.
- e. Instalación, montaje y puesta en funcionamiento de una planta productora de hidrogeno UHP.
- f. Cuantificación del monto de inversión para una planta de hidrógeno UHP y una planta purificadora de argón crudo.
- g. Evaluación económica.

1.6.2. LIMITACIONES.

Así mismo se cuenta con ciertas limitaciones las mismas que son:

- a. Debido a que Messer Gases se encuentra dentro de las instalaciones de una empresa Siderúrgica, en la actualidad se cuenta con poco espacio libre como para montar una planta

productora de gas hidrógeno UHP debido a la alta peligrosidad que resultan las plantas de este tipo.

- b. La poca experiencia del personal que labora en la empresa en temas relacionadas a los modos de producción de gas hidrógeno UHP.
- c. La antigüedad de los equipos APU que anteriormente fueron montados para la purificación de argón crudo.

1.7. ANTECEDENTES.

La empresa Messer Gases es una de las productoras de gases industriales en el Perú, que cuenta con una planta de separación de gases del aire; con una producción de oxígeno y nitrógeno, dicha planta estaba diseñada y acondicionada para interconectarse con una "Planta de Argón" de una capacidad máxima de producción de 140 m³/h, para lo cual durante su construcción de dicha planta se han dejado instalados la mayoría de los equipos para la producción de argón UHP.

Hasta el año 1989 no había producción nacional de argón, todo el gas argón y sus mezclas que se necesitaban para abastecer el mercado nacional, eran importadas por todas las empresas productoras de gases industriales.

El argón UHP producido en las otras plantas de destilación criogénica en el Perú (Praxair, Aga, etc.) son producidas directamente por destilación haciendo uso de columnas más altas y con mayor cantidad de platos de destilación.

En la actualidad Messer Gases logra obtener por destilación argón crudo al 95% de pureza y la purificación se puede lograr inyectando hidrógeno UHP a un reactor de oxidación (con catalizador de paladio) para convertir el oxígeno remanente en vapor de agua, es así como se logra obtener argón UHP.

Anteriormente Messer Gases compraba hidrógeno estándar con una pureza de 99,9 % a la empresa Olvicsa (que actualmente está fuera de operación), con lo cual se lograba obtener argón UHP, estos resultados fueron utilizados como pruebas para el funcionamiento de los equipos de la Planta de Argón.

Por motivos legales, la empresa Olvicsa dejó de funcionar y Messer Gases dejó de producir argón UHP, naciendo así la necesidad de evaluar la posibilidad del estudio y montaje de una planta productora de hidrógeno gaseoso.

Respaldados con la experiencia referida a la producción de gases por destilación criogénica del aire, animaron al departamento de ingeniería a preparar los estudios correspondientes para la evaluación e instalación de una planta generadora de hidrógeno gaseoso UHP, recayendo en mi persona el compromiso para la presentación de estos trabajos relacionados a la formulación, evaluación y presentación del proyecto.

1.8. CLASIFICACIÓN.

De acuerdo a la Clasificación Industrial Internacional Uniforme de todas las actividades económicas en las Naciones Unidas, revisión 4, sección C, industrias manufactureras, dicho proyecto es clasificado con la CIU 2011, referida a la fabricación de sustancias químicas básicas que incluye lo siguiente “Fabricación de gases industriales o médicos inorgánicos, licuados o comprimidos: gases elementales; aire líquido o comprimido; gases refrigerantes; mezclas de gases industriales; gases inertes, como dióxido de carbono; y gases aislantes”.

1.9. NORMALIZACIÓN DEL PRODUCTO.

El producto es el argón UHP, el mismo que para ser producido y comercializado nacionalmente se debe cumplir con las disposiciones establecidas por el INDECOPI (Instituto Nacional de Defensa y de la

Protección de la Propiedad Intelectual), relacionadas a productos químicos industriales (Argón líquido UHP), las que establecen requisitos, métodos de muestreo y ensayos para el uso industrial.

Además, internamente se establece una norma técnica propia industrial de calidad, la que considera ciertos aspectos como:

1. Producto : Argón líquido.

2. Generalidades:

a. Nombre genérico o técnico : Argón líquido.

b. Definición: Gas noble producido por destilación criogénica de gases del aire, elemento que a temperatura y presión atmosférica es un gas incoloro, inodoro e insípido. Constituye cerca del 1% en la composición del aire atmosférico. Es aproximadamente 30% más pesado que el aire. No es tóxico y es químicamente inerte, no es inflamable y no presenta peligro de combustión; sin embargo es asfixiante por desplazar la cantidad de aire que soporta la vida. Como líquido es incoloro y 1,39 veces más pesado que el agua.

c. Usos: En fase gaseosa tienen los siguientes usos.

- ✓ En la fabricación de lámparas incandescentes y fluorescentes.
- ✓ Como atmósfera protectora inerte en soldaduras de arco para prevenir la oxidación de los metales.
- ✓ En soldaduras de aluminio y titanio en procesos MIG, TIG y corte de plasma.

- ✓ Como suavizador y pasivador del acero en hornos siderúrgicos, para reducir las pérdidas de cromo y cumplir con el contenido de carbono establecido.
- ✓ En análisis químico instrumental, con la generación del plasma.

d. Grado de Calidad : Pureza mínima 99,999%

3. Contenido:

- a. Ensayo : Pureza.
- b. Método : Analizadores Teledyne.
- c. Requisito : 99,999 %.
- d. Frecuencia : cada 12 horas.
- e. Humedad : 1,5 ppm.
- f. Oxígeno : 2,0 ppm.
- g. Nitrógeno : 3,0 ppm.
- h. Muestreo : Salida de columna LAR.
- i. Laboratorio : Propio.

4. Envasado:

- a. Sistema : Continuo.
- b. Envases : Tanques criogénicos.

1.10. NATURALEZA Y EXTENSIÓN.

1.10.1. NATURALEZA.

El argón (Ar), con peso molecular 39,994 g/mol, es un gas incoloro, inodoro e insípido.

Su descubridor como gas inerte, se atribuye a Rayleigh (1894), quien demostró la presencia de un segundo gas más pesado que el nitrógeno en los trabajos realizados por Henry Cavendish donde expuso una muestra de nitrógeno a descargas eléctricas repetidas en presencia de oxígeno para formar óxido de nitrógeno que posteriormente eliminaba, encontrando que alrededor del 1,0 % del gas original no se podía disolver (1785).

Hoy en día este gas se obtiene por medio de la destilación fraccionada del aire licuado, en el que se encuentra en una proporción aproximadamente de 0,94 %, y posterior eliminación del oxígeno residual con hidrógeno. La atmósfera marciana contiene un 1,6 % de Ar⁴⁰ y 5 ppm de Ar³⁶; la de mercurio un 7,0 % y la de venus, trazas.

Se produce en estado líquido y las aplicaciones generales se dan en fase gaseosa y sus usos son principalmente para la generación de atmosferas inertes, fabricación de lámparas incandescentes y fluorescentes, en soldaduras de aluminio y titanio, como suavizador del acero en hornos eléctricos en Plantas Siderúrgicas y en los análisis químicos instrumentales.

1.10.2. EXTENSIÓN.

La producción actual de argón es comercializada a nivel nacional y debido a la escasez muchas empresas dedicadas al rubro de gases industriales importan de los países de Sudamérica y Centroamérica. En la actualidad se vienen realizando estudios con el objetivo de incrementar las producciones en las plantas de destilación criogénica tratando de eliminar las pérdidas y las paradas intempestivas de estas Plantas.

CAPITULO 2

ESTUDIO DE MERCADO

2.1. GENERALIDADES.

El objetivo último de una empresa consiste en producir a menor costo bienes y servicios que sean adecuados a las necesidades del consumidor. Este objetivo no ha sido siempre evidente; hace algunos decenios, la producción se ajustaba poco a los deseos de los consumidores, justificándose en cierto modo por sí misma, para desembocar de manera natural en un mercado cuyo volumen de necesidades era tal, que la misma podía ser absorbida completamente, si no de manera siempre satisfactoria pero si para dar cumplimiento a las necesidades más inmediatas.

Una vez que el mercado se ha transformado, el proceso ha quedado invertido, y el cliente se encuentra en la primera línea del mismo, en lugar de determinar la producción e investigar las salidas posibles para la misma, ahora se procede primero a un análisis de la clientela potencial, y al examen de sus necesidades, con el fin de orientar el desarrollo de los productos o servicios de acuerdo con las características del mercado y las actitudes del consumidor.

El motivo profundo de este cambio necesario en las técnicas comerciales, debe atribuirse a las modificaciones estructurales que se han producido en la economía de los países.

Cabe resaltar en este proyecto que el objetivo principal es producir argón UHP a través de la purificación del argón crudo 95 % producido en la planta de destilación criogénica de gases del aire, haciendo uso de una planta de producción de hidrógeno UHP, la que deberá producir en cierta cantidad, de forma que pueda satisfacer la demanda del mercado sin tener

que recurrir a las importaciones de argón UHP ya que resultan demasiado costosos.

Es por ello que en este capítulo, se desarrollará aspectos referidos al estudio de mercado.

2.1.1. TIPO DE MERCADO.

En la actualidad, el mercado nacional está siendo atendido con este producto por dos empresas dedicadas al rubro de gases industriales, siendo uno de ellos Praxair, la cual es una empresa transnacional con plantas de destilación ubicadas en la ciudad de Pisco, Lima, La Oroya; siendo la Planta de Pisco la única que puede producir argón UHP por destilación criogénica, esta empresa es la que atiende principalmente a los clientes del Sur del Perú.

La otra empresa AGA también es una empresa transnacional con planta ubicada en Lima y es la que atiende a los clientes de Lima principalmente.

2.1.2. ÁREA GEOGRÁFICA DEL MERCADO.

Como anteriormente se hizo referencia el actual mercado referido al presente estudio, está ubicado en todo el Perú, debido a la poca producción de las empresas que cuentan con planta de destilación criogénica de gases del aire.

La producción de argón en el Perú es despreciable en comparación a la producción mundial esto representa cerca del 0.1% de la producción mundial del argón.

En el Perú, el consumo de dicho producto es del 100% siendo la participación de los competidores en la venta de gases industriales de las empresas que operan actualmente tal como se muestra en la figura 1.

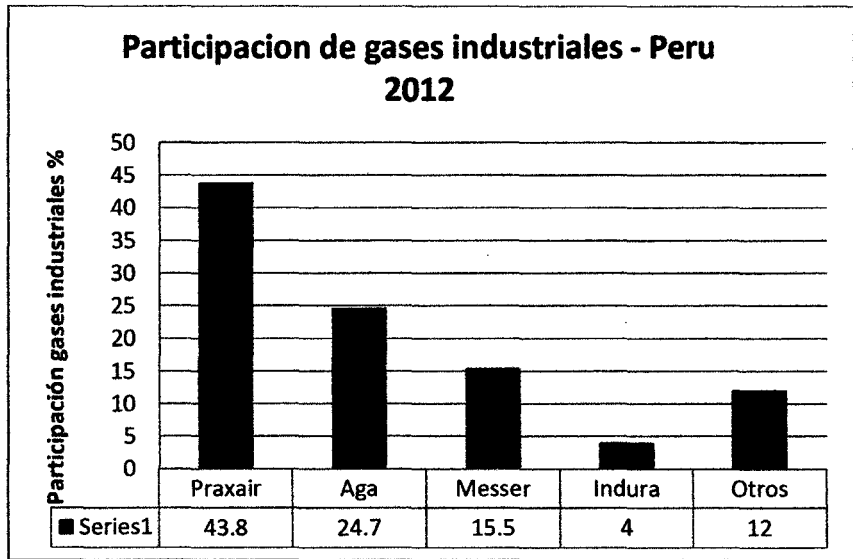


Figura 1. Participación de ventas de gases industriales en el Perú 2012.

Fuente: Elaboración propia.

La figura 2, muestra la participación de ventas de argón en el año 2012 de las empresas que operan actualmente (fuente interna de la empresa) y la figura 3, muestra el historial de ventas desde el año 2007 hasta la actualidad.

Los estudios realizados a la empresa Messer Gases corresponden a las ventas del argón en todas sus modalidades: Argón UHP, argón STD y mezclas clásicas y especiales. Estas ventas son como consecuencia de la producción en Plantas ASU así como la importación de argón líquido de los países de Centroamérica.

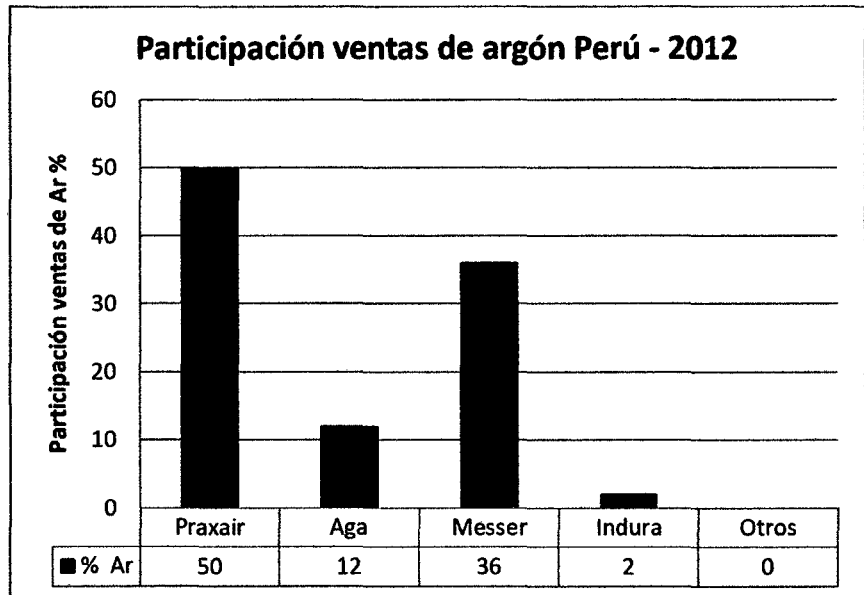


Figura 2. Participación de ventas de argón en el Perú 2012.

Fuente: Área de ventas Messer Gases.

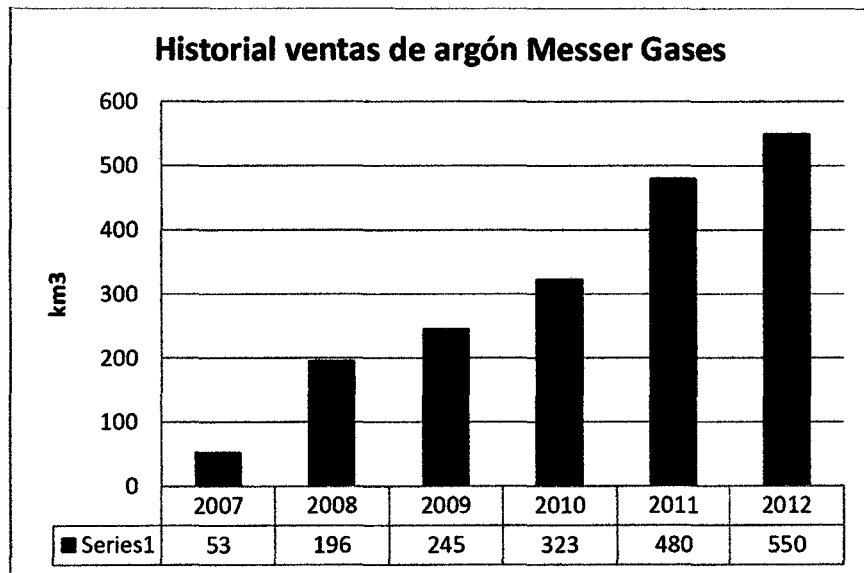


Figura 3. Historial de ventas de argón en Messer Gases

Fuente: Área de ventas Messer Gases.

2.2. MATERIA PRIMA Y MATERIALES INDIRECTOS.

Se presenta una relación de las materias primas e insumos, los que son necesarios para la purificación de argón crudo, la misma que se indica en la tabla 1.

2.2.1. DEFINICIÓN.

✓ **Materia prima e insumos.**

Es todo aquello o son todos aquellos que intervienen en el proceso productivo y terminan formando parte del producto final.

✓ **Materiales indirectos.**

Son aquellos que participan en el proceso productivo pero que no llegan a constituir parte integrante del proceso terminado.

2.2.2. DESCRIPCIÓN Y LUGAR DE USO.

✓ **Materia prima e insumo.**

En este proyecto la única materia prima que se tiene es el argón con una pureza del 95%, llamado también argón crudo, el cual es proveniente de la destilación criogénica de gases del aire y al cual se le interviene en todo el proceso de purificación.

✓ **Materiales indirectos.**

Los materiales indirectos son los que participan en el proceso para la producción de argón UHP, también son llamados consumibles y son de vital importancia para lograr obtener el producto terminado en la cantidad y calidad deseada.

Tabla 1. Materiales indirectos para la producción de argón UHP.

DESCRIPCIÓN	LUGARES DE USO
Agua potable	Sello de compresor DEOXO CP0180 Intercambiador DEOXO aftercooler HX0392 Intercambiador de calor salida de DRYER HX0323 Intercambiador de calor salida agua de sello de compresor DEOXO HX0183 Usos generales
Energía eléctrica	Motores de impulsión para: <ul style="list-style-type: none"> - Compresor DEOXO CP0180 - Bomba de agua para el sistema DEOXO - Bomba de trasiego de argón líquido Sistema de secado de argón Funcionamiento de PLC, válvulas e instrumentación en general
Hidrógeno UHP	Purificación de argón crudo en reactor HT0390
Nitrógeno de proceso	Condensador de argón puro HX0526 Reboiler de argón puro HX0525 Regeneración de secadores de argón AD0320A/B
Aire seco	Instrumentación general de planta. Usos generales.
Grasa Lubricante	Compresor DEOXO CP0180 Motor de bomba de agua para DEOXO. Motor de bomba de trasiego de argón líquido.
Celdas de analizadores	Celdas para analizadores AE-0520 y AE-0525C

Fuente: Manual de Operaciones Planta APU Messer Gases.

2.3. PRODUCTO.

Un producto es todo aquello que puede ofrecerse a la atención de un mercado para su adquisición, uso o consumo y que además puede satisfacer un deseo o necesidad. Abarca objetos físicos, servicios, personas, sitios, organizaciones e ideas.

Una unidad de producto por su parte, es la que se distingue de las demás por su tamaño, precio, aspecto u otro atributo. Así como por ejemplo el argón UHP es un producto y un cilindro de presión es su unidad de producto.

2.3.1. DEFINICIÓN.

Los gases nobles como el argón tienen poca tendencia a participar en reacciones químicas. El argón como el resto de los gases nobles presentan las siguientes propiedades: Es incoloro, inodoro y muestra una reactividad química muy baja en condiciones normales.

El estado del argón en su forma natural es gaseoso. El número atómico del argón es 18 y su símbolo químico es Ar. El punto de fusión del argón es de $-189,35\text{ }^{\circ}\text{C}$. El punto de ebullición es de $-185,85\text{ }^{\circ}\text{C}$.

El argón contenido en el aire apenas llega al 0,9 %, no puede encontrarse en estado natural aparte del aire. No tiene capacidad de soporte vital, aunque gracias a su enorme inercia química y su relativa facilidad de extracción, sus propiedades son apreciadas en ciertos campos de la industria.

2.3.2. PROPIEDADES.

Las propiedades más importantes del argón son las que se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 2. Propiedades físicas del Argón

PROPIEDAD	Unidad en SI
Fórmula molecular	Ar
Apariencia	Incoloro
Olor	Inodoro
Peso molecular	39,928 g/mol
Punto de fusión (1,013 bar)	-189,2 °C
Calor latente de fusión (1,013 bar, en el punto triple)	29,6 kJ/kg
Densidad del líquido (1,013 bar, punto de ebullición)	1 394 kg/m ³
Punto de ebullición (1,013 bar)	-185,9 °C
Calor latente de vaporización (1,013 bar, punto de ebullición)	162,3 kJ/kg
Temperatura crítica	-122,3 °C
Presión crítica	4 905 kPa (abs)
Densidad crítica	539,6 kg/m ³
Temperatura del punto triple	-199,3 °C
Presión del punto triple	68,7 kPa (abs)
Densidad del gas (1,013 bar, punto de ebullición)	5,853 kg/m ³
Densidad del gas (1,013 bar, 21°C)	1,65 kg/m ³
Factor de compresibilidad (1,013 bar, 21°C)	0,9993
Gravedad específica (1,013 bar, 21°C)	1,38
Volumen específico (1,013 bar, 21°C)	0,606 m ³ /kg
Capacidad calorífica a presión constante (1,013 bar, 21°C)	0,523 kJ/(kg °C)
Capacidad calorífica a volumen constante (1,013 bar, 21°C)	0,314 kJ/(kg °C)
Viscosidad (1,013 bar, 0°C)	0,02099 mPa s
Conductividad térmica (1,013 bar, 0°C)	0,0163W/(mK)
Solubilidad en agua (1,013 bar, 0°C)	0,0537 vol/vol

Fuente: Carmeño Z.A (2003). Universidad del Oriente Nucleo de Anzoátegui. Venezuela

2.3.3. USOS Y APLICACIONES.

No es fácil separar los usos de este producto en fase líquida de la gaseosa, pues gran parte del líquido que se vende es para su utilización final en forma gaseosa; partiendo de este punto de vista, las principales aplicaciones para este producto son las siguientes:

✓ **Industria metalúrgica.**

El argón es utilizado como gas protector contra los efectos de la oxidación del aire con la soldadura y corte de metales, para la desgasificación y remoción de impurezas en la industria del aluminio, y como gas inerte de soplado en la industria del acero, con el fin de homogeneizar temperatura y composición química del acero líquido.

✓ **Alimentos y bebidas.**

El argón se usa en atmósferas controladas reemplazando al nitrógeno en la mayoría de sus aplicaciones. Su solubilidad y determinadas características moleculares le proporcionan propiedades especiales para el uso con vegetales, ya que bajo ciertas condiciones reduce las reacciones metabólicas.

✓ **Industria eléctrica.**

Se emplea como gas de relleno en lámparas incandescentes ya que no reaccionan con el material del filamento incluso a altas temperaturas y presión, prolongando de este modo la vida útil de la bombilla.

✓ **Vidrio, cemento y cal.**

Por su capacidad de aislamiento térmico el argón es utilizado para el relleno del espacio interior en ventanas de doble acristalamiento de alta eficiencia térmica.

✓ **Electrónica.**

Es utilizado como gas de plasma en espectrometrías de emisión de plasma, en la fabricación de semiconductores y circuitos, y como gas de protección contra impurezas por los mismos.

✓ **Automotriz y transporte.**

Utilizado en soldadura, corte y airbags.

✓ **Otras industrias.**

En el buceo técnico, se emplea el argón para el inflado de trajes secos los que impiden el contacto de la piel con el agua a diferencia de los húmedos típicos de neopreno tanto por ser inertes como por su pequeña conductividad térmica lo que proporciona el aislamiento térmico necesario para realizar largas inmersiones a cierta profundidad.

2.4. ANÁLISIS DE LA DEMANDA.

Podemos decir que los deseos del hombre son ilimitados, mas no sus recursos. En consecuencia escogerá los productos que les procura la mayor satisfacción al menor costo posible. Sus deseos se convierten en demandas cuando están respaldados por el poder adquisitivo.

El análisis de la demanda en este capítulo, es de importancia fundamental, el cual consiste en la estimación de la cantidad demandada actual, así como la evaluación de su comportamiento a través del tiempo, es decir, de su tendencia y sus proyecciones al futuro.

Dichas proyecciones tendrán un horizonte de planeamiento de 10 años, a partir del 2013 hasta 2022 inclusive.

Por horizonte de planeamiento se entiende al periodo de vida del proyecto, relevante para quien lo evalúa, por lo tanto, puede haber tantos horizontes como puntos de vista y su duración depende de cada persona o entidad evaluante.

Para la determinación de las proyecciones de demanda ha sido necesario contar con una base de datos, todos estos referidos a producciones y ventas pasadas de la empresa y competidores desde el año 2007 hasta el 2012 a nivel nacional. El método que se ha empleado en dicha determinación es el de mínimos cuadrados que a continuación se muestra.

Como se podrá observar en el plano cartesiano, el eje de las abscisas representan los periodos o años, y en el de las ordenadas las cantidades producidas expresadas en miles de metros cúbicos.

Determinación de coeficientes:

- ✓ Coeficiente de correlación entre variables (r).

Calculando el coeficiente de correlación da como resultado $r = 0.98$ y al ser $0 < r < 1$ para una correlación positiva, el valor adimensional de 0.98 es bastante significativo.

- ✓ Varianza (S_y).

Se sabe por estadística que para una línea tendencial sea confiable, es condición que la franja correspondiente al intervalo de confianza definido por $\pm S_y$, contenga por lo menos los $2/3$ del número de puntos.

Del gráfico calculando $S_y = 20.1$ y los $2/3$ de $N = 6$ es 4 y como $5 > 4$; la línea es confiable.

Tabla 3. Cálculos de mínimos cuadrados para proyección de ventas de argón en Messer Gases.

AÑO	X	Y (Th m ³)	X ²	x = X - \bar{X}	y = Y - \bar{Y}	x ²	xy	XY	Y ²	\hat{Y}	(Y - \hat{Y}) ²	y ²	(Y - \hat{Y})
2007	0	280	0	-2,50	-115,83	6,25	289,58	0	78 400	260,64	374,70	13 417,36	19,36
2008	1	315	1	-1,50	-80,83	2,25	121,25	315	99 225	314,79	0,05	6 534,03	0,21
2009	2	350	4	-0,50	-45,83	0,25	22,92	700	122 500	368,93	358,29	2 100,69	-18,93
2010	3	400	9	0,50	4,17	0,25	2,08	1 200	160 000	423,07	532,29	17,36	-23,07
2011	4	480	16	1,50	84,17	2,25	126,25	1 920	230 400	477,21	7,76	7 084,03	2,79
2012	5	550	25	2,50	154,17	6,25	385,42	2 750	302 500	531,36	347,56	23 767,36	18,64
ΣVALOR	15	2 375	55	0,00	0,00	17,50	947,50	6 885,00	993 025	2 376	1 620,64	52 920,83	

$$\bar{X} = 2,5 \quad \hat{y} = \left(\frac{xy}{x^2}\right)\hat{x} \quad \hat{Y} - \bar{Y} = 54,14(\hat{X} - \bar{X})$$

$$\bar{Y} = 396$$

$$\text{Pendiente} = 54,14 \quad \hat{y} = 54,14\hat{x} \quad \hat{Y} = 54,14\hat{X} + 260,64$$

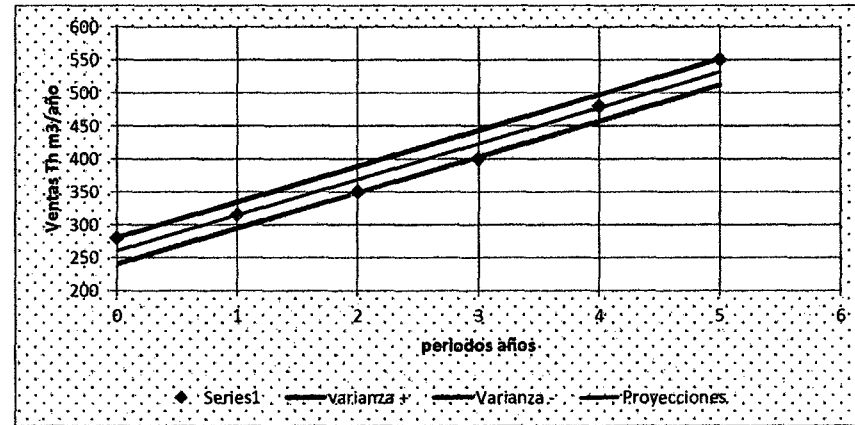
$$N = 6$$

PROYECCIONES		
AÑO	\bar{X}	\bar{Y} (Th m ³)
2013	6	586
2014	7	640
2015	8	694
2016	9	748
2017	10	802
2018	11	856
2019	12	910
2020	13	965
2021	14	1 019
2022	15	1 073

Coef. Corr r = 0,98

Sy² = 405,16

Sy = 20,1



Fuente: Área de ventas Messer Gases.

2.5. COMERCIALIZACIÓN.

En esta parte del capítulo referido al estudio del mercado, “la comercialización”, se dará a conocer aspectos relacionados con la forma y manera que la misma es realizada actualmente en el mercado a nivel nacional, así mismo la que se adoptará una vez que se obtenga dicho producto de la purificación del argón crudo al 95% ubicado en la ciudad de Chimbote.

Cabe señalar que los únicos productores de argón estándar y UHP son las empresas de gases industriales Praxair y AGA los cuales obtienen el argón UHP por destilación fraccionada. Messer Gases compra argón UHP a AIR LIQUIDE de Trinidad y Tobago para poder atender a los clientes en las diferentes modalidades que se muestran a continuación:

a. Argón UHP Líquido.

✓ Tanques.

✓ Termas.

b. Argón UHP Gaseoso.

✓ Cilindros de alta presión

c. Argón Estándar. (cilindros que no se realizan tratamiento)

✓ Cilindros de alta presión.

d. Mezcla de argón.

✓ Cilindros de alta presión Ferroline 80 (80 %Ar/20% CO₂).

✓ Cilindros de alta presión Ferroline 90 (90 %Ar/10 %CO₂).

✓ Cilindros de alta presión Ferroline 75 (75 % Ar/25 %CO₂).

Como antes se mencionó, dicho producto es comercializado a nivel nacional, dicha comercialización se realiza en cilindros o botellas de acero aleado de capacidades muy diversas, que oscilan entre 70 kg - 80 kg en su mayoría, en termas aisladas cuyo pesos varían entre 120 kg - 130 kg y tanques transportables, los cuales sirven como tanques madrina para el carguío de los tanques estacionarios instalados en plantas envasadoras o clientes importantes (llámese éstos a los que tienen un mayor consumo, por encima de 10 000 kg al mes).

2.6. PRECIO.

El precio estimado para la venta de argón en sus diferentes modalidades son los siguientes:

✓ Argón UHP = US\$/m³ 6,5 (incluido IGV).

✓ Argón STD = US\$/m³ 6,0 (incluido IGV).

Para fines de cálculo se considerará un solo precio para las ventas de argón, este precio promedio será de US\$/m³ 6,2 incluido IGV.

La empresa importa argón UHP de la empresa Air Liquide ubicado en el país de Trinidad y Tobago para poder satisfacer las necesidades de los clientes en las diferentes modalidades; esta importación se realiza debido a la poca producción de argón líquido en las plantas criogénicas de destilación del aire a nivel nacional, en el cuadro siguiente se muestran los precios por concepto de importación con la finalidad de realizar los costos tanto de importación como de producción por metro cúbico y compararlos para ver la viabilidad de este proyecto.

Tabla 4. Costos de argón importado.

ESPECIFICACIÓN	CANTIDAD	US\$
Costo FOB de argón UHP en Trinidad y Tobago	20 000 kg	21 000,00
Flete marítimo de Trinidad Tobago a Lima	-	1 600,00
Flete marítimo de Lima a Trinidad y Tobago	-	1 600,00
Seguro	-	34,11
Ad-valoren	6,5%	1 365,00
Inspección	2,0%	420,00
Imp. Promoción municipal	-	405,00
Imp. General a la venta	18,0%	3 780,00
Tasa servicio despacho	-	33,00
Flete terrestre en Lima	-	500,00
Gasto Total de Importación	-	30 737,11
Costo de argón importado	US\$/m ³	2,74

Fuente: Área logística Messer Gases.

Con estos datos el costo de Argón importado de la empresa Air Liquide ubicado en Trinidad y Tobago es de: 2,74 US\$/m³.

CAPITULO 3

DESTILACIÓN CRIOGÉNICA DE GASES DEL AIRE

3.1. LIQUIDOS CRIOGÉNICOS.

Se llama líquido criogénico a todos los gases que pueden ser licuados por enfriamiento y luego almacenados y distribuidos en grandes cantidades en estado líquido.

3.1.1. INTRODUCCIÓN.

Gases permanentes son los gases que no pueden ser licuados por compresión a temperaturas normales.

El oxígeno, nitrógeno y el argón, por ejemplo, se condensan a presión normal en el rango de temperatura de $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$, otros gases que pueden ser manipulados de esta manera son el metano, gas natural, hidrógeno y helio.

La distribución de gases en forma líquida ayuda a la producción y a la distribución. Es eficiente para concentrar la producción en un pequeño número de grandes plantas, desde los cuales los productos son transportados para el llenado de cilindros. La densidad del líquido criogénico es aproximadamente cuatro veces tan alto como el mismo gas comprimido a 200 bar.

Los líquidos criogénicos son mantenidos en estado líquido por aislamiento térmico, no por alta presión. La relación de pesos entre contenido y envase para un semitrailer típico es de 3:1 y para cilindros de gas es de 1:5. En términos de peso, el transporte criogénico es entonces 15 veces más eficiente que el transporte de cilindros de gas.

Los líquidos criogénicos son transferidos de un tanque a otro por una bomba de alta capacidad, un semitráiler con una capacidad de 23 000 kg de líquido puede ser vaciado o llenado en casi 1 hora.

3.1.2. ENVASES.

Un envase para líquido criogénico^[5] consiste en un recipiente interno diseñado para una presión máxima que depende del diseño del recipiente. Este recipiente interno es encerrado por una carcasa externa que puede resistir una presión externa equivalente a la presión atmosférica. El espacio entre la carcasa y el recipiente interno contiene material aislante y permanentemente evacuado a un vacío de aproximadamente 0,01 bar. La evacuación de este espacio elimina la conducción térmica del aire.

El material aislante reduce la transferencia de calor por radiación, además, el material aislante asegura que el recipiente será aceptablemente aislado, desde el punto de vista de seguridad, en el caso de una pérdida de vacío. El recipiente interior es anclado a la carcasa con soportes de alta capacidad de soporte de carga, con relación a su conducción térmica.

Un buen aislamiento permite que el contenido del tanque se almacene a baja temperatura sin la necesidad de un sistema de refrigeración. Un tanque en contacto con la atmósfera pierde entre 0,1 % y 1,0 % de su contenido por día.

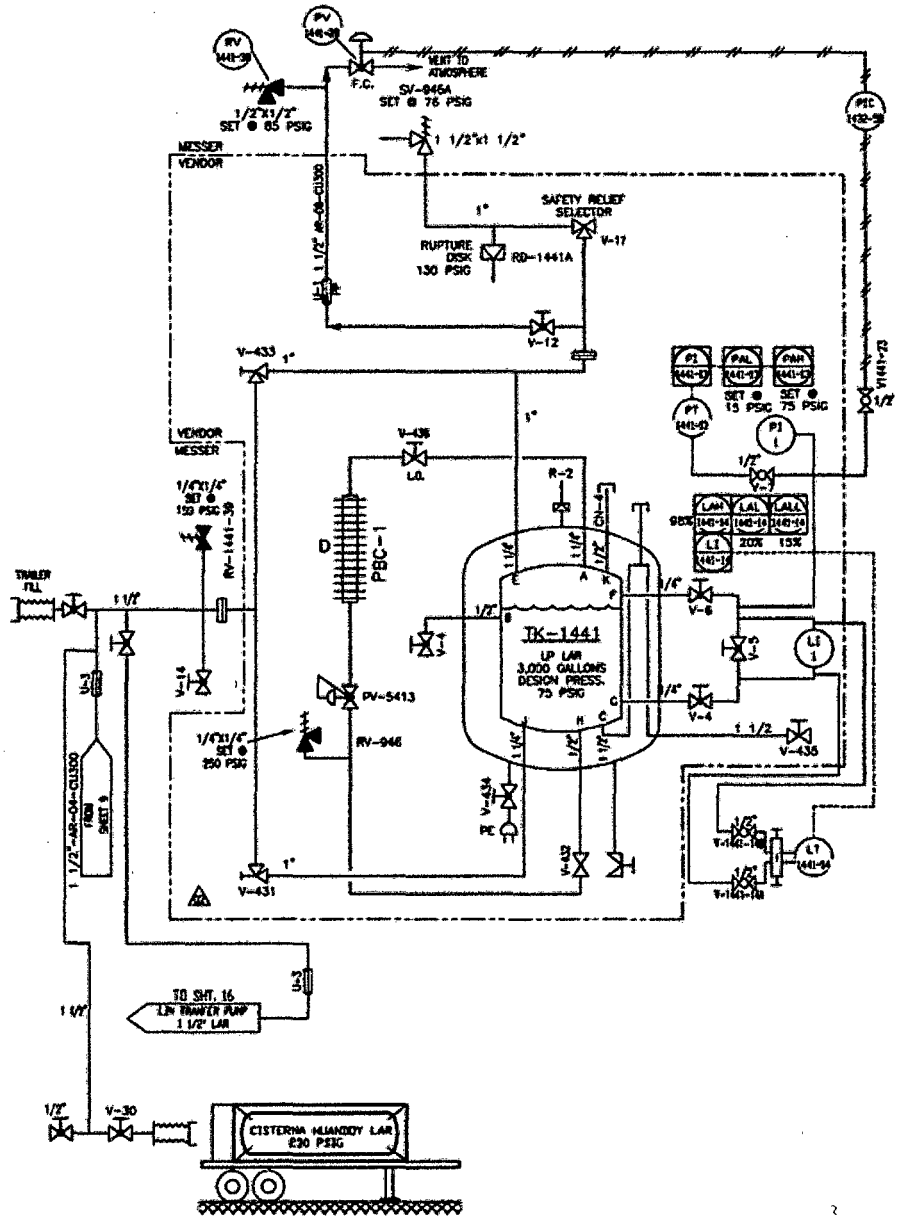


Figura 4. Tanque de almacenamiento de argón líquido.

3.1.3. BAJA TEMPERATURA.

La baja temperatura de los líquidos criogénicos comparado con la temperatura ambiental requiere que se tomen cuidados especiales.

Las estructuras y materiales para uso externo son usualmente diseñados para soportar un mínimo de temperatura de aproximadamente $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Los equipos para líquidos criogénicos por eso, deben siempre ser especialmente diseñados. Todos los materiales expuestos deben tener propiedades mecánicas satisfactorias a las bajas temperaturas de los líquidos, usualmente a su punto de ebullición normal. La mayoría de los materiales metálicos se pueden usar, con una importante excepción: no aceros ordinarios. Solamente los aceros inoxidable, austeníticos y ciertas aleaciones de níquel tienen suficiente resistencia al impacto a temperaturas debajo de $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Solamente unos pocos materiales polímeros puede ser usados, por ejemplo, teflón y fibra de vidrio reforzado. Los materiales cerámicos retienen sus propiedades a bajas temperaturas y también pueden ser usados.

3.1.4. EVOLUCIÓN DEL GAS.

Un líquido criogénico está constantemente absorbiendo calor de sus alrededores. Más tarde o más temprano, el líquido se convertirá en gas.

Todo equipamiento cerrado, tales como tanques, tuberías, etc., deben ser provistos con dispositivos de alivio que limitan la presión al nivel más alto a la cual el sistema ha sido diseñado. La liberación de líquidos criogénicos causa una niebla, debido a la vaporización del líquido al mezclarse con el aire.

Grandes cantidades de fuga pueden alterar la composición del aire alrededor, especialmente en ambientes cerrados. El enriquecimiento del aire con oxígeno causa que materiales combustibles se enciendan más fácilmente y se quemen más rápidamente. Pero aún los gases

inertes (nitrógeno y los gases nobles) constituyen un peligro, porque ellos pueden desplazar el oxígeno del aire y causar asfixia.

3.1.5. MANIPULEO.

Cuando grandes cantidades de líquido (más de 50 litros) son manipulados, deben usarse guantes, visor para la cara y ropa hermética.

3.1.6. ALMACENAMIENTO.

Grandes cantidades de líquido criogénico deben ser almacenadas en tanques exteriores, en un área especialmente diseñados y designados para tal propósito. Dichas áreas deben siempre ser mantenidas libres de objetos extraños^[5].

3.1.7. NORMAS DE SEGURIDAD PARA EL ARGÓN.

El argón es un gas no tóxico, pero está incluido entre los simples gases asfixiantes. Su efecto asfixiante es proporcional a la reducción de la presencia parcial de oxígeno en una mezcla argón – aire. Cuando el nivel de argón en el aire de respiración reduce el contenido de oxígeno a 3/4 o menos de la concentración normal, resulta la asfixia. El cuerpo percibe esto como una deficiencia de oxígeno y reacciona con síntomas de sofocación, en forma de falta de aliento y respiración rápida, con un deterioro simultáneo de la capacidad de reacción y coordinación muscular^[11].

El argón en forma líquida o como gas frío puede causar muy serias quemaduras por frío en la piel y los ojos. Si el argón líquido entra en contacto con objetos que están a más altas temperatura, resultará una violenta ebullición y salpicadura.

Cuando se trabaja con argón líquido debe usarse guantes, anteojos y otras ropas de protección. El gas debe ser manipulado solamente en áreas bien ventiladas.

La asfixia es engañosa en el sentido de que los síntomas aparecen muy gradualmente, ya que cuando la víctima raramente lo nota es demasiado tarde, la víctima debe ser sacada rápidamente al aire libre y suministrarle oxígeno o respiración artificial, y debe obtenerse inmediatamente atención médica. Superficies de la piel que reciben quemaduras por frío deben ser enjuagados con agua a temperatura no mayores que la del cuerpo.

El argón es normalmente almacenado y transportado en forma líquida en tanques bien aislados a una presión relativamente baja. Como gas comprimido es almacenado en cilindros de alta presión.

A consecuencia de su gran volumen de expansión durante la vaporización, el argón líquido nunca debe ser encerrado en tuberías o recipientes que no están previstos de dispositivos para la liberación de exceso de presión a través de una válvula de seguridad u otros dispositivos.

La mayoría de metales comunes y aleaciones de metales pueden ser usadas en el sistema de tuberías para argón gaseoso, desde que el argón es inerte y no corrosivo. Los materiales apropiados para usar en argón líquido son el acero inoxidable 18/8 (18 % Cr y 8 % Ni). Otras aleaciones austeníticas tales como el cromo – níquel, el monel, el bronce y el aluminio también pueden ser usados. Los aceros comunes al carbón y la mayoría de aceros de baja aleación se vuelven quebradizos a las bajas temperaturas del argón líquido y no deben ser usados.

3.2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE SEPARACIÓN DE GASES DEL AIRE.

El aire es una mezcla de diferentes tipos de gases, de los cuales los más importantes son el nitrógeno, oxígeno y argón. En adición a estos tres componentes, el aire contiene algunas trazas de otros componentes tales como: vapor de agua, dióxido de carbono, hidrocarburos, y gases raros; si se eliminara las impurezas del aire, la composición sería la siguiente:

Tabla 5. Componentes principales del aire.

Componente del aire	Símbolo	Composición
Nitrógeno	N ₂	78,11%
Oxígeno	O ₂	20,96%
Argón	Ar	0,93%

Fuente: Manual de entrenamiento Messer Gases.

Las cantidades relativas de trazas de los componentes del aire pueden variar significativamente dependiendo de la ubicación geográfica, proximidad de la planta, tiempo del día y estación.

Tabla 6. Concentraciones normales del aire.

Componente del aire	Símbolo	Composición	Punto normal de ebullición (°C)	Punto normal de fusión (°C)
Nitrógeno	N ₂	78,084%	-195,8	-210,0
Oxígeno	O ₂	20,946%	-182,9	-218,8
Argón	Ar	0,934%	-185,9	-189,4
Dióxido de C	CO ₂	350 ppm	-	-78,6
Neón	Ne	18 ppm	-246,1	-248,6
Helio	He	5 ppm	-268,9	-
Kriptón	Kr	1 ppm	-153,3	-157,2
Hidrógeno	H ₂	0,5 ppm	-252,8	-259,2
Xenón	Xe	0,1 ppm	-108,1	-111,7

Fuente: Manual de entrenamiento Messer Gases.

Tabla 7. Impurezas del aire.

Componente del aire	Símbolo	Composición ppm
Agua	H ₂ O	1 000 - 28 000
Metano	CH ₄	1,0 - 3,0
Oxido nitroso	N ₂ O	0,5
Monóxido de carbono	CO	0,006 - 1
Ozono	O ₃	0,001 - 0,1
Etano	C ₂ H ₆	0,001 - 0,1
Etileno	C ₂ H ₄	0 - 2,0
Propano	C ₃ H ₈	0 - 0,1
Acetileno	C ₂ H ₂	0 - 1,0
Butanos	C ₄ H _X	0 - 0,2
Pentanos	C ₅ H _X	0 - 0,08

Fuente: Manual de entrenamiento Messer Gases.

La tabla 7, muestra la composición de las impurezas del aire, la mayoría de estos componentes ejercen una influencia negativa en la producción de oxígeno, nitrógeno y argón. Por lo tanto es necesario eliminarlos durante el proceso de producción, por lo que es indispensable pasar por diferentes procesos para que se dé con eficiencia la eliminación de estos componentes.

Es una característica del proceso criogénico el que los líquidos estén muy cercanos a su punto de ebullición y que el calor se recupere. La diferencia en los puntos de ebullición tiene una influencia vital en la separación de los líquidos por el método de la destilación o rectificación.

3.2.1. RECTIFICACIÓN.

Es el proceso de separar una mezcla en dos o más elementos para obtener por separado sus componentes.

La rectificación, se basa en el principio físico de que los líquidos con un punto de ebullición más bajo, se evaporan más fácilmente que los líquidos con un punto de ebullición más alto^[8].

En forma rápida se puede explicar los principios de la instalación de la siguiente manera:

- ✓ Se necesita un compresor que aspire el aire del ambiente y lo comprima dentro de la instalación.
- ✓ Este aire se tiene que tratar de eliminar la mayor cantidad de impurezas.
- ✓ Se tiene que enfriar el aire y en parte licuarlo.
- ✓ El aire se descompone en una unidad de rectificación.
- ✓ Los gases fríos que salen de la unidad de rectificación se emplean para enfriar el aire entrante (intercambio de calor).
- ✓ Los componentes que salen de la unidad en forma líquida contiene una gran cantidad de frío. También debido a la disponibilidad de un aislamiento perfecto, va entrando a la instalación cierta cantidad de calor. Por esta razón se irá perdiendo constantemente cierta cantidad de “frío” y por lo tanto se necesita una unidad adicional para producir “frío”
- ✓ Luego de producir frío para mantener nivelada la temperatura de los productos de la rectificación, estos son transferidos a través de tuberías aisladas a los tanques para su posterior distribución.

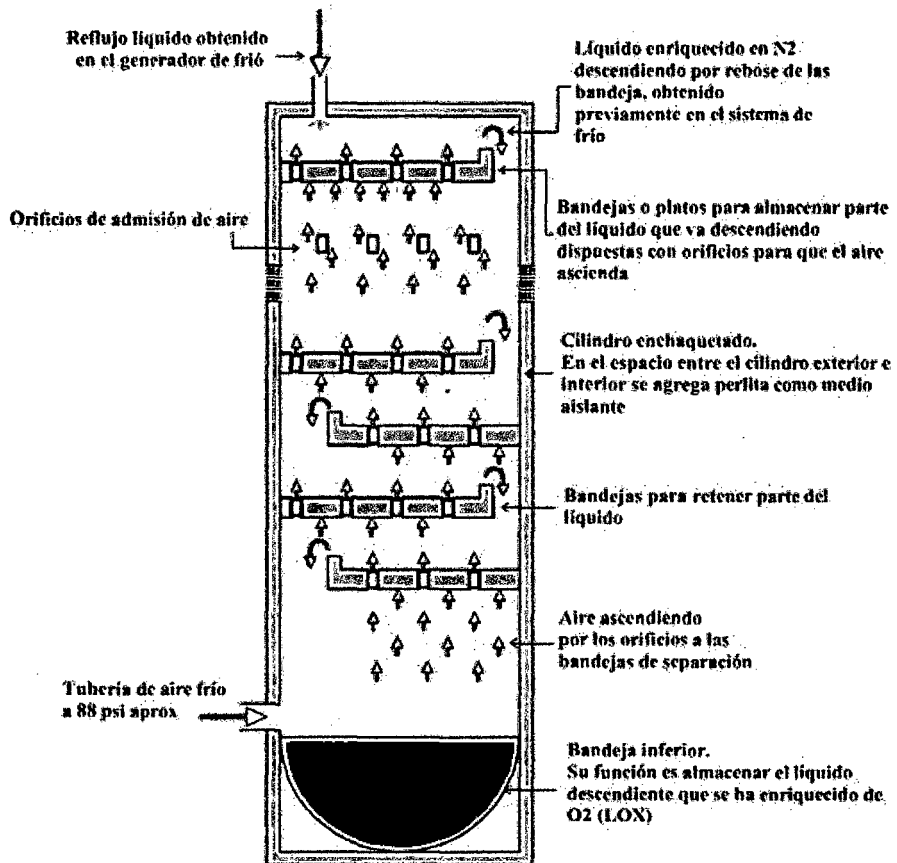


Figura 5. Funcionamiento de separación del aire.

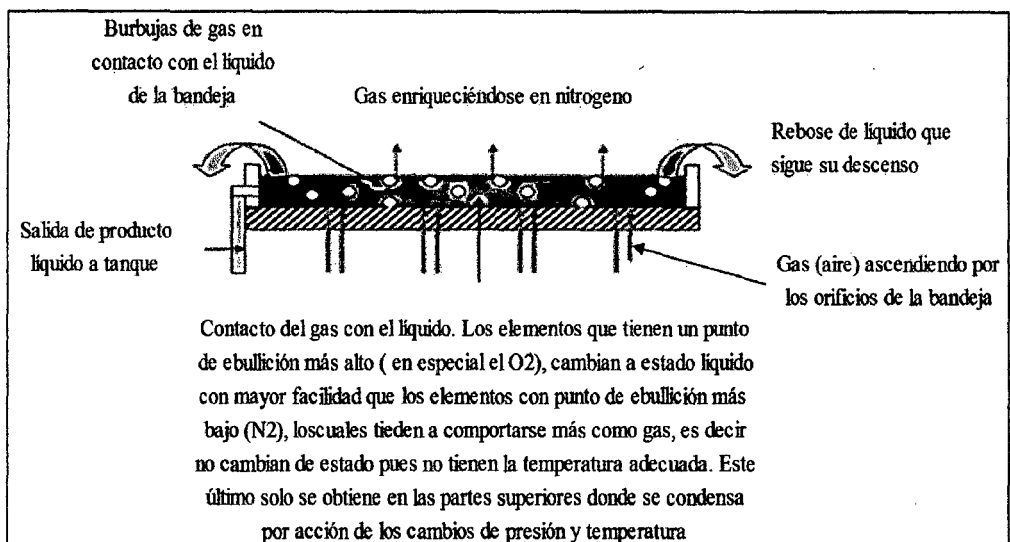


Figura 6. Operación en plato de destilación.

3.3. PROCESO DE FABRICACIÓN DE GASES DEL AIRE.

El propósito del proceso de separación de gases del aire es básicamente la separación y purificación de los componentes más abundantes^[7], para obtenerlo como producto líquido o gas. Los componentes más abundantes de aire son nitrógeno (78,11 %), oxígeno (20,96 %), y argón (0,93 %). La separación es un método complicado en el proceso de la destilación criogénica, siendo esta un proceso que ocurre a temperaturas muy bajas (aproximadamente -196 °C).

Las plantas de separación de aire por lo general son diseñados de acuerdo a las necesidades del cliente, para cumplir los requisitos de las especificaciones de los productos terminados. Los factores que influyen en la selección del diseño son los siguientes:

- ✓ Requerimiento de producto (oxígeno, nitrógeno, argón).
- ✓ El ratio de producto que se requiere obtener.
- ✓ Líquido o gas como producto terminado.
- ✓ Requerimiento de pureza.
- ✓ Requerimiento de presión.

La Planta instalada en Chimbote corresponde a una Unidad Separadora de Aire (ASU), es decir una planta diseñada para la producción de oxígeno, nitrógeno y argón.

3.3.1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO PRODUCTIVO EN PLANTA ASU MESSER.

La figura 7, muestra el diagrama de flujo simplificado con el balance de materia del proceso en Messer Gases, siendo las principales etapas del proceso los siguientes^[13]:

a. Sistema de pre-filtración del aire.

El aire es arrastrado hacia el ingreso de los filtros en el cual se eliminarán las partículas sólidas del aire, tales como el polvo.

b. Sistema de compresión del aire.

El flujo de aire filtrado, ingresa regulado a un flujo de 68 504 m³/h hacia los compresores de aire, los cuales son impulsados por medio de sus motores eléctricos de 5,22 MW y 2,61 MW, comprimiendo el aire hasta una presión de 6,20 bar a una temperatura de 90 °C, luego de la descarga se enfría el aire en un intercambiador posterior permitiendo alcanzar una temperatura de 27°C.

c. Sistema de pre-enfriamiento del aire.

Consiste de dos torres empacadas, en una se enfría agua con los gases de desecho de la columna (desecho de nitrógeno) en una cantidad aproximada de 26 295 m³/h , el agua ingresa a la torre de enfriamiento (Chiller Tower) a un caudal aproximado de 34 m³/h, esta agua se enfría por humidificación de los gases que ingresan, la misma que es bombeada a 8,96 bar a la torre DCAC (direct contact after cooler), en un ratio de 34 m³/h con una temperatura de 7 °C aproximadamente para enfría el aire hasta 8 °C , temperatura necesaria para el sistema de purificación, el agua luego retorna a la torre de enfriamiento.

d. Sistema de purificación del aire.

Consta de dos tanques conteniendo cada uno dos capas de alúmina y molecular sieve con una carga aproximadamente de 20 000 kg cada una. El aire, previamente enfriado ingresa a la cama que este en operación, mientras que la otra está en regeneración. Posteriormente el aire pasa por unos filtros para retener las partículas de alúmina o molecular sieve arrastradas.

La alúmina tiene como fin atrapar la mayor carga de humedad del aire y el molecular sieve atrapa humedad, dióxido de

carbono e hidrocarburos contenidos en este, a fin de purificar el mismo, garantizando un ingreso de aire a la columna de alta presión totalmente exento de impurezas.

e. Sistema de filtración del aire.

El aire es filtrado para retirar cualquier polvo o partícula sólida que el material absorbente haya dejado pasar durante la etapa de pre-purificación.

f. Sistema de enfriamiento y separación.

El sistema de enfriamiento de aire está conformado principalmente por 4 cuerpos de intercambiadores del tipo placa fina, dos en paralelo de los cuales dos se denominan terminales calientes y los otros dos los terminales fríos. En los intercambiadores se logra enfriar el aire hasta una temperatura cercana a la de su condensación ($-172\text{ }^{\circ}\text{C}$). Posteriormente este aire frío ingresa a la torre de destilación de alta presión donde inicialmente se separa la mayor cantidad de nitrógeno y se obtienen los reflujo necesarios para la alimentación de la columna de destilación de baja presión.

De la columna de alta presión HP (High Pressure) podemos sacar varias corrientes de importancia como la corriente de líquido rico que se saca de los fondos y que contiene cerca de 40 % de oxígeno; dicha corriente pasa por los adsorbedores de hidrocarburos y luego alimenta a la columna de baja presión.

En la columna de baja presión LP (Low Pressure) se obtiene el oxígeno a 99,8 % de pureza. A esta columna llegan los reflujo de la columna de alta presión, adicionalmente le llega líquido como reflujo del licuador de nitrógeno. De esta columna sale el flujo de desecho de nitrógeno.

La columna de baja presión tiene una derivación de gas para la columna de argón crudo en donde se separa el oxígeno del argón. El argón crudo que se extrae de esta columna contiene cerca de 3 % de oxígeno, y es enviado al sistema deoxo, donde se hace reaccionar el oxígeno contenido en el argón con hidrógeno para la formación de agua la cual es retirada, mientras que la mezcla de argón con exceso de hidrógeno se envía a la columna de destilación de argón puro. Aquí se licúa el argón mientras que el hidrógeno y nitrógeno salen por el venteo de la parte superior de la columna.

g. Sistema de compresión de oxígeno.

En el proceso se tiene dos compresores para oxígeno, uno de media presión y uno de alta presión. El compresor de media presión es Demag KA-10, de tipo axial centrífugo de 5 etapas, con intercambiadores entre etapas refrigerados con agua, el mismo que comprime hasta 13,10 bar, este es impulsado por un motor eléctrico de 2,23 MW. El compresor de alta presión es Sulzer 2D200, del tipo recíprocante de una etapa, con dos cámaras de compresión en paralelo; la presión de succión es de 13,10 bar y la de descarga es de 28,26 bar, cuenta con un motor eléctrico de 298,2 kW.

h. Sistema de licuación de nitrógeno.

Consta de una unidad compresora de alimentación de nitrógeno, una unidad de compresión de recirculación de nitrógeno, un compresor expansor, una unidad de refrigeración y la caja fría.

La unidad de alimentación de nitrógeno o Feed Compresor cuenta con un motor de 223,7 kW. Este compresor es el encargado de alimentar nitrógeno al licuador, el mismo que

previamente pasa por intercambiadores antes de llegar a la columna de destilación.

El compresor de reciclo admite nitrógeno el cual es comprimido en tres etapas hasta una presión de descarga de 30,33 bar cuenta con un motor de 1,49 MW.

El compresor expansor es de marca Cryostar y consta de un expansor de una etapa de tipo centrífugo conectado mecánicamente con el compresor que es también de una etapa y de tipo centrífugo. El nitrógeno comprimido por el Recycle es comprimido por el compresor hasta 36,54 bar, luego de ser enfriado en un aftercooler con agua, el nitrógeno es enviado a los intercambiadores del licuador y luego pasa por la unidad de refrigeración, la cual haciendo uso de un ciclo de compresión de freón enfría la corriente unos 6 °C para luego seguir siendo enfriada en los intercambiadores hasta -105 °C aproximadamente.

El expansor recibe nitrógeno a -105 °C y 36,54 bar aproximadamente, para expandirlo isoentrópicamente hasta 3,44 bar y -172 °C generando frío por la expansión; este nitrógeno expandido ingresa al licuador e intercambia calor en los intercambiadores para luego reingresar al reciclo a temperatura ambiente.

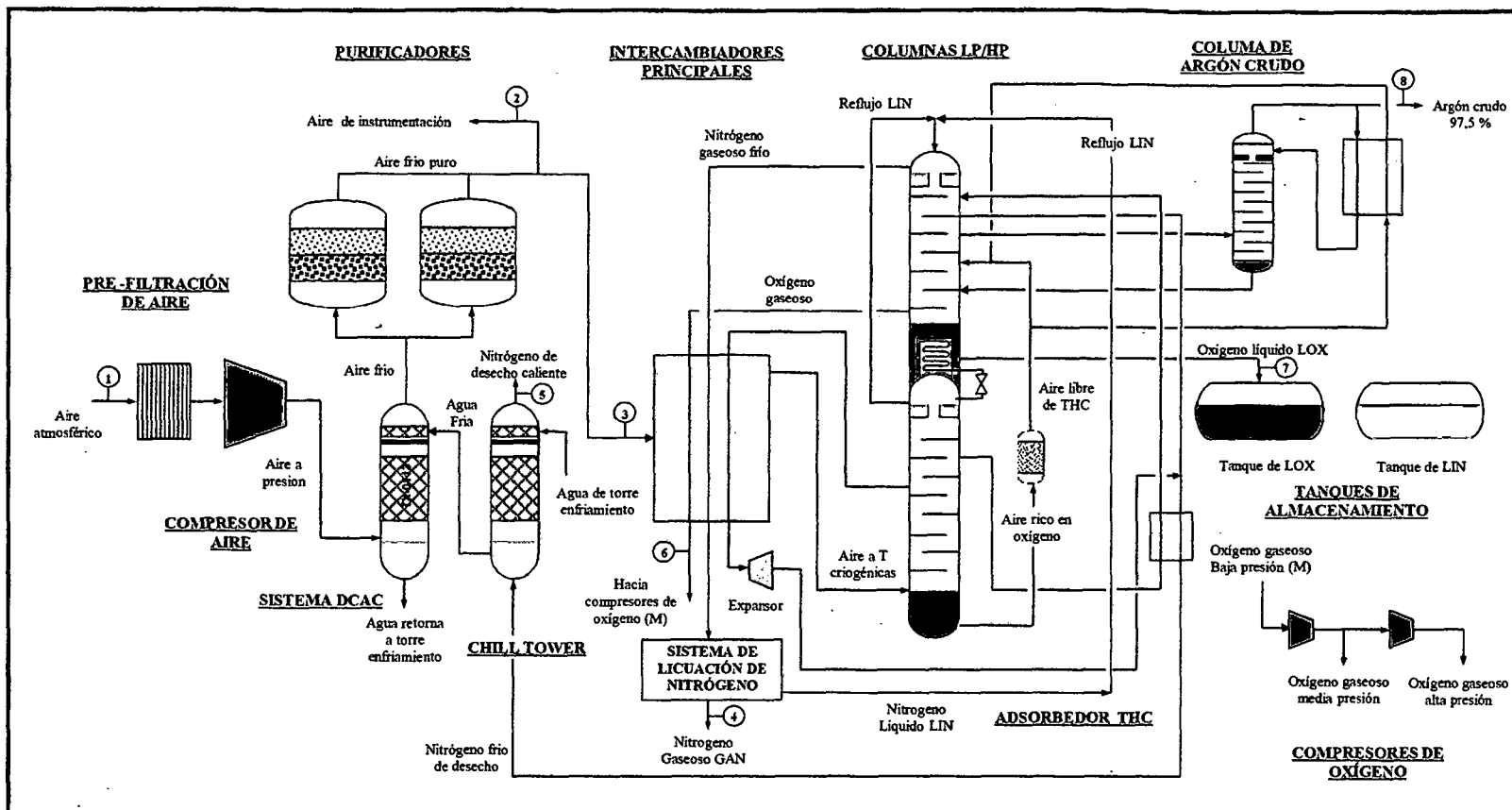
i. Sistema de tratamiento de agua.

Este sistema consta de una torre de enfriamiento, dos bombas verticales, tres ventiladores, sistema de tratamiento de agua de alimentación y planta de tratamiento y monitoreo.

El sistema cuenta con una membrana de osmosis reversa de una capacidad de 30 m³/h de agua producto de baja conductividad.

j. Sistema de almacenamiento de líquidos.

El sistema de almacenamiento consta de 7 tanques criogénicos; para el almacenamiento de oxígeno líquido se tienen 3 tanques de 189,27 m³, de 113,56 m³ y de 49,21 m³ haciendo en subconjunto una capacidad de almacenamiento de 405 000 kg. Para el almacenamiento de nitrógeno líquido se tiene 2 tanques de 34,06 m³ cada uno haciendo un total de 45 000 kg. Para el almacenamiento de argón líquido se tiene 2 tanques uno de 26,49 m³, otro de 13,24 m³, haciendo un total de 50 000 kg.



Leyenda :

- 1.- Ingreso de aire
- 2.- Aire de instrumentación
- 3.- Ingreso de aire a columna
- 4.- Nitrogeno gaseoso GAN 99,999 %
- 5.- Desecho de nitrogeno
- 6.- Oxigeno gaseoso GOX 99,999 %
- 7.- Oxigeno liquido LOX 99,999 %
- 8.- Argón crudo 97,5 %

Punto	Porcentaje	Unidad	1	2	3	4	5	6	7	8
Aire	100,00%	m ³ /h	68504	5488	63116	-	-	-	-	-
Nitrogeno	78,11%	m ³ /h	-	-	49300	14433	34867	-	-	-
Oxigeno	20,96%	m ³ /h	-	-	13229	-	3493	8414	1318	3
Argón	0,93%	m ³ /h	-	-	587	-	452	-	-	135

MESSER

Messer Gases del Peru SA

SISTEMA DE DESTILACION DE AIRE

Elaborado: Edifo Mueñas T

Figura 7 . Balance de materia en Planta ASU

3.3.2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA PARA LA PRODUCCIÓN DE ARGÓN CRUDO AL 95%.

a. Sistema de producción de argón crudo^[13].

La alimentación de vapor a la columna de argón crudo es retirada de la columna LP en el punto donde la composición de argón alcanza su máximo pico (figura 8). El diseño de la composición en la alimentación a la columna de argón crudo (alimentación cruda) es típicamente: 500 ppm N₂, ~ 5,0 – 8,0 % Ar, y ~ 92 - 95 % O₂. El propósito de la columna de argón crudo es concentrar esta alimentación cruda en flujo de argón crudo que contenga ~ 97,5% Ar, ~ 2,5% O₂, y concentraciones de nitrógeno en los niveles de los ppm. Todo el nitrógeno que entra en la columna de argón crudo concentra en el tope de la columna. El producto de argón crudo es retirado del tope de la columna de destilación como un producto de vapor saturado.

La separación de argón y oxígeno por destilación es muy difícil. Resulta más fácil separar nitrógeno y argón. Parte de razón de esto se debe a los puntos de ebullición del nitrógeno, oxígeno y argón. El nitrógeno y el argón concentrarán en el tope de la columna de argón crudo y el oxígeno se concentrará en el fondo de la columna de destilación. Para lograr la difícil separación, la columna de argón crudo requiere de muy altos ratios de reflujo. Casi todos los vapores que se mueven hacia arriba a través de las bandejas se condensa y son enviados de vuelta a la columna como reflujo. El flujo de alimentación cruda es aproximadamente 21 % del flujo de aire, mientras el flujo de producto de argón crudo es menor a 1 % del flujo del aire.

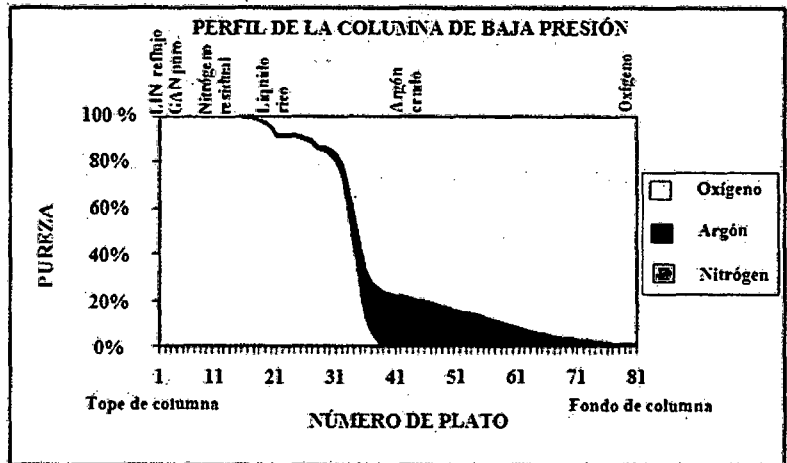


Figura 8. Perfil típico de purzas en columnas de destilación.

El reflujo líquido es generado por el condensador de argón crudo. El condensador de argón crudo condensa vapores de argón crudo (punto de ebullición de $-185\text{ }^{\circ}\text{C}$) del tope de la columna de argón crudo ocasionando la vaporización del líquido enriquecido (punto de ebullición aproximadamente de $-188\text{ }^{\circ}\text{C}$). La presión en el condensador es regulado para regular la temperatura del líquido rico, y por lo tanto el ratio de condensación. Esta es una manera indirecta de regular el flujo de alimentación cruda.

Si la cantidad de nitrógeno aumenta en la alimentación a la columna de argón crudo, el condensador de argón tendrá más problemas para condensar el argón. Esto se debe a que el punto de ebullición del nitrógeno ($-195.8\text{ }^{\circ}\text{C}$) es mucho menor que el vapor diseñado de argón crudo. Como la concentración de nitrógeno en el argón crudo se incrementa en el tope de la columna de destilación, la temperatura de ebullición del fluido disminuye. Si la temperatura disminuye demasiado, el líquido rico en el condensador de argón crudo ya no será lo suficiente fría para condensar el argón crudo contaminado con nitrógeno.

Esta condición se llama “vapor atrapado”. Tiene el potencial de parar toda la destilación en la columna de argón crudo. Como condensación se detiene, el flujo de alimentación cruda se detiene. Dado que no hay flujo de vapor a través de la columna, el líquido en las bandejas de destilación empieza a lloriquear a través de los orificios de las bandejas. En otras palabras todo el líquido regresará a la columna LP. La producción de argón se culminará y la pureza de oxígeno estará arruinada por la adición repentina de una gran cantidad de argón en el fondo de la columna LP.

Por lo tanto es muy importante tener las condiciones adecuadas en la columna LP para producir el máximo de argón. Si el reflujo de la columna LP es reducida, más argón se deja en los desechos de nitrógeno (waste) y la recuperación del argón será reducida.

La figura 9, muestra como el condensador de la columna de argón crudo condensa el argón crudo a costa de la ebullición del líquido rico.

El líquido rico debe ser más frío que el argón crudo a fin de que se produzca la condensación. En condiciones normales de operación, la temperatura del líquido rico es controlada por la presión del condensador. La condensación es impulsada por la diferencia de temperaturas. Cuanto mayor sea el delta de temperatura, mayor será la condensación. Bajo condiciones normales de funcionamiento, la temperatura de argón crudo es fijada por la pureza y la presión de la columna.

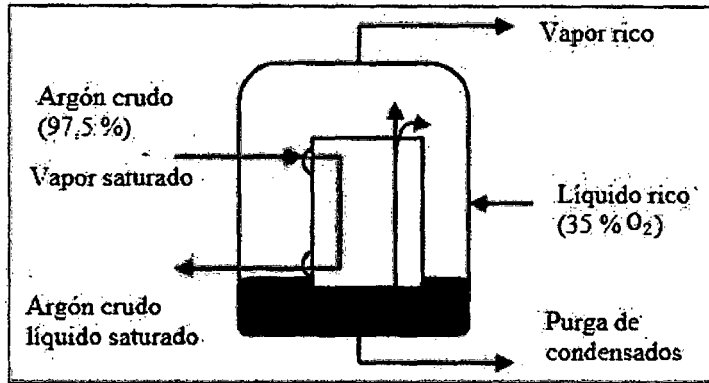


Figura 9. Condensador de la columna de argón crudo.

En la figura 10, se muestra un perfil normal de temperatura en el condensador de argón crudo, tener en cuenta que la temperatura de argón crudo permanece casi constante en ebullición (línea horizontal). Esto se debe a que es casi un líquido puro compuesto de ~ 97 % de argón. Como se recuerda que los fluidos puros hierven a una temperatura constante mientras que los líquidos impuros hierven a través de una gama de temperaturas

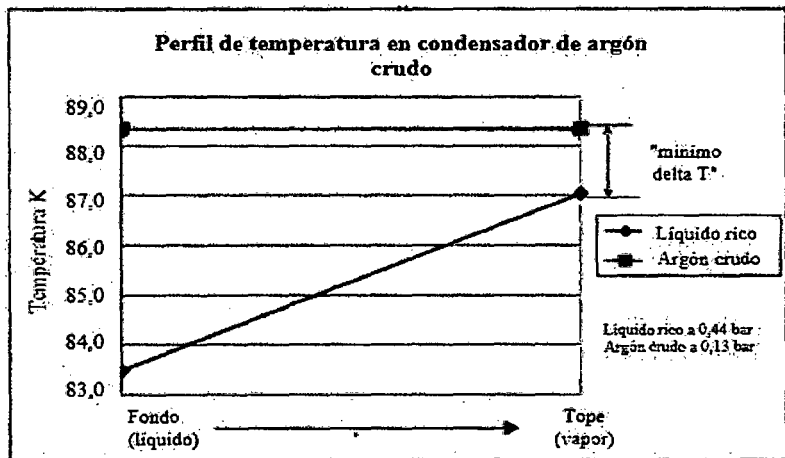


Figura 10. Perfil de temperatura en el condensador de argón crudo.

Fuente: Manual de entrenamiento Messer Gases.

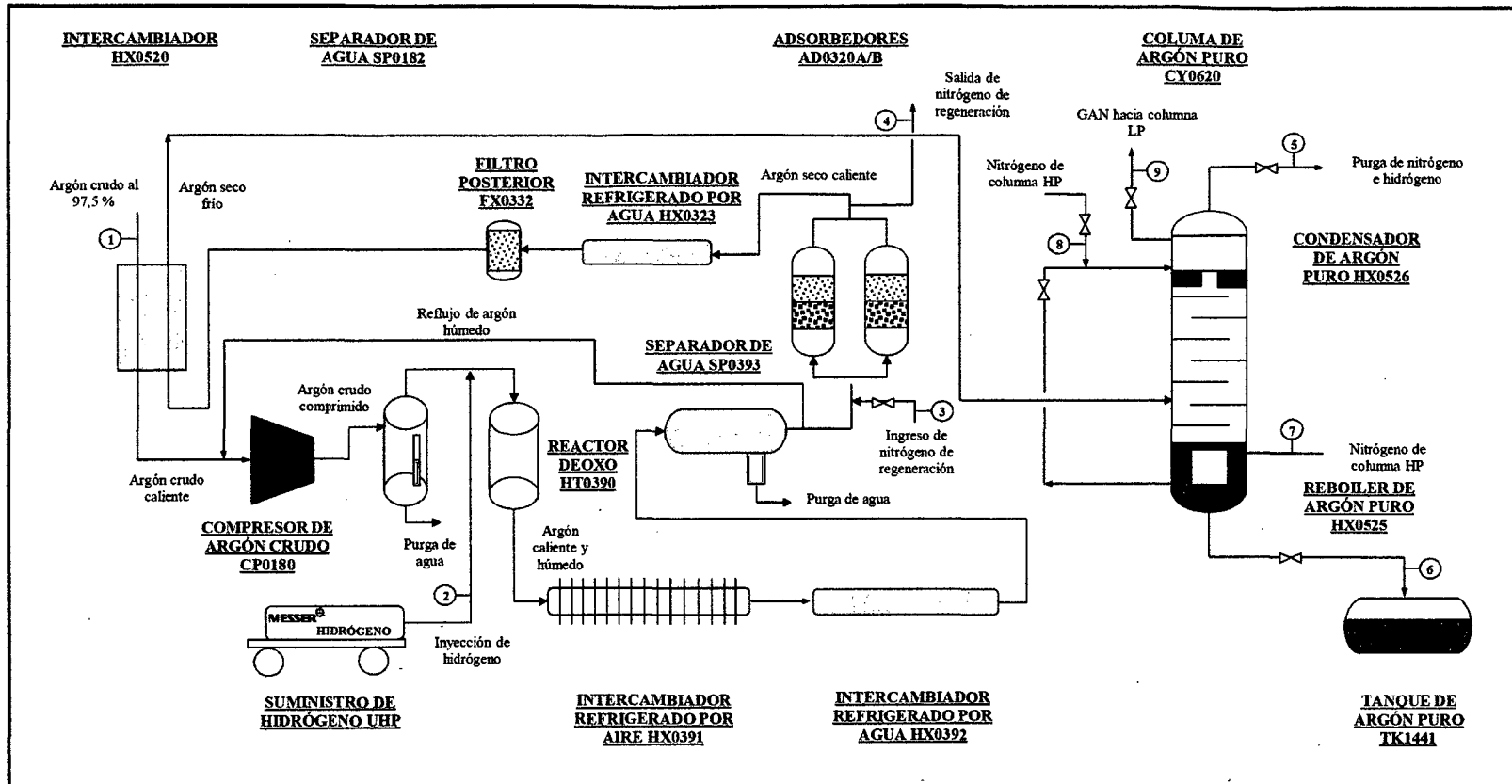
Como se observa en la gráfica, la temperatura del líquido rico varía a medida que está hirviendo. Esto es debido a que el líquido rico es un líquido compuesto por impurezas ~ 35 % de oxígeno. El líquido rico es capaz de condensar el argón crudo, porque es más fría.

b. Sistema de purificación de argón crudo.

Messer Gases del Perú cuenta en sus instalaciones con Unidades Purificadoras de Argón (APU), para la obtención de argón de altísima calidad, tal como se muestra en la figura 11. Esta unidad purifica el argón crudo proveniente del caja fría (descritos anteriormente); el oxígeno es removido utilizando el proceso químico de la oxidación (Unidad DEOXO), y el nitrógeno es eliminado utilizando el proceso de la destilación criogénica^[13].

Los equipos principales en la Unidad Purificadora de Argón son las siguientes:

- Columna de argón crudo CY0613.
- Condensador de argón crudo HX0562.
- Separador de oxígeno SP0650.
- Equipos de argón caliente (intercambiadores de calor, compresor DEOXO, secadoras, etc.).
- Columna de argón puro CY0620.



Leyenda :

- | | | |
|--|---|-------------------------------|
| 1.- Ingreso de argón crudo al 97,5% | 5.- Purga de ppm de nitrógeno e hidrógeno | 9.- Salida GAN de condensador |
| 2.- Ingreso de hidrógeno UHP | 6.- Producción de argón UHP 99,999% | |
| 3.- Ingreso de nitrógeno de regeneración | 7.- Ingreso de nitrógeno HP a reboiler | |
| 4.- Salida de nitrógeno de regeneración | 8.- Ingreso de nitrógeno HP a condensador | |

Punto	Porcentaje	Unidad	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Argón	97,00%	m ³ /h	135	-	-	-	-	135	-	-	-
Oxígeno	2,50%	m ³ /h	3,48	-	-	-	-	-	-	-	-
Nitrógeno	0,50%	m ³ /h	0,70	-	70	70	0,70	-	200	300	500
Hidrógeno	-	m ³ /h	-	21	-	-	2,94	-	-	-	-

MESSER
Messer Gases del Peru SA

SISTEMA DE DESTILACION DE AIRE

Elaborado: Ediño Muedas T

Figura 11. Balance de materia en Planta Purificadora de argón crudo

Flujo de gas argón crudo se extrae de la parte superior de la columna de argón crudo cuya composición es 96 – 97 % Ar, ~ 2,5 - 3,0 % O₂ y ~ 0 - 0,5 % de N₂, este flujo de argón crudo está a -184,9 °C y 35,85 kPa de presión. El flujo de argón crudo se calienta a la temperatura ambiente en el intercambiador HX0520 antes de ingresar a la etapa de oxidación.

El equipo de oxidación muchas veces es llamado equipo de calentamiento ya que el equipo se encuentra fuera de la caja fría y el proceso que se lleva a cabo es de calentamiento (no criogénico). El flujo de argón crudo ingresa al equipo de oxidación donde es comprimido en un compresor centrífugo de 35,85 kPa hasta 213,73 kPa aproximadamente, luego el argón comprimido ingresa a un separador SP0182 donde se separa la mayor cantidad de agua arrastrada como consecuencia del sello de agua del compresor, esta agua de sello separado es enfriado en un intercambiador de calor y luego reciclado de nuevo a la entrada del compresor.

El hidrógeno se inyecta al flujo de argón de alta presión, la mezcla de argón crudo presurizado e hidrógeno es alimentado al reactor de oxidación DEOXO HX0390, donde el oxígeno remanente y el hidrógeno reaccionan en presencia de un catalizador de óxido de aluminio/óxido de paladio para dar agua como producto.

Esta reacción es altamente exotérmica y genera temperaturas de alrededor de 400 °C; cuanto más oxígeno remanente haya en el argón crudo presurizado, más alta será la temperatura de oxidación en el reactor. El reactor de oxidación es operado con exceso de hidrógeno (aproximadamente 15 % de exceso) para asegurar que todo el oxígeno sea eliminado del flujo de argón

crudo, el flujo de argón caliente que sale del reactor de oxidación se enfría en un intercambiador HX0391 que usa aire del ambiente como medio refrigerante la cual lo enfría hasta 115°C; el flujo de argón es enfriado en un segundo intercambiador HX0392 que usa agua proveniente de la torre de enfriamiento como medio refrigerante, en este intercambiador se logra enfriar el argón crudo hasta 25 °C. El agua condensada es eliminada en otro separador SP0393. La pureza que se alcanza en este punto es el siguiente: 99,5 % - 100 % Ar, ≤ 5,0 ppm O₂ y 0 % - 0,5 % N₂.

Una parte del argón gas libre de oxígeno generalmente se recircula y vuelve a la línea de succión del compresor por dos razones:

- ✓ Diluir la concentración de oxígeno en el argón crudo, si esta fuese muy alto de tal manera que ingrese al reactor aproximadamente 2,5 % O₂ para que no se exceda la temperatura en el reactor DEOXO (máxima temperatura = 594 °C)
- ✓ Mantener un flujo constante de alimentación para el compresor.

El flujo de argón libre de oxígeno que no es recirculado, se seca en los adsorbedores AD0320A/AD0320B que poseen un tamiz molecular para eliminar el agua remanente del flujo de argón, se cuenta con dos unidades y el modo de trabajo es el siguiente: uno adsorbe a una presión de trabajo de 206,84 kPa mientras el otro regenera a baja presión usando gas nitrógeno en forma similar a la utilizada en la unidad de pre-purificación del aire. Tras la adsorción, el flujo de argón gas caliente es enfriado en un intercambiador de calor HX0323 que usa agua como medio

refrigerante, aquí el flujo de argón es enfriado hasta 27 °C. A la salida del intercambiador el flujo de argón se pasa por un filtro para eliminar las partículas de tamiz molecular que podrían pasar durante la adsorción.

El flujo de argón libre de oxígeno y humedad todavía contiene nitrógeno y una pequeña cantidad de hidrógeno proveniente del exceso en el reactor. Este flujo mencionado anteriormente es enfriado en el intercambiador HX0520 en contracorriente con el argón crudo frío proveniente de la columna de argón crudo. Luego de este enfriamiento se obtiene gas argón licuado parcialmente (-179 °C temperatura de salida del intercambiador); este flujo es alimentado al reboiler de la columna de argón puro CY0620 donde se enfría aún más. Este reboiler HX0525 usa nitrógeno gas a 18 °C proveniente de la columna de alta presión luego de pasar por los intercambiadores principales, es aquí donde se vaporiza la mayor cantidad de nitrógeno e hidrógeno presente en el argón líquido.

En la parte del tope de la columna de argón puro se ubica el condensador HX0526 cuya función es condensar el argón gas y dejar pasar el nitrógeno e hidrógeno vaporizados en el reboiler y ventados por la parte superior de la columna al medio ambiente. Este condensador usa nitrógeno líquido proveniente de la parte superior de la columna de alta presión (-174 °C) y condensa el nitrógeno proveniente de reboiler HX0525 para cumplir la función de condensar el argón gas en la columna de argón puro; el nitrógeno vaporizado que sale del condensador, se une a la línea de nitrógeno gas antes del ingreso al intercambiador N81 en la caja fría.

El producto de argón puro líquido se retira de la parte inferior de la columna de argón puro con una pureza aproximadamente de 99,999 % Ar, $\leq 5,0$ ppm O₂ y $\leq 5,0$ ppm N₂.

En la Tabla 8, se muestra el comportamiento de las purezas en el proceso de purificación del argón crudo.

Tabla 8. Comportamiento de pureza de argón

Etapa	Pureza de Ar	Pureza O ₂	Pureza N ₂
Enriquecimiento	5 - 8 %	92 - 95 %	0 - 500 ppm
Concentración	96 - 97 %	2,5 - 3,0 %	0 - 0,5 %
Combustión	99,5 - 99,999 %	$\leq 5,0$ ppm	0 - 0,5 %
Purificación	99,999 - 100 %	$\leq 5,0$ ppm	$\leq 5,0$ ppm

Fuente: Manual de entrenamiento Messer Gases.

Como se ha visto en este capítulo, es necesario el uso de hidrógeno para purificar el argón crudo proveniente de la columna de baja presión.

En los capítulos siguientes se desarrollarán los estudios necesarios para el montaje de una planta productora de gas hidrógeno

CAPITULO 4

ESTADO DEL ARTE DE LA ELECTRÓLISIS ALCALINA DEL AGUA Y SU CONTRIBUCIÓN EN ESTA TESIS

4.1. INTRODUCCIÓN.

La electrólisis del agua comenzó con la primera revolución industrial, en el año 1800, cuando Nicholson y Carlisle descubrieron la descomposición electrolítica del agua. Hacia 1902 estaban operativas más de 400 unidades electrolíticas y en 1939 se puso en funcionamiento la primera gran unidad con una capacidad de 10 000 Nm³H₂/h. En 1948 se puso en marcha el primer electrolizador presurizado por parte de Zdansky/Lonza. En 1966 General Electric construyó el primer electrolizador de polímeros sólidos y en 1972 se desarrolló el primer electrolizador de óxidos sólidos. Los primeros electrolizadores de polímeros sólidos se desarrollaron en 1978. Actualmente, se trabaja en la optimización de los electrolizadores alcalinos para disminuir el consumo específico, en la utilización de las membranas de intercambio de protones, tanto en electrolizadores como en pilas combustibles, y en la electrólisis a alta temperatura mediante el uso de la tecnología de óxidos sólidos^[15].

En las siguientes secciones se realizará una revisión bibliográfica abarcando distintos aspectos. Así, en la sección 4.2 se analizan los conceptos básicos de la electrólisis del agua y en la sección 4.3 se revisan los métodos de producción de hidrógeno basados en la electrólisis. En la sección 4.4 se analizan los electrodos utilizados en la electrólisis y en el 4.5 se presentan los principales fabricantes de electrolizadores a nivel mundial.

4.2. CONCEPTOS BÁSICOS EN LA ELECTRÓLISIS DEL AGUA.

4.2.1. INTRODUCCIÓN.

Los mecanismos y procesos que tienen lugar en reactores electroquímicos (como electrolizadores, pilas combustibles y baterías) son similares, y están regidos por los mismos fundamentos teóricos entre los que, básicamente, es preciso analizar: termodinámica del proceso, cinética de las reacciones que ocurren en los electrodos y análisis de los fenómenos de transporte.

El objetivo de esta sección es presentar desde un punto de vista termodinámico la teoría básica de la electrólisis y exponer los diversos fenómenos implicados.

4.2.2. PRINCIPIOS BÁSICOS DE LAS REACCIONES QUÍMICAS.

Una reacción química se produce siempre que un sistema no esté en equilibrio químico.

Para una reacción general del tipo:



Donde A, B, C, D representan los compuestos químicos y j, k, l y m los coeficientes estequiométrico de la ecuación, se define la constante de equilibrio K como:

$$K = \frac{(a_C^\dagger)^l (a_D^\dagger)^m}{(a_A^\dagger)^j (a_B^\dagger)^k} \quad (\text{Ec. 4.2})$$

Siendo a_i^\dagger la actividad del compuesto i implicado, calculada a partir de la concentración o de la presión (Zumdahl, 1995).

Para esta misma reacción general, la relación existente entre el potencial electroquímico y las actividades de las especies implicadas

vienen expresadas por la ley de Nernst, que para este caso adquiere la expresión.

$$E = E^{\circ} - (RT/zF) \left(\ln \left(\frac{(a_C^t)^l (a_D^t)^m}{(a_A^t)^j (a_B^t)^k} \right) \right) = E^{\circ} - (RT/zF) \ln K \quad (\text{Ec. 4.3})$$

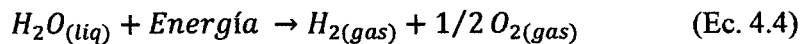
Puede deducirse que el potencial electroquímico depende de la constante de equilibrio K y que, acorde con el principio de Le Chatelier, la reacción en una celda electroquímica continuará hasta que se alcance el estado de equilibrio.

En la anterior expresión, E° representa el potencial electroquímico en condiciones estándar (298 K, 1 atm y una concentración de 1 M), F la constante de Faraday (96 485 C/mol), R la constante de los gases y z el número de electrones intercambiados (2).

4.2.2.1. Termodinámica de la electrólisis del agua.

La termodinámica^[4] suministra un marco adecuado para describir los equilibrios y efectos térmicos que se producen en reactores electroquímicos. Así mismo, proporcionan la definición de las fuerzas impulsora en los fenómenos de transportes y propiedades óptimas de las soluciones electrolíticas (Rousar, 1989).

La electrólisis del agua, en hidrógeno y oxígeno, viene dado por la reacción:



Para el análisis termodinámico de este proceso, pueden realizarse las siguientes simplificaciones:

- Hidrógeno y oxígeno se comportan como gases ideales.
- Se considera que el agua líquida es incomprensible.

➤ Las fases líquida y gas están completamente separadas.

Basado en estas simplificaciones, los cambios en la entalpía, entropía y energía libre de Gibbs de la reacción anterior pueden calcularse con referencia al hidrógeno, oxígeno y agua pura en condiciones normales de presión y temperatura (P_{ref} y T_{ref} respectivamente).

La variación de entalpía ΔH de la electrólisis del agua es la diferencia entre la entalpía de los productos de la reacción (H_2 y O_2) y de los reactantes (H_2O):

$$\Delta H = \Delta H_{H_2} + 1/2 \Delta H_{O_2} - \Delta H_{H_2O} \quad (\text{Ec. 4.5})$$

Donde:

$$\Delta H_x = C_{P,x}(T - T_{ref}) + H_{f,x}^0; x = H_2, O_2 \text{ y } H_2O \quad (\text{Ec. 4.6})$$

De igual modo, la variación de entropía vendrá expresada por:

$$\Delta S = \Delta S_{H_2} + 1/2 \Delta S_{O_2} - \Delta S_{H_2O} \quad (\text{Ec. 4.7})$$

Donde:

$$\Delta S_x = C_{P,x} \ln\left(\frac{T}{T_{ref}}\right) - R \ln\left(\frac{P}{P_{ref}}\right) + S_{f,x}^0; x = H_2 \text{ y } O_2 \quad (\text{Ec. 4.8})$$

$$\Delta S_{H_2O} = C_{P,H_2O} \ln\left(\frac{T}{T_{ref}}\right) + S_{f,H_2O}^0 \quad (\text{Ec. 4.9})$$

La variación de la energía libre de Gibbs, en función de la entalpía, entropía y temperatura absoluta, se expresa como:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (\text{Ec. 4.10})$$

En las anteriores expresiones:

$C_{p,x}$: Calor específico, $\text{JK}^{-1}\text{mol}^{-1}$
ΔH_x	: Variación de entalpía, Jmol^{-1}
$H_{f,x}^0$: Entalpía de formación, Jmol^{-1}
P	: Presión, bar
R	: Constante universal de los gases, $\text{JK}^{-1}\text{mol}^{-1}$
ΔS_x	: Variación de entropía, Jmol^{-1}
$S_{f,x}^0$: Entropía de formación, Jmol^{-1}
T	: Temperatura, K.

La variación de energía libre de Gibbs para la electrólisis del agua $\Delta G_{S,H_2O}^0$ a 25°C y 1 bar es de 237 kJmol^{-1} . Esto implica que esta reacción no es espontánea.

La reacción de formación de agua a partir del hidrógeno y oxígeno, como tiene lugar en una pila de combustible, ocurre con una variación de energía libre de Gibbs de -237 kJmol^{-1} por lo que la reacción tiene lugar espontáneamente.

Para un proceso electroquímico a presión y temperatura constante el trabajo máximo útil es igual a la variación de la energía libre de Gibbs. En una pila de combustible ideal todo el trabajo reversible es energía eléctrica, en este caso $W_{el} = \Delta G$

La energía total necesaria para producir la electrólisis del agua es equivalente a la variación de entalpía ($T\Delta S$). Para un proceso reversible este término representa el aporte de la energía térmica. La variación de entalpía para un proceso electrolítico en condiciones estándar es de $\Delta H_{S,H_2O}^0 = 286 \text{ kJmol}^{-1}$.

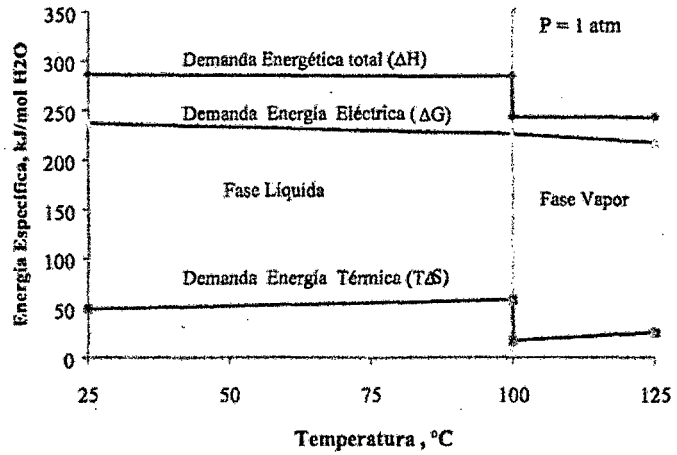


Figura 12. Termodinámica de la electrólisis del agua.

La figura 12, muestra la evolución de ΔH , ΔG y $T\Delta S$ para una temperatura comprendida entre 25 °C y 125 °C y a presión de 1 atm. Se ha representado la temperatura correspondiente al cambio de fase.

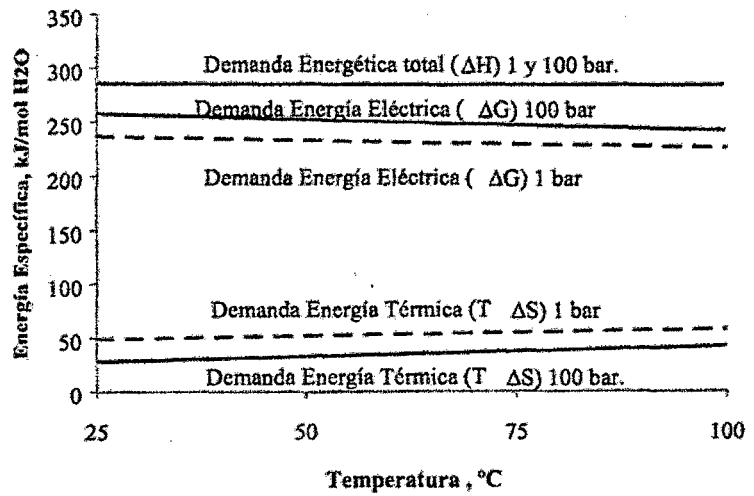


Figura 13. Influencia de la presión sobre parámetros termodinámicos de la electrólisis del agua.

En la figura 13, se muestra la influencia de la presión sobre ΔH , ΔG y $T\Delta S$ para el rango de temperaturas comprendido entre 25 °C y 100 °C. Se observa que, para el rango de temperaturas indicados, la energía total a suministrar al sistema no depende de la presión. Asimismo, al aumentar la presión, aumenta los requerimientos de energía eléctrica (exergía) del proceso.

4.2.2.2. Sobrevoltajes.

Las irreversibilidades de las reacciones electroquímicas que tiene lugar en el proceso electrolítico se pueden expresar en términos de sobrepotencial. Éste, viene determinada por la estructura y composición de la interface electrolito – electrodo (Rousar, 1989)^[15].

El comportamiento de un electrolizador está influenciado por la cinética de los electrodos, por la estructura física y geometría de la celda y por el tipo de electrolito utilizado. Estos factores se manifiestan como pérdidas de eficiencia. Aumentando el voltaje requerido respecto al teórico, y dan lugar a pérdidas por polarización, sobrepotencial o sobrevoltajes (Kordesch y Simader, 1996).

El voltaje a circuito abierto o voltaje de equilibrio de una celda electrolítica es el voltaje que puede medirse en bornes cuando trabaja en vacío. Este valor es mayor que el voltaje a circuito abierto calculado sobre la base de la termodinámica. Adicionalmente, el voltaje de la celda se incrementa respecto al voltaje a circuito abierto ($I = 0$) al aumentar la intensidad que circula entre ánodo y cátodo. Todo ello viene motivado por la existencia de unos sobrevoltajes, reflejo de las irreversibilidades existentes. Estas irreversibilidades se denominan:

- Sobrevoltaje de activación: es una pérdida motivada por el hecho de estar limitada la velocidad de transferencia de carga. La elección de un catalizador adecuado y el incremento de la temperatura de operación pueden disminuir el valor de este sobrevoltaje.
- Sobrevoltaje de concentración: es debido a las diferencias de voltajes que aparecen como consecuencia de procesos difusivos (gradiente de presión, cambios en la velocidad de difusión de líquidos y gases). El retraso en alcanzar condiciones estacionarias o bien, la ausencia de condiciones de equilibrio, son el origen de diferencias de concentración de electrolito. Otros parámetros que afectan a éste sobrevoltaje son la porosidad de los materiales (con influencia en el flujo de gases y líquidos) o la permeabilidad de las membranas (con influencia sobre el flujo iónico).
- Sobrevoltaje de reacción: viene motivado por los cambios de concentración existente en la interface electrolito – electrodo como consecuencia del consumo de reactivos de la misma.
- Sobrevoltaje de transferencia: es el sobrevoltaje V que se necesita para provocar que una corriente I fluya hacia o desde un electrodo. Viene expresado por la ecuación de Tafel (Electrochemistry Dictionary, 2003):

$$V = a + b \log(i) \quad (\text{Ec. 4.11})$$

Donde a y b son constantes determinadas experimentalmente e i es la intensidad de corriente que atraviesa el electrodo. Este sobrevoltaje es una medida

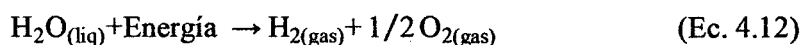
de la irreversibilidad de la reacción que tiene lugar en el electrodo.

- **Sobrevoltaje óhmico:** está directamente relacionado con la caída de voltaje producida al circular una intensidad a través de un medio con una determinada resistencia eléctrica. La resistencia óhmica de los electrodos y del electrolito muestra un comportamiento acorde con la ley de Ohm.

4.2.3. PRINCIPIOS DE OPERACIÓN DE UN ELECTROLIZADOR ALCALINO.

4.2.3.1. General.

El agua se puede descomponer en hidrógeno y oxígeno utilizando una corriente eléctrica (continua) entre dos electrodos separados por una solución acuosa de un electrolito con una conductividad iónica adecuada^[12] (Divisek, 1990). La reacción global es:



Para que esta reacción se produzca, se debe de aplicar un voltaje mínimo entre ánodo y cátodo. Este voltaje mínimo, que puede calcularse a partir de la variación de energía libre de Gibbs se denomina voltaje reversible.

El electrolito utilizado en la electrólisis puede ser ácido (electrolito de polímeros sólidos) o alcalino, solución de KOH. En la tabla 9, se muestran las reacciones anódicas y catódicas que tienen lugar en la electrólisis del agua en medio ácido y alcalino. En un electrolizador alcalino, como KOH, los iones K^+

y OH^- son los encargados del transporte iónico mientras que en uno ácido, el encargado de éste transporte es el ión H_3O^+ .

Tabla 9. Reacciones electroquímicas de la electrólisis del agua.

Electrolito	Reacciones Anódicas	Reacciones Catódicas
Alcalino	$2\text{OH}^-_{(aq)} \rightarrow 1/2\text{O}_{2(g)} + \text{H}_2\text{O}_{(l)} + 2e^-$	$2\text{H}_2\text{O}_{(l)} + 2e^- \rightarrow \text{H}_{2(g)} + 2\text{OH}^-_{(aq)}$
Ácido	$\text{H}_2\text{O}_{(l)} \rightarrow 1/2\text{O}_{2(g)} + 2\text{H}^+_{(aq)} + 2e^-$	$2\text{H}^+_{(aq)} + 2e^- \rightarrow \text{H}_{2(g)}$

Fuente: Aprovechamiento de recursos energéticos renovables –
Universidad de Sevilla.

La figura 14, muestra el principio de operación de un electrolizador alcalino. La reacción química en los electrodos tiene lugar en un entorno donde conviven tres fases: sólido, líquido y gas.

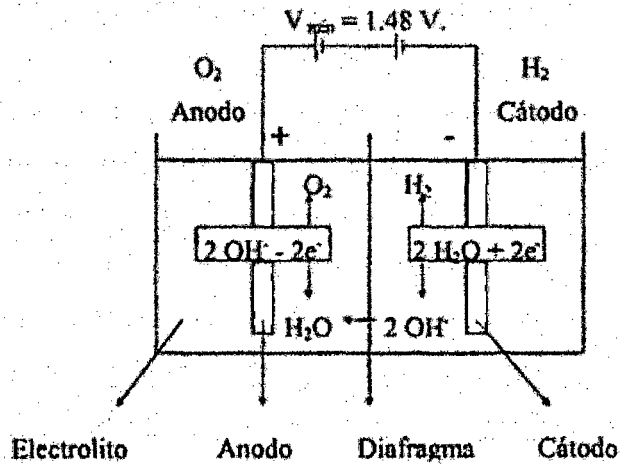


Figura 14. Esquema de funcionamiento de una celda electrolítica alcalina.

Los componentes principales de la celda son ánodo, cátodo y diafragma. Los electrodos deben ser resistentes a la corrosión,

deben tener buena conductividad eléctrica y adecuadas propiedades catalíticas así como buena integridad estructural. Por el contrario, el diafragma debe tener una resistividad eléctrica baja. Estos requisitos se logran utilizando ánodos de níquel, cobalto e hierro, cátodos de níquel activados catalíticamente con platino y diafragmas a base de óxidos de níquel (Mergel y Barthels, 1996).

4.2.3.2. Análisis energético de un electrolizador.

Un electrolizador alcalino bipolar consta de una serie de celdas conectadas eléctricamente en serie. Las características fundamentales que definen el comportamiento de una celda son: voltaje requerido entre ánodo y cátodo y flujo másico producido de hidrógeno y oxígeno.

4.2.3.2.1. Relación entre la energía libre de Gibbs y Voltaje de Celda.

Desde el punto de vista termodinámico, el trabajo eléctrico W_{el} necesario para provocar la electrólisis del agua, de modo reversible, coincide con la variación de energía libre de Gibbs ΔG ($\Delta G = W_{el}$). La fuerza electromotriz en bornas de la celda, V , está relacionada con W_{el} por la expresión $W_{el} = qV$ donde, q es la carga eléctrica transferida por un circuito externo a la celda. La ley de Faraday relaciona este trabajo eléctrico y la velocidad de conversión en términos de cantidades molares. La expresión de la ley de Faraday es:

$$W_{el} = \Delta G = qV = nFV \quad (\text{Ec. 4.13})$$

Donde:

n : Número de electrones transferidos en la electrólisis del agua (2).

V : Voltaje aplicado en bornas del electrolizador.

F : Constante de Faraday, $F = 96\,485 \text{ Cmol}^{-1}$.

La fuerza electromotriz para una reacción electroquímica reversible se denomina voltaje reversible. Este voltaje, en términos de la variación de energía libre de Gibbs puede expresarse como:

$$V_{rev} = \frac{\Delta G}{nF} \quad (\text{Ec. 4.14})$$

Igualmente, la variación de la entalpía se puede relacionarse con el voltaje, definiéndose el voltaje termoneutro por la expresión:

$$V_{tn} = \frac{\Delta H}{nF} \quad (\text{Ec. 4.15})$$

En condiciones estándar, $V_{rev} = 1,229 \text{ V}$ y $V_{tn} = 1,482 \text{ V}$. Estos voltajes cambian con la temperatura y la presión, del mismo modo en que cambian ΔG e ΔH (figura 12 y 13).

En la figura 15, se muestra la variación del voltaje reversible y termoneutro en función de la temperatura de las tres zonas susceptibles de representarse durante la electrólisis del agua:

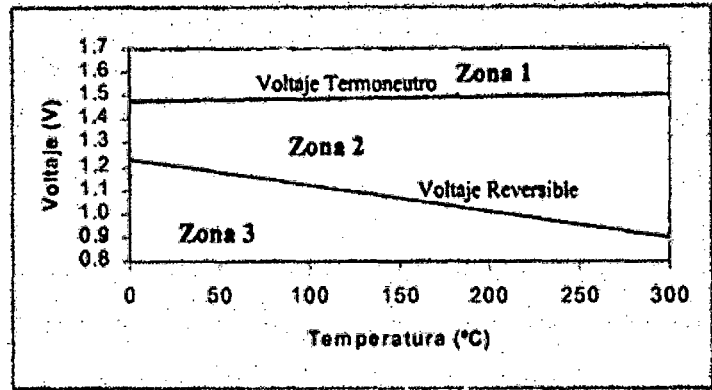


Figura 15. Dependencia del voltaje reversible y termoneutro con la temperatura.

Nos encontramos en la zona 1 cuando, a una determinada temperatura, aplicamos un voltaje superior al voltaje termoneutro para esa presión y temperatura. En esta región, se produce la electrólisis del agua y el exceso de energía aplicado, la diferencia entre el voltaje aplicado y el voltaje termoneutro, se degrada en forma de energía térmica que ha de ser evacuado por el sistema de refrigeración del electrolizador.

Cuando aplicamos un voltaje comprendido, para una presión y temperatura, entre el voltaje reversible y termoneutro (zona 2), se produce la electrólisis siempre que aportemos como energía térmica el producto de la diferencia entre el voltaje termoneutro y el voltaje aplicado y la intensidad que recorre el electrolizador.

Si se aplica un voltaje inferior al voltaje reversible (zona 3), la electrólisis del agua es imposible y la intensidad consumida por éste será nula.

4.2.3.2.2. Característica Intensidad – Voltaje.

La cinética existente en un electrodo se puede expresar utilizando las relaciones empíricas existentes entre Intensidad y Voltaje. Se han surgido diversos modelos (Griesshaber y Sick, 1991. Hug, 1992. Harve, 1995 y Vanhanen, 1996). Griesshaber y Sick propusieron una relación entre Voltaje e Intensidad, para una temperatura dada, en la forma:

$$V = V_{rev} + (r/A)I + s \log((t/A)I + 1) \quad (\text{Ec. 4.16})$$

Donde:

V : Voltaje aplicado en bornas (V).

V_{rev} : Voltaje reversible (V).

r : resistencia óhmica del electrolizador (Ω).

s,t : coeficientes experimentales representativos del sobrevoltaje de los electrodos.

A : Área del electrodo (m^2).

I : Intensidad a través de la celda (A).

La figura 16, muestra las curvas Intensidad – Voltaje de un electrolizador alcalino. Las diferencias entre las dos curvas presentadas se deben a la dependencia de los sobrevoltajes respecto a la temperatura. En la anterior expresión, la dependencia del sobrevoltaje respecto a la temperatura no queda reflejada

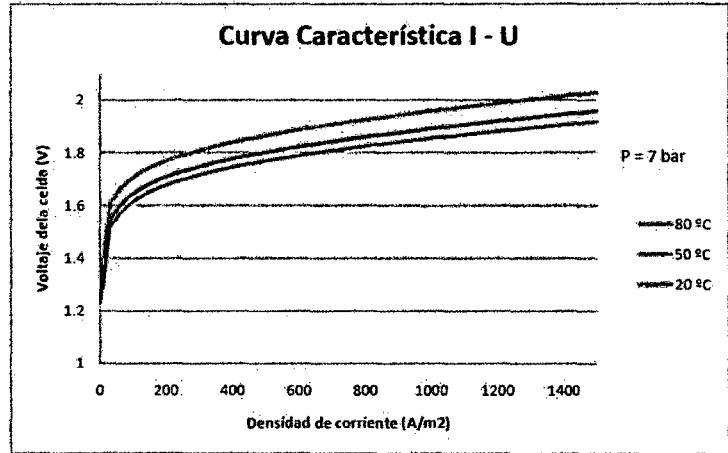


Figura 16. Curvas Intensidad – Voltaje de un electrolizador alcalino.

La siguiente expresión (Ulleberg, 1997) pone de manifiesto, explícitamente, la dependencia del sobrevoltaje respecto la temperatura:

$$V = V_{rev} + \left(\frac{r_1 + r_2 T}{A} \right) I + (S_1 + S_2 T + S_3 T^2) \log \left(\left(\frac{t_1 + t_2 / T + t_3 / T^2}{A} \right) I + 1 \right) \quad (\text{Ec. 4.17})$$

Los parámetros r_i , s_i y t_i se determinan experimentalmente utilizando técnicas de regresión lineal.

4.2.3.2.3. Eficiencia de Faraday (de carga).

De acuerdo con la ley de Faraday, la producción de hidrogeno de una celda electrolítica es directamente proporcional a la velocidad de transferencia de electrones en los electrodos, que a su vez depende de la intensidad de la corriente.

Se define la eficiencia de Faraday como el cociente entre la carga eléctrica que se ha utilizado en la generación de

hidrógeno (determinada a partir de la producción de hidrógeno y el equivalente electroquímico del hidrógeno) y la carga eléctrica total consumida en la celda electrolítica, determinada como la integral de $I dt$, durante el periodo considerado.

La producción de hidrógeno de un electrolizador bipolar, consta de un número n_c de celdas conectadas eléctricamente en serie, se puede expresar como:

$$m_{H_2} = n_F \left(\frac{n_c I}{n} \right) \quad (\text{Ec. 4.18})$$

Donde:

m_{H_2} : Producción de hidrógeno, mol s^{-1}

n_F : Eficiencia de Faraday.

n_c : Número de celdas conectadas en serie.

n : Número de electrones intercambiados, (2).

F : Constante de Faraday.

En este contexto, la eficiencia de Faraday anteriormente definida se puede redefinir como la relación existente entre la producción de hidrógeno real y la máxima cantidad susceptible de producirse en función de la intensidad consumida. La disminución en la eficiencia de Faraday viene motivada por la existencia de corrientes parásitas; por este motivo a la eficiencia de Faraday se le conoce también como eficiencia de corriente.

Porcentualmente, las corrientes parásitas se incrementan al disminuir la densidad de corriente (Hug y otros, 1992). Como se muestra en la figura 17, un aumento en la

temperatura del electrolito produce la disminución de la eficiencia de Faraday. La siguiente expresión evalúa la eficiencia de Faraday en función de la temperatura, el área de electrodos y la intensidad de corriente (Hug, 1992):

$$n_F = a_1 \exp\left(\frac{a_2 + a_3 T + a_4 T^2}{(I/A)} + \frac{a_5 + a_6 T + a_7 T^2}{(I/A)^2}\right)$$

(Ec. 4.19)

Donde:

n_F : Eficiencia de Faraday.

a_i : Parámetros experimentales ($i = 1, \dots, 7$).

A : Área de electrodo (m^2).

I : Intensidad (A).

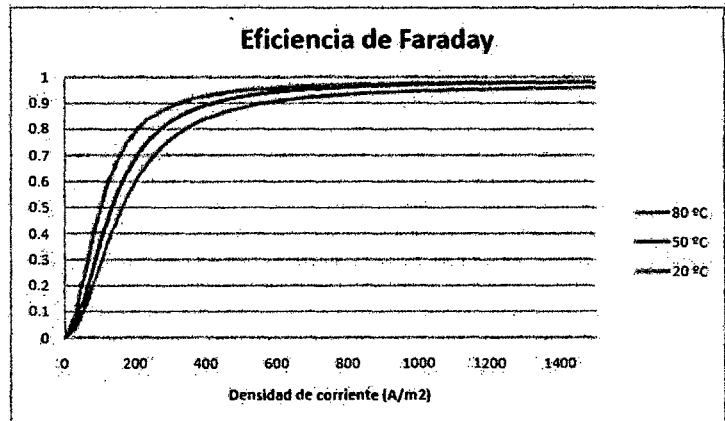


Figura 17. Influencia de la temperatura en la eficiencia de Faraday.

4.2.3.2.4. Eficiencia de Voltaje.

La eficiencia del voltaje se define como:

$$n_V = \frac{V_{tn}}{V} \quad (\text{Ec. 4.20})$$

Donde:

V_{tn} : Voltaje termoneutro.

V : Voltaje aplicado del electrolizador.

Un incremento en la producción de hidrógeno, aumentando la intensidad suministrada a la celda electrolítica, implica un aumento de sobrevoltaje (por aumento de caída óhmica), lo cual conduce a una disminución de la eficiencia de voltaje.

Desde un punto de vista práctico, es posible operar un electrolizador con eficiencia de voltaje superiores a 100%; si el electrolizador opera en la región 2 (véase la figura 15), con un voltaje inferior al voltaje termoneutro (lo cual es posible aportando energía térmica al sistema) la eficiencia de voltaje será superior al 100%.

En el caso de la electrólisis alcalina a baja temperatura, el voltaje aplicado es siempre superior al voltaje termoneutro, lo cual implica una eficiencia de voltaje inferior al 100% (siempre se trabaja en la zona 1 de la figura 15).

Independientemente del valor de la eficiencia de voltaje (mayor o menor que 1), el rendimiento energético de la electrólisis (definido en el siguiente apartado) es siempre inferior al 100%.

4.2.3.2.5. Rendimiento energético global.

Es la relación existente entre la variación de entalpía del proceso y la energía aportada al sistema por mol de hidrógeno.

$$n_e = \frac{\Delta H}{(\text{Energía eléctrica} + \text{Energía térmica})} \quad (\text{Ec. 4.21})$$

Donde la energía eléctrica y térmica son aplicadas al sistema. Si el único aporte energético al sistema es la energía eléctrica suministrada en bornas del electrolizador, la energía térmica aplicada al sistema sería cero, y la anterior expresión sería equivalente a:

$$n_e = n_F n_V \quad (\text{Ec. 4.22})$$

4.3. TECNOLOGÍAS DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO.

4.3.1. TECNOLOGIAS CONVENCIONALES DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO.

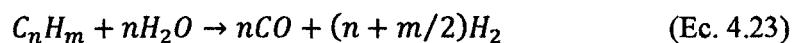
4.3.1.1. Reformado con vapor de gas natural.

Actualmente, el reformado de gas natural^[10] es el proceso más importante y el más comúnmente usado para la producción de hidrógeno. Es un proceso endotérmico y catalítico llevado a cabo en un rango de temperaturas de entre 970 K - 1100 K y una presión sobre los 3,5 MPa. Los catalizadores usados en este proceso son de níquel soportado. Respecto a las materias primas utilizadas, comúnmente los combustibles fósiles más apropiados son aquellos con una razón hidrógeno/oxígeno alta.

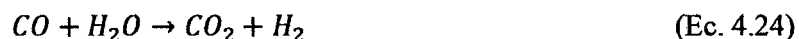
Generalmente, la principal materia prima utilizada es gas natural, de ahí el nombre que lleva este proceso, sin embargo, también pueden utilizarse alimentaciones de hidrocarburos pesados como el nafta. Una cantidad significativa del vapor producido no es requerido en el proceso por lo cual parte importante es llevado a producir energía eléctrica que puede ser utilizada en otras instalaciones del proceso, esto último, hace de las plantas de reformado de gas un proceso bastante eficiente.

El proceso se lleva a cabo en dos etapas:

Reformado:



Conversión (Shift reactor):



Una gran desventaja del proceso de reformado de gas natural es que la producción de hidrógeno está acompañada de grandes cantidades de emisiones de CO₂ a la atmósfera, esto debido a que el proceso libera este compuesto y además a que se requiere de combustibles fósiles para satisfacer los requerimientos energéticos del mismo proceso.

Este proceso requiere además de realizar la reformación del gas natural, una remoción de los altos contenidos de azufre y otras impurezas del combustible. Además, una vez realizada la reformación del gas se precisa de una limpieza del gas cuando los requerimientos de pureza del hidrógeno son altos.

En la figura 18, se muestra un diagrama de flujos de proceso de reformado de gas natural.

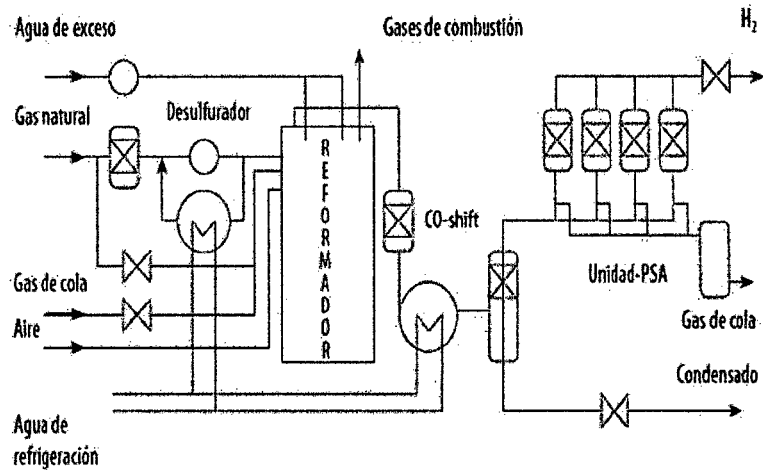


Figura 18. Esquema del proceso de reformado con vapor de agua.

4.3.1.2. Oxidación Parcial de hidrocarburos.

La oxidación parcial de hidrocarburos es una reacción exotérmica con oxígeno y vapor a presiones moderadamente altas. De acuerdo al tipo de alimentación de este proceso es que se utiliza o no catalizadores para llevarse a cabo. Es el segundo proceso en importancia para la producción de hidrógeno y requiere de cualquier tipo de combustible fósil tanto en estado líquido o gaseoso. Esta última característica lo hace adecuado para procesar alimentaciones con altos contenidos de azufre tales como petróleo residual y compuestos con alto peso molecular, los cuales no pueden ser tratados mediante reformado de gas.

La reacción básica de oxidación parcial de hidrocarburos pesados es la siguiente^[1]:



La reacción se verifica con oxígeno puro o con aire en presencia de catalizadores y transcurre a temperaturas superiores a 800 °C.

La elevada presencia de monóxido de carbono en el gas obtenido tiene el riesgo de la deposición de carbonilla, especialmente si la reacción ocurre a presión elevada, lo que es deseable para lograr reformadores más compactos. Esta carbonilla depositada sobre los catalizadores inhibe la continuación del proceso. El monóxido de carbono formado se puede eliminar oxidándolo para formar dióxido de carbono o bien desplazándolo con agua, de la misma forma que en el reformado con vapor de agua, para obtener más hidrógeno y nuevamente dióxido de carbono. La eficiencia del proceso es de alrededor del 70% en grandes producciones industriales.

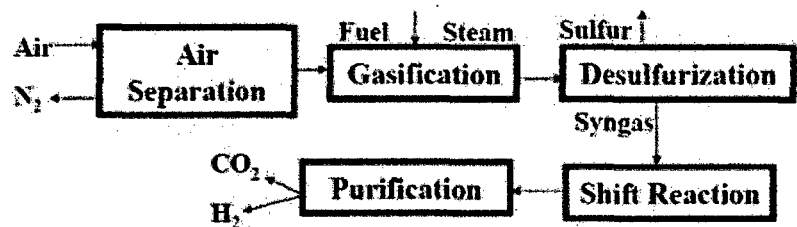
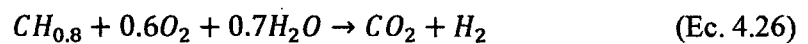


Figura 19. Diagrama de flujo de una planta de oxidación parcial de hidrocarburos.

4.3.1.3. Gasificación del carbón.

El proceso de gasificación de carbón es muy similar al de oxidación parcial de hidrocarburos pesados. La reacción básica es la siguiente:



El proceso de gasificación consiste en una combustión con defecto de oxígeno en la que se obtiene monóxido y dióxido de carbono, hidrógeno y metano, en proporciones diversas según la composición de la materia prima y las condiciones del proceso. El oxígeno se limita entre un 10 % y un 50 % del

estequiométrico y la temperatura oscila entre 700 °C y 1500 °C. La gasificación puede aplicarse tanto a la biomasa como al carbón.

Si la reacción se verifica con aire se obtiene un gas pobre. (Gas de gasógeno) que en el caso de proceder de carbón o coque contiene entre el 25 % y el 30 % de monóxido de carbono, entre el 65 % y el 70 % de nitrógeno y algo de oxígeno y de dióxido de carbono.

Para obtener hidrógeno sería necesario efectuar una reacción de desplazamiento sobre dicho gas. Por el contrario, si la reacción se verifica con oxígeno y vapor de agua se obtiene un gas de síntesis (formado por hidrógeno y monóxido de carbono) que puede ser empleado, además de para producir hidrógeno, para obtener combustibles líquidos como metanol y gasolina.

Por tanto, desde el punto de vista de la producción de hidrógeno interesan los procesos de gasificación con vapor de agua y oxígeno puro, ya sean a partir de carbón o de biomasa.

La siguiente figura^[10] recoge el esquema básico del proceso de gasificación. Una vez limpiado de compuestos de azufre y cenizas, el gas obtenido tras el proceso de gasificación se somete a una reacción de desplazamiento con lo que se llega a una mezcla de hidrógeno y dióxido de carbono. Éste último es separado para finalmente purificar el hidrógeno dejándolo con una concentración del 99,99 %.

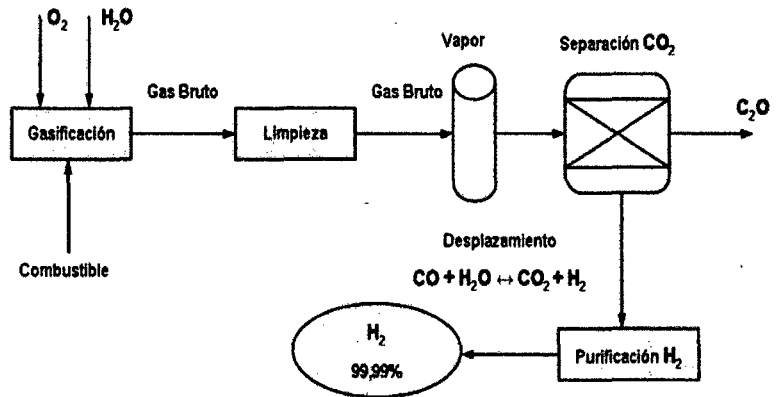


Figura 20. Diagrama de flujo de una planta de gasificación de carbón.

4.3.2. PRODUCCIÓN BIOTECNOLÓGICA DE HIDRÓGENO.

Existen diversos tipos de producción biotecnológica^[2] de hidrógeno, a continuación se hace un breve resumen de estos:

4.3.2.1. Gasificación de biomasa.

La biomasa es la totalidad de sustancias orgánicas de los seres vivos, ya sean animales o plantas. La constituyen elementos de la silvicultura, agricultura, excremento de animales, etc.

La gasificación de biomasa es el proceso análogo a la gasificación de carbón, se realiza cuando la humedad de ésta es menor al 20 %. Básicamente la única diferencia está dada por la materia prima.

Mediante la gasificación de biomasa se obtiene una corriente gaseosa de CO y H₂ que debe ser tratado en un reactor tubular (Shiff reactor) similar al del proceso de reformado de gas natural.

Las reacciones involucradas en éste proceso son las siguientes:



4.3.2.2. Fermentación anaeróbica de biomasa.

La fermentación anaeróbica de biomasa se realiza cuando la humedad de ésta supera el 30 %. El gas generado por bacterias que digieren la materia orgánica en ausencia de oxígeno, está compuesto principalmente por metano; este gas, producido a través de dichas bacterias puede ser transformado a hidrógeno mediante algún proceso de reformado de gas o bien vía oxidación parcial de hidrocarburos.

4.3.2.3. Fotoproducción de hidrógeno.

Existen diversos métodos de producción de hidrógeno mediante fotoproducción, los cuales se basan en la absorción de luz solar para producir energía en electricidad o bien almacenarla a través de un proceso endergónico.

Dentro de esta categoría existen los siguientes procesos:

➤ Procesos Fotoquímicos.

Se basan en una reacción de hidrólisis:



El agua pura es absorbida en el rango infrarrojo. Donde la energía de los fotones es insuficiente para producir la hidrólisis. Por lo cual se agrega alguna molécula o semiconductor capaz de absorber en otra región del espectro electromagnético para llevar a cabo la reacción.

➤ Procesos fotobiológicos.

Consiste en producir hidrógeno mediante algas o microorganismo que sean capaz de sintetizarlo, para esto es necesario inducir ciertas condiciones en el ambiente del microorganismo que permitan activar la vía metabólica de producción de hidrógeno. Como ejemplo las algas verdes son capaces de producirlo después de haber sido sometidas a condiciones de anaerobiosis y oscuridad, donde se induce la síntesis mediante activación de la hidrogenasa.

4.3.3. ELECTRÓLISIS.

Si bien el descubrimiento de la electrólisis del agua fue en medio ácido, las plantas industriales utilizan preferentemente la electrólisis en medio alcalina. Ello viene motivado por los problemas de corrosión que conlleva la electrólisis en medio ácido y por lo menores costos de inversión de la electrólisis alcalina^[9]. En las siguientes secciones se analizan otros métodos de producción de hidrógeno electrolítico, como la electrólisis de polímeros sólidos, la electrólisis de óxido sólido, etc.

4.3.3.1. Electrólisis alcalina.

El principio básico de funcionamiento de una celda alcalina se muestra esquemáticamente en la figura 21. En el comportamiento catódico, se reducen dos moléculas de agua en una de hidrógeno gas y dos iones hidroxilos. El hidrógeno generado abandona el compartimiento por la superficie del compartimiento catódico y el ión hidroxilo migra bajo la influencia del campo eléctrico entre cátodo y ánodo a través de la membrana porosa hacia el ánodo donde se disocia en una molécula de agua y media molécula de oxígeno. El oxígeno se

recombina en la superficie del compartimiento anódico y escapa del mismo en forma gaseosa.

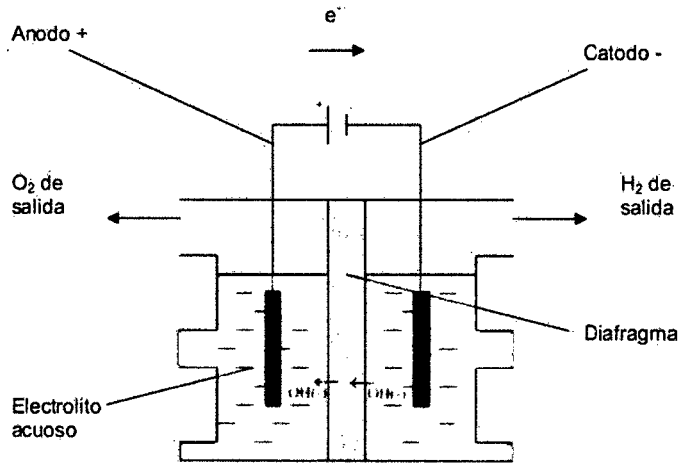
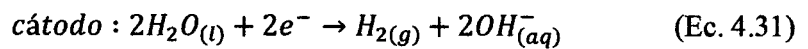
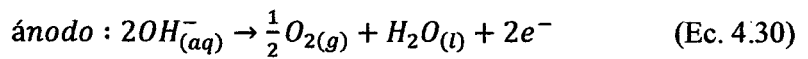


Figura 21. Esquema del funcionamiento de un electrolizador alcalino.

Las reacciones que se dan son las siguientes:



En una solución alcalina, los electrodos deben ser resistentes a la corrosión y deben tener excelentes conductividad eléctrica además de propiedades catalíticas. Por otra parte, el diafragma debe tener una baja resistencia eléctrica. Todas estas propiedades pueden ser alcanzadas utilizando ánodos de Níquel (Ni), Cobalto (Co) o Hierro (Fe) y cátodos de Níquel con platino promovido por carbón activado (Ni, C-Pt). El diafragma comúnmente es de óxido de Níquel (NiO).

Las condiciones de operación típicas de este tipo de electrolizadores varían generalmente entre los 70 °C - 100 °C. y 1 bar - 30 bar respectivamente.

Físicamente un electrolizador consiste en varias celdas ordenadas en serie. Existen dos diseños distintos para este tipo de electrolizadores:

- ✓ Electrolizador monopolar.
- ✓ Electrolizador bipolar.

En el diseño monopolar los electrodos, tanto negativo y positivo, están conectados eléctricamente en paralelo, mientras que en el diseño bipolar, los electrodos están conectados en serie tanto eléctrica como geométricamente. Una ventaja de los electrolizadores bipolares es que estos tienen un diseño más compacto, por lo que son convenientes en instalaciones industriales de gran envergadura. Otra ventaja de este diseño son los perfiles de corriente más pequeños en líneas de conducción y electrodos, dando a este diseño una resistencia menor en el electrolito, permitiendo una eficiencia mayor que en electrolizadores monopolares. Otro aspecto que diferencia ambos diseños son las presiones de operación, para procesos a presión atmosférica el diseño debe ser monopolar, mientras que el diseño bipolar permite trabajar a altas presiones, esta condición permite también un incremento de eficiencia ya que ésta depende de las presiones de operación. Una desventaja del diseño a altas presiones (que permite el diseño compacto) es la presencia de corrientes parásitas en los ductos de conducción de gases, por lo tanto se requiere de un diseño más avanzado en el sistema de control de este equipo de manera de asegurar una operación segura.

En los electrolizadores bipolares, el estanque contenedor de las celdas electrolíticas es encerrado por una cubierta de manera que el agua de proceso se encuentra rodeando las celdas, de este

modo, el agua es bombeada a presión dentro del electrolizador. Existen además mecanismos de recuperación del electrolito.

Se debe hacer hincapié en la condición de que estos electrolizadores deben ser alimentados con agua pura de manera de evitar la acumulación de sales en el dispositivo.

Las plantas actuales permiten una temperatura de operación de hasta 150 °C y una operación entre 5 bar y 30 bar. El cátodo de estas unidades suelen ser de níquel poroso y pueden operar con densidades de corriente hasta 10 kA/m² (tres veces más elevadas que las plantas alcalinas convencionales). En estas condiciones, la eficiencia energética obtenida es superior al 80%.

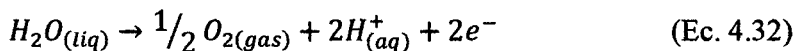
4.3.3.2. Electrólisis ácida.

Actualmente la electrólisis del agua en medio ácido se apoya en la utilización de membranas de intercambio de protones. Éstas, se basan en los desarrollos iniciados por General Electric en el campo de las pilas de combustibles y seguidos por ABB (anteriormente Brown Boveri Ltd) aplicadas a electrolizadores. Estos electrolizadores utilizan la tecnología de la membrana polimérica de intercambio de protones en estado sólido, lo cual, respecto a la electrólisis alcalina presentan las siguientes ventajas (Millet y otros, 1996):

- Mayor seguridad y fiabilidad al no existir un fluido en movimiento.
- Mayor pureza de los gases obtenidos.
- Mayor densidad de corriente.

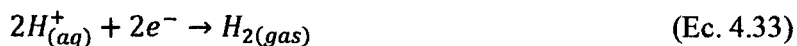
El ánodo de la celda electrolítica, al cual se aporta el agua de alimentación, está constituida de titanio poroso activado por un

catalizador de metales nobles. En el ánodo tiene lugar la reacción:



La membrana protónica conduce los iones hidroxilo desde el compartimento anódico hasta el catódico. La hidratación de la membrana presenta una resistencia óhmica pequeña, lo cual permite el establecimiento de densidades de corriente elevadas. El material normalmente utilizado para la construcción de la membrana es Nafión 117 fabricado por DuPont.

En el cátodo, formado por grafito poroso y platino (u óxidos metálicos) como catalizador, tiene lugar la reacción de recombinación de los protones para formar hidrógeno gaseoso.



El electrolizador está formado por el apilamiento en serie de celdas individuales (configuración bipolar) donde una celda se separa de otra mediante placas de grafito que permiten la conexión a los colectores para el aporte de agua y al evacuación de los gases.

Esta tecnología ha demostrado su madurez en las unidades comerciales de 100 kW de potencia instalada: Stellarm/ATEL (operativa desde 1987) y Solar Wasserstoff Bayern GmgH (1990-1996).

El primer electrolizador comercial de polímeros sólidos fue instalado en 1987 en Nyon, Suiza. El sistema se diseñó para la producción de 20 Nm³ de H₂/h a una presión de 2 bar. El electrolizador estaba constituido por 120 celdas con una superficie activa de 400 cm² por celda, agrupadas en 4 módulos

de 30 celdas y conectadas en serie. Las membranas estaban constituidas por Nafión 117. Una de las caras se recubrió de platino, mediante técnicas de electrodeposición, y se utilizó en el compartimiento catódico como catalizador. Antes de aplicar el catalizador, la membrana se hidrató a 130 °C durante 2 horas en agua tridestilada. Tras el enfriamiento de la misma, se trató durante 30 minutos en una solución 1M de HCl.

El catalizador utilizado en el ánodo fue un óxido de Ru/Ir aplicado sobre la superficie de un electrodo de titanio en forma de rejilla. El agua circula a través del colector anódico y el control de temperatura se realiza a la salida del ánodo.

Las condiciones de operación durante el arranque fueron: 400 amperios (10 kA/m^2) a 80 °C. El voltaje por celda en estas condiciones es de aproximadamente 7,75 V. La planta se operó con producción variable, conforme a las necesidades de hidrógeno para el proceso productivo, durante 15 000 horas antes de detenerse debido a la elevada concentración de hidrógeno en la corriente de oxígeno (3 %). Adicionalmente, se detectaron cortocircuitos entre los compartimientos anódicos y catódicos de diversas celdas, lo cual indicó fuga de gas a través de las membranas y problemas de seguridad asociados a los elevados contenidos de hidrógeno en la corriente de oxígeno.

El electrolizador se desmontó y se reemplazaron todas las membranas, parte de los electrodos y los colectores de corriente. La planta volvió a ponerse en funcionamiento por parte de la compañía de electricidad suiza ATEL en 1991. En esta versión se modificó la técnica de deposición del catalizado sobre el cátodo. La planta sigue operativa actualmente.

El diseño de la unidad del SWB se modificó ligeramente respecto la planta de Stellram. La diferencia más notable fue que el espesor de los platos bipolares de la celda se redujo. Las 120 celdas se montaron sobre un stack formando 3 módulos de 40 celdas cada uno. Se utilizó un sistema basado en muelles para permitir la expansión térmica. El catalizador utilizado en el cátodo fue el mismo que se utilizó en la planta ATEL (Stucki y otros, 1998).

4.3.3.3. Electrólisis en dispositivo de electrolito de membrana polimérica (PEM).

En electrolizadores de membrana^[14], se utiliza una membrana polimérica para el intercambio de protones entre los electrodos. Puede ser utilizada solo agua pura en estos electrolizadores la cual ingresa directamente sobre el ánodo del equipo, donde la molécula es separada en oxígeno y protones, estos últimos viajan a través de la membrana hacia el cátodo donde se produce hidrógeno. Este sistema sofisticado de electrólisis de agua permite altas densidades de corriente manteniendo altas eficiencias de producción y sería probablemente el mejor método para producir hidrógeno electroquímicamente si no fuera por el gran inconveniente que representa los altos costos de producción de la membrana polimérica. Otro aspecto de relevancia es la necesidad de utilizar metales nobles en los electrodos, lo que hace aún más costosa la inversión en estos equipos. Respecto a los costos de operación estos se ven incrementados debido a la sensibilidad de las membranas lo que influye en altos costos de mantención y dificultad de operación del equipo. No obstante, son importantes los grandes esfuerzos en investigación y desarrollo que existe actualmente en este tipo

de electrolizadores de manera de reducir las barreras tecnológicas y económicas mencionadas anteriormente.

4.3.3.4. **Electrólisis a alta temperatura (óxido sólido).**

Uno de los problemas asociados a la electrólisis a baja temperatura (ácida o básica) es el elevado consumo específico de energía eléctrica, en términos de $\text{kW}_{\text{eléctrico}}\text{h}/\text{Nm}^3\text{H}_2$ producido. La electrólisis a alta temperatura^[14] (en fase vapor) es una tecnología que permite obtener mayores eficiencias de voltaje en comparación con la electrólisis ácida y alcalina.

Desde un punto de vista termodinámico, la electrólisis del agua a alta temperatura (800 °C – 1000 °C) es más ventajosa que a baja temperatura, dado que, es posible el aporte combinado de energía eléctrica y térmica, siendo el aporte de energía térmica una fracción importante de la energía total aportada. Adicionalmente, el rendimiento global del sistema se mejora al disminuir pérdidas debidas a polarización de los electrodos.

En un electrolizador a alta temperatura, como es el caso del HOT ELLY, se obtienen rendimientos energéticos del orden del 92 % mientras que un electrolizador alcalino avanzado este valor es de un 85 %. El electrolito utilizado en la electrólisis a alta temperatura es óxido de zirconio, ZrO_2 , estabilizado con Y_2O_3 , MgO o CaO .

El fluido a electrolizar es vapor de agua a unos 200 °C, que tras calentarse en un dispositivo adecuado hasta 800 °C – 1000 °C entra en contacto con el cátodo donde se disocia en H_2 e iones O^{2-} , este ión migra a través del electrolito cerámico hasta el ánodo donde, tras ceder dos electrones se transforma en O_2 .

4.4. ELECTRODOS UTILIZADOS EN LA ELECTRÓLISIS DEL AGUA.

El material de los electrodos tiene una gran importancia ya que estos presentan un sobrepotencial alto debido a la resistencia del ánodo y del cátodo al paso de la corriente durante el proceso. A continuación se describen con cierta profundidad que materiales se están desarrollando para la construcción de electrodos, separadores, celdas, etc., con el objetivo de aumentar la eficiencia en la producción de hidrógeno.

4.4.1. MATERIALES UTILIZADOS COMO ÁNODOS Y CÁTODOS.

Los electrodos^[3] se encargan de conducir de manera conveniente la corriente eléctrica en el seno del electrolito para que se produzca correctamente el proceso de la electrólisis, el electrodo positivo se denomina ánodo y en su interface de separación con el electrolito se produce la semireacción de formación de oxígeno gaseoso y el electrodo negativo se denomina cátodo y en su interface de separación con el electrolito se produce la semireacción de formación de hidrógeno gaseoso.

Los requisitos que tienen que cumplir los electrodos son:

- ✓ Resistente a la corrosión.
- ✓ Buena conductividad.
- ✓ Buenas propiedades catalíticas.
- ✓ Integridad estructural.

El cátodo está usualmente fabricado en acero o acero - níquel; algunas veces las aleaciones Ru/Fe son también usadas. Para reducir el sobrevoltaje de interface electrodo - electrolito, la textura de la superficie puede ser activada y revestida con diversos catalizadores.

El ánodo y los electrodos de celda bipolares están normalmente hechos de níquel o acero recubierto en níquel. Junto al platino, que no puede usarse por razones económicas, este material tiene el sobrevoltaje mínimo. El cobalto y los ánodos de hierro también se usan actualmente.

La inhibición cinética de los procesos que tiene lugar en los electrodos puede ser reducida por el uso de catalizadores. Para ayudar la formación de oxígeno en el ánodo alguna vez son usados perovskitas (CaTiO_3), óxidos de cobalto - níquel y níquel Raney (catalizador sólido compuesto por níquel-aluminio).

El sobrevoltaje en el cátodo durante la evolución del hidrógeno puede ser disminuido por el uso de metales nobles (negro de platino). Los catalizadores comerciales, sin embargo, no suelen contener metales nobles. Por el contrario, normalmente se usan compuestos sinterizados, espumas de níquel, y compuestos de Ni, los cuales están estabilizados por la adición de TiO_2 , ZrO_2 , y MoO_3 . La estabilidad a largo plazo y la resistencia de corrosión ante soluciones alcalinas calientes son los problemas principales encontradas en el uso de electrocatalizadores, y el incremento de capacidad de las nuevas plantas electrolíticas demanda mejoras en este campo.

4.4.2. DIAFRAGMA O MEMBRANA.

Los requisitos que deben cumplir los diafragmas para su aplicación eficaz y segura en electrólisis alcalina son muy restrictivos. Deben mostrar suficiente resistencia mecánica y química, considerando las condiciones altamente alcalinas del electrolito utilizado (KOH - 30 % peso a 60°C). Además deben ser porosos y semipermeables, de modo que permitan el flujo del electrolito pero no el de los gases generados (H_2/O_2), es decir, deben mostrar alta presión de punto de burbuja para dichos gases. Los diafragmas deben ser hidrófilos, y mostrar baja

resistencia eléctrica y alta conductividad iónica. Lógicamente, los materiales que los constituyen deben ser preferiblemente respetuosos con el medioambiente. Puesto que la eficiencia de la electrólisis aumenta al aumentar la temperatura, es deseable asimismo que los diafragmas resistan las condiciones corrosivas del electrolito durante períodos largos de tiempo y preferiblemente a altas temperaturas (hasta 150°C). Los diafragmas en las unidades de electrólisis era inicialmente el amianto (asbesto). Las mallas de amianto, que separan los electrodos uno del otro, estaban reforzados con redes de níquel. Debido a los riesgos de salud involucrados con el uso del amianto, actualmente se usan ya materiales sustitutos, como los diafragmas de óxidos cerámicos basados en BaTiO₃, CaTiO₃, NiO y diafragmas microporosas de polisulfona.

4.5. ELECTROLIZADORES COMERCIALES ^[15].

La corrosión en medio ácido es más acusada que en medio alcalino. Este hecho, con clara incidencia en los costos de amortización de los sistemas, ha motivado que la mayoría de los sistemas electrolíticos de producción de hidrógeno sean del tipo alcalino. Cuando se precisa de hidrógeno a presión atmosférica se opta por electrolizadores unipolares, mientras que si se precisa de hidrógeno a presión (hasta 30 bar) se opta por configuraciones bipolares. Desde el punto de vista de la pureza, en un electrolizador alcalino se obtiene hidrógeno con una pureza de 99,8 % de H₂ en volumen, el resto es Oxígeno y vapor de agua. Si se precisa una pureza superior, la incorporación de una unidad de purificación adicional (secado y deoxo) permiten alcanzar una pureza de 99,999 % en volumen. A continuación, se presenta una recopilación de la información suministrada por los diversos fabricantes en sus páginas web y catálogos comerciales. Es preciso destacar que existe un margen considerable para la reducción de precios. Ello viene motivado por no existir una economía de escala real en éste campo dado que la mayoría de los fabricantes

venden sus sistemas a medida, impidiendo esto, una producción en serie que tendría una repercusión clara sobre el precio final^[6].

La relación de fabricantes que se investigaron fueron los siguientes:

4.5.1. Casale Chemicals S.A. (&Metkon–Alyzer).

Casale Chemicals S.A. es una empresa suiza radicada en Lugano, suministradora de electrolizadores bipolares en el rango 0,5 Nm³/h – 100 Nm³/h de H₂. El diseño de los equipos permite una operación bajo presión hasta 30 bar y una pureza de 99,8 % de H₂ en volumen que, tras un proceso de purificación, puede alcanzar 99,999 % en volumen. El diseño y construcción de los equipos ha superado las normas de seguridad de diversos organismos certificadores y es el único equipo asegurado por Lloyds para su operación en plataformas de perforación petrolíferas marinas. El diseño de los electrolizadores fue de Metkon-Alyzer, compañía que fue finalmente absorbida por Casale Chemicals S.A. Sus equipos se han utilizado en diversas experiencias de acoplamiento de sistemas de producción de hidrógeno a fuentes de energías renovables.

Recientemente han desarrollados nuevos electrolizadores, especialmente indicados para la producción intermitente que permiten incrementar la eficiencia del stack en un 15 %. A modo indicativo, el costo de una unidad de 10 Nm³/h de H₂ con una pureza de 99,8 % de volumen y 10 bar es de unos 190 000 Euros.

4.5.2. Erre Due.

La compañía italiana Erre Due es fabricante de equipos electrolíticos que sacrifica aspectos de seguridad a cambio de ofertar equipos a bajo precio. El consumo específico de sus unidades es de unos 6 kWh/Nm³ de H₂ producido y la pureza standard de 99,7 % de

volumen. La presión habitual de sus equipos es de 6 bar, aunque, bajo pedido, puede llegar a 10 bar.

El costo de una unidad de 20 Nm³/h de H₂ a 6 bar es de unos 100 000 Euros. En comparación con otros fabricantes, la diferencia en precio viene motivada por la ausencia de diversos equipos y sensores que redundan en la seguridad del sistema.

4.5.3. Gesellschaft fur Hochleistungs elektrolyseure zur Wasserstoff.

GHW mbH fue fundada por Linde AG, MTU-Friedrichshafen y HEW (Hamburgische Electricitäts - Werke AG). Su electrolizador es del tipo bipolar, a una presión de hasta 30 bar y el stack se encuentra en el interior de un recipiente a presión que soporta la presión del sistema, rodeado del agua de aporte al electrolizador. La temperatura de operación puede alcanzar los 150 °C y la eficiencia energética es del 80 % con densidades de corriente de 10 kA/m². La compañía está desarrollando actualmente electrolizadores con una potencia comprendida entre 500 kW y 2 MW.

Su único electrolizador en servicio es uno de 100 kW operativo en el aeropuerto de Múnich. El electrolizador opera con una solución de KOH al 40 % en peso a 130 °C y 30 bar. La temperatura del sistema permanece constante utilizando un intercambiador de calor entre el electrolito y agua de refrigeración. Inicialmente el intercambiador fue construido en níquel, pero debido a los problemas de corrosión en el lado del agua, se sustituyó el níquel por acero con un 25 % de níquel. En el recipiente a presión se utilizó un recubrimiento interno de níquel y Monel (2.4360) para válvulas y tuberías.

4.5.4. Giovanola Freres.

Esta firma suiza construye electrolizadores no presurizados con tecnología Bamag, con capacidades comprendidas entre 3 Nm³/h y

330 Nm³/h de H₂. El consumo de energía específica es de 4,8 kWh/Nm³ de H₂ con una pureza de 99,9 % en volumen de H₂.

4.5.5. Hydrogen Systems.

Hydrogen Systems N.V. es una empresa belga diseñadora y fabricante de electrolizadores en el rango 1 Nm³/h a 60 Nm³/h de H₂. La presión de operación es de 10 bar (máximo) y el consumo de energía específica de 4,2 kWh/Nm³ de H₂, que asciende hasta 4,8 kWh/Nm³ de H₂ si se considera el consumo energético en la planta de ósmosis inversa que acondiciona el agua de alimentación al electrolizador. Actualmente desarrollan un electrolizador capaz de operar a 30 bar.

Los requerimientos de agua de refrigeración son de 50 l/Nm³ de H₂ a una temperatura máxima de 15 °C. El costo de una unidad de 10 Nm³/h de H₂ operando a 10 bar es de 130 000 Euros y una unidad purificadora que aumente la pureza del hidrógeno obtenido hasta 99,999 % en volumen es de 35 000 Euros. Un aumento en la presión de operación desde 10 bar hasta 25 bar supone un aumento de coste de un 20%.

4.5.6. Linde.

Linde AG comercializa electrolizadores en el rango 0,04 Nm³/h - 20 Nm³/h de H₂. La presión de operación máxima es de 4 bar y el consumo específico de 4,8 kWh/Nm³ de H₂. Para una pureza de 99,9 % de volumen.

4.5.7. Norsk Hydro.

Norcs Hydro es una compañía noruega con más de 170 electrolizadores operativos por todo el mundo. Su capacidad oscila entre los 10 Nm³/h y los 60 Nm³/h de H₂. Bajo demanda, suministran

electrolizadores con una presión de salida de hasta 30 bar. El consumo de energía específico es de unos 4,8 kWh/Nm³ de H₂ con una pureza de hidrógeno de 99,8 %. El coste de una unidad de 10 Nm³/h de H₂ es de 260 000 Euros.

4.5.8. PIEL.

Es una compañía italiana, perteneciente a ILT Technology, fabricante de electrolizadores alcalinos con características similares a Erre Due, e igualmente a precios bajos.

4.5.9. Stuart Energy.

Stuart Energy es una empresa canadiense fundada en 1948 centrada en la fabricación de electrolizadores para procesos donde la calidad y pureza del hidrógeno utilizado es vital para la calidad del producto final como fibra óptica y circuitos integrados. El rango de producción de sus electrolizadores está comprendido entre 1 Nm³/h y más de 1 000 Nm³/h de H₂.

4.5.10. Teledyne Energy Systems.

Teledyne Energy Systems, división de Teledyne Brown Engineering Inc, radicada en Estados Unidos, construye electrolizadores alcalinos con capacidades comprendidas entre unos pocos litros a la hora y 150 Nm³/h de H₂. La presión de suministro standard es de 7 bar, pero pueden operar hasta 15 bar. La pureza es de 99,7 %, pero la utilización de la unidad de purificación permite obtener H₂ con una pureza del 99,9998 % en volumen. El consumo de energía específico es de 6,1 kWh/Nm³ de H₂ producido. El precio de un electrolizador de 11,2 Nm³/h de H₂ a 7 bar de presión y pureza del 99,999 % es de US\$ 150 000.

CAPITULO 5

EQUIPOS Y METODOLOGÍA A SEGUIR PARA EL DISEÑO DEL PROYECTO.

5.1. DETERMINACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS Y COMPONENTES PRINCIPALES PARA LA PRODUCCIÓN DE ARGÓN CRUDO.

Los componentes del sistema son los siguientes:

5.1.1. Intercambiador de calor de argón crudo.

El objetivo de este intercambiador de calor es calentar el argón crudo proveniente de la columna de argón crudo y el enfriamiento del argón libre de oxígeno para la destilación final en la columna de argón puro, este intercambiador es de placa de aluminio soldada con aletas.

5.1.2. Compresor de argón.

Este compresor es del tipo centrífugo de marca Nash de 56 kW de potencia y requiere la inyección de agua como sello en la entrada del compresor. Aumenta la presión del flujo de argón crudo para la purificación final.

5.1.3. Separador.

Este equipo tiene la finalidad de separar el agua arrastrada como consecuencia del sello de agua del compresor; es recomendable mantener un cierto nivel en el separador ya que esto es utilizado como sello del equipo.

5.1.4. Reactor DEOXO.

El reactor de oxidación es un dispositivo cilíndrico de acero inoxidable relleno con un óxido de aluminio/paladio utilizado como catalizador. En este reactor el oxígeno remanente del argón crudo es reaccionado con el hidrógeno para producir agua, esta reacción es exotérmica, por lo que genera temperaturas muy altas. El contenido de oxígeno debe ser cuidadosamente controlado para evitar el sobrecalentamiento del tanque reactor más allá de la máxima temperatura (594°C), este equipo debe estar completamente aislado para evitar quemaduras o accidentes por explosión.

5.1.5. Intercambiador de calor refrigerado por aire.

El argón refrigerado por aire más fresco está diseñado para enfriar el argón caliente que abandona el reactor DEOXO. El intercambiador de calor es un tubo largo con aletas para incrementar el área de contacto.

5.1.6. Intercambiador de calor refrigerado por agua.

Este equipo está diseñado para enfriar la salida del argón refrigerado por aire fresco, este es un intercambiador tipo tubo-coraza que condensa la mayor cantidad de agua que luego será separada del argón en un separador SP0393.

5.1.7. Secador de argón.

El objetivo del secador de argón es eliminar el agua del argón crudo libre de oxígeno, antes de alimentarlo a la caja fría, ya que esta podría congelarse en el intercambiador de la caja fría provocando taponamiento parcial o total. Se hace uso de dos unidades de adsorbentes llenos de un tamiz molecular, un juego de 12 válvulas selenoides se encargan de las aperturas de los ciclos

correspondientes. En el caso que el tamiz molecular pudiera ser arrastrado por el flujo de argón, esta se separa en un filtro ubicado a la salida de las secadoras.

5.1.8. Intercambiador externo de argón.

El objetivo de este intercambiador es eliminar el calor de adsorción del flujo de argón libre de oxígeno antes de ingresar a la caja fría. Este intercambiador es del tipo tubo-coraza y usa agua como media de refrigeración.

5.1.9. Reboiler de argón puro.

El reboiler de la columna de argón puro es un tubo con aleta de aluminio soldada tipo intercambiador de calor. El tanque que contiene el reboiler actúa como un separador para eliminar el exceso de hidrógeno y nitrógeno por volatilidades. El nivel de argón puro en el tanque se controla a un nivel especificado para el correcto funcionamiento del reboiler.

5.1.10. Columna de argón puro.

Esta es una columna de destilación que toma un flujo que contiene argón y trazas de nitrógeno e hidrógeno, siendo la finalidad la purificación del argón líquido como producto. El argón se condensa en la parte superior de la columna en contra del punto de ebullición del nitrógeno, este condensador es un tubo con aleta de aluminio soldado tipo intercambiador de calor y se ubican dentro de un tanque. Es importante mantener el nivel de nitrógeno en el tanque que contiene el condensador de tal manera que condense en su totalidad el argón puro.

5.1.11. Caja fría.

La caja fría es de un material al de acero al carbono en el que el frío de todos los equipos de procesos y tuberías se mantiene, el propósito de la caja fría es mantener a todos en la refrigeración y aislarlos del calor del medio ambiente. Para lograr esta tarea, la caja se reviste de un aislamiento de alto rendimiento tal como es la lana de vidrio, con este material de aislamiento se llenan todos los espacios vacíos dentro de la caja fría. La caja fría está pintada de color blanco para reflejar la luz solar.

5.2. ELABORACION DE FICHAS TECNICAS DE LOS EQUIPOS Y COMPONENTES PRINCIPALES.

Messer Gases del Perú cuenta actualmente con equipos para la producción de argón líquido UHP que fueron instalados durante el montaje de planta ASU. Para el funcionamiento de la planta productora de argón UHP se han realizado algunas modificaciones en la ubicación de los equipos y el direccionamiento de las tuberías; adicionalmente se ha realizado la compra de algunos instrumentos complementarios para el funcionamiento de algunos equipos (válvulas de control, válvulas de seguridad, instrumentos locales de medición, etc.).

Para realizar el monitoreo del proceso en línea y como producto terminado, se ha realizado la compra de analizadores de trazas de oxígeno, nitrógeno y humedad.

En la tabla 10 se muestra la relación de equipos para la producción de argón UHP en planta APU así como los equipos para el envasado del argón gas en cilindros para su posterior distribución.

5.3. PRUEBAS REALIZADAS PARA LA OBTENCIÓN DE ARGÓN CRUDO.

Se realizaron pruebas para lograr la estabilidad del argón crudo de acuerdo al siguiente procedimiento.

- Abrimos la válvula selenoide SV-202-1, cuando el analizador AE-0613 mide 93 % O₂; este valor de concentración nos garantiza que el resto del porcentaje es argón.
- Abrimos la válvula HIC-59 al 50% de tal manera que se elimine las impureza que hayan en la columna de argón crudo (estas impurezas pueden ser trazas de nitrógeno).
- Abrimos la válvula LIC-3 al 30 % y LIC-1 al 33 % para iniciar la estabilidad del argón crudo, teniendo en cuenta que estas aperturas quedarán fijadas cuando se alcance valor estables en las variables de proceso (Nivel estable de argón licuado y liquido enriquecido en el intercambiador HX0562 y presión en la columna de argón crudo CY0613).
- Luego de lograr la estabilidad del argón crudo en los valores: LIC-1 (PV ~ 10%), LIC-3 (PV ~ 45%) y una presión en la columna de argón crudo PT16 (PV~ 6,5 Psi); se procede a conectar la toma al analizador AE-0520 para monitorear la purificación del argón crudo hasta llegar a obtener concentraciones de 97 - 98% Ar (2,0 – 3,0 % O₂).

A continuación se muestran las pantallas de la pruebas realizada en una Planta de destilación criogénica de gases del aire – Messer Gases del Perú.

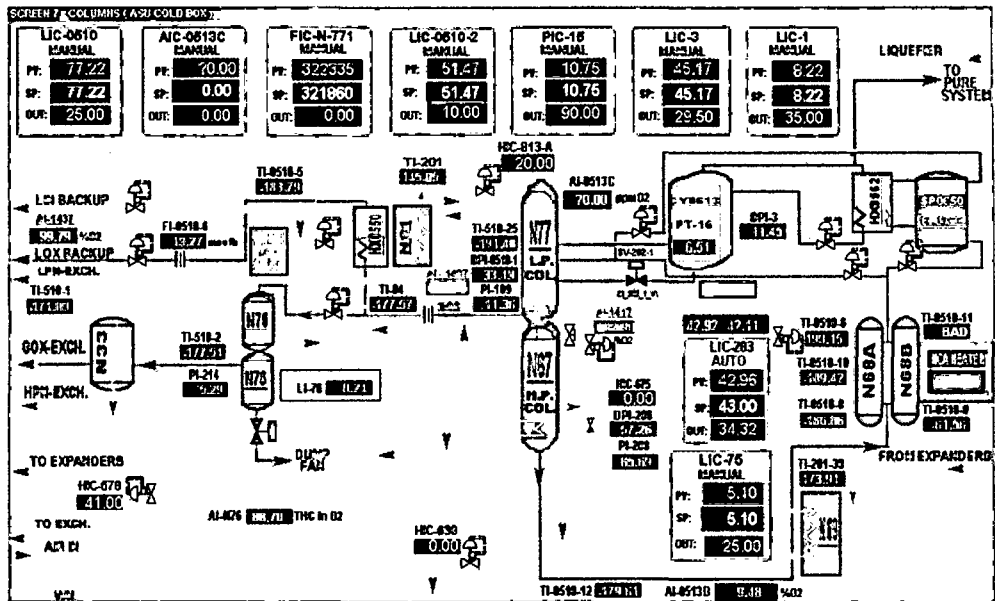


Figura 22. Pantalla de estabilidad de columna para lograr producir argón crudo al 95%.

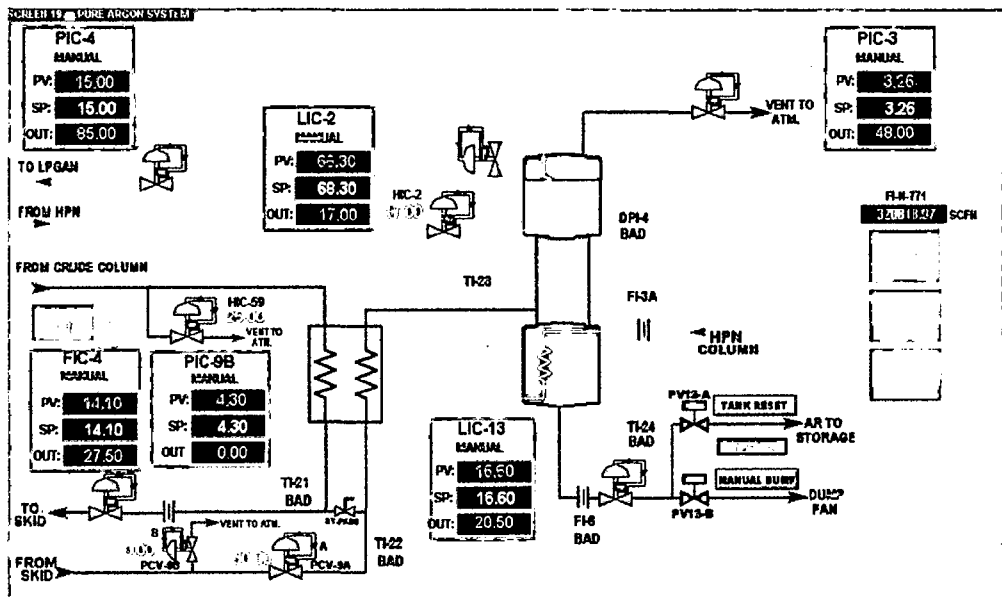


Figura 23. Pantalla de analizador AE-0520 que mide la pureza del argón crudo.

A continuación se muestra la tabla 11 donde se registran los parámetros de las pruebas realizadas para la obtención de la estabilidad del argón crudo. En dicha tabla se muestra las aperturas de las válvulas de control (OUT), variable de proceso (PV) y purezas de la alimentación cruda y del argón crudo (% O₂).

Tabla 11. Pruebas realizadas para la estabilidad del argón crudo.

Fecha	Hora	Alimentación cruda	Pureza de LOX	Out válvula argón líquido	Nivel de argón líquido	Out de aire enriquecido	Nivel de aire enriquecido	Presión en columna LAR crudo	Pureza de LAR concentrado
-	-	AE-0613	AE-1407	LIC-3 OUT	LIC-3 PV	LIC-1 OUT	LIC-1 PV	PT-16	AE-0520
-	-	% O ₂	% O ₂	%	%	%	%	Psi	% O ₂
09/01/2012	00:20	96,60	99,20	-	-	-	-	-	-
	00:23	96,40	99,20	28,50	0,30	32,00	0,70	10,20	-
	00:25	96,40	99,22	28,50	15,10	32,00	0,80	9,10	-
	00:27	96,40	99,22	28,50	21,00	32,00	1,20	8,70	-
	00:29	83,00	99,26	28,50	28,30	32,00	1,10	8,30	-
	00:31	83,00	99,30	28,50	33,00	33,00	1,30	8,10	-
	00:34	83,00	99,32	28,50	36,30	33,00	1,10	7,50	-
	00:38	83,00	99,32	29,00	40,20	34,00	1,30	7,00	-
	00:42	83,00	99,33	29,40	42,40	34,00	1,50	7,00	-
	00:51	83,00	99,34	29,60	42,60	35,00	2,10	6,90	-
	00:56	86,80	99,36	30,20	43,10	35,00	3,10	6,90	-
	01:33	92,60	99,40	30,20	44,40	36,00	3,80	6,90	-
	02:15	92,80	99,44	30,50	44,50	35,70	4,80	6,70	-
	02:35	93,10	99,47	30,30	44,90	36,50	6,10	6,70	6,50
	02:45	92,90	99,50	30,30	44,00	36,50	4,10	6,60	6,00
	03:00	93,10	99,53	30,00	44,50	36,00	5,50	6,50	4,00
	03:30	92,90	99,56	30,00	44,40	33,00	7,70	6,70	3,10
	03:50	92,30	99,60	29,50	42,70	32,00	8,60	6,90	2,50
04:15	92,40	99,62	30,00	43,80	33,00	8,00	6,50	2,30	

Fuente: Datos de Operación Messer Gases.

5.4. OBTENCIÓN DE HIDRÓGENO ESTÁNDAR PARA PRUEBAS DE PURIFICACIÓN DE ARGÓN CRUDO.

Luego de concentrar el argón crudo hasta lograr 97 – 98 % Ar (2,0 – 3,0 % O₂) se tiene que eliminar el contenido de oxígeno presente para lograr obtener argón UHP, para ellos se necesita hidrógeno UHP.

La empresa logró comprar hidrógeno estándar 99,90 % de pureza de una empresa ubicada en la ciudad de Lima y con ello se realizaron las pruebas para observar el performance de todo el sistema purificador de argón crudo.

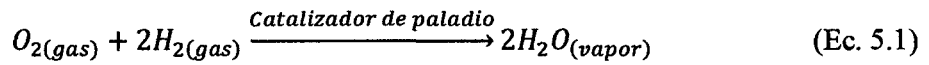
Las características de dicha empresa son los siguientes:

- ✓ Empresa : OLVICSA (Oleaginoso Victoria S.A).
- ✓ Producto : 99,90 % ± 0,1 % de pureza – base seca.
- ✓ Presión : 138 bar.
- ✓ Presentación : Buffer.
- ✓ Cantidad : 2 000 m³.
- ✓ Precio : US\$ 4.00 por metro cúbico + IGV.

5.5. CÁLCULOS DE REQUERIMIENTO DE HIDRÓGENO.

Como el argón crudo tiene un 5,0 % que en su mayor proporción es oxígeno, la forma de eliminar este porcentaje es inyectado hidrógeno en un reactor de oxo activado con un catalizador de paladio, la reacción del hidrógeno con el oxígeno da como resultado vapor de agua, siendo esta una impureza más fácil de eliminar.

Las reacciones y los cálculos de requerimiento para purificar el argón crudo se dan a continuación:



Los requerimientos de hidrógeno son los siguientes:

Tabla 12. Requerimiento de hidrógeno para purificación de argón crudo.

PARÁMETRO	VALOR	UNIDADES
Flujo másico de argón crudo	250	kg/h
Concentración de argón crudo	95	%
Número de moles de oxígeno	411,18	mol/h
Número de moles de hidrógeno	822,37	mol/h
Flujo másico de hidrógeno	1,64	kg/h
Densidad de hidrógeno	0,09	kg/Nm ³
Flujo volumétrico de hidrógeno UHP	18,30	Nm ³ /h
Flujo volumétrico de hidrógeno STD	18,31	Nm ³ /h
Flujo de H ₂ con exceso del 14%	20,88	Nm ³ /h

Fuente: Elaboración propia.

5.6. PROCEDIMIENTO PARA LA PURIFICACIÓN DE ARGÓN CRUDO EN PLANTA ASU.

Actualmente Messer Gases del Perú produce gases industriales por destilación criogénica de gases del aire (oxígeno y nitrógeno), debido a la gran demanda del argón, se realiza este proyecto para la purificación del argón crudo que produce la planta criogénica, esta purificación se consigue inyectando hidrógeno para reducir al máximo las impurezas de oxígeno presente en el argón crudo, a continuación se describe el procedimiento para llevar a cabo dicha purificación del argón crudo.

ESTABILIZACIÓN DE LA PLANTA.

1. Arrancar la planta de acuerdo a la secuencia de arranque de equipos ya conocidas en Planta ASU Messer.
2. Durante el proceso de arranque de planta, debe establecerse que desde el inicio el flujo de GOX debe ser regulado en el flujo normal de operación, es decir aproximadamente 8 414 m³/h (320 000 scfh), sea que se vaya a producir LOX o LIN.
3. Del mismo modo, la temperatura de salida del expansor en operación debe regularse de -170 °C a -173 °C, con el fin de maximizar producción de líquidos y maximizar producción de LAR.
4. Solo si es que se desea optimizar la producción de LAR a costa de la producción de LOX/LIN (confirmada por la Gerencia de Operaciones) el punto 3 será modificado de la siguiente manera:

La temperatura de salida del expansor en operación debe regularse a -150 °C aproximadamente, esto se logra ajustando las siguientes válvulas HIC-678 = 0 % y HIC-39 A/B = 40 %, con el fin de maximizar la producción de LAR.

5. El sistema de ambas columnas debe ser estabilizada previamente al inicio de producción de Argón Crudo, y esto significa:
 - El inicio de producción de LAR crudo debe realizarse cuando se tenga una pureza de 99,0 % de oxígeno en el Reboiler aproximadamente. Esto nos garantiza una concentración rápida del Argón crudo, una vez iniciada la producción.
 - Nivel de columna de alta presión en 43 %.
 - Nivel de columna de baja presión en 73%.

Este nivel será alcanzado dependiendo de algunos factores como: nivel de Reboiler antes de la parada de planta y pérdidas en el sistema.

Se recomienda inyectar LOX cuando haya transcurrido como máximo 1,5 horas desde el arranque, y se tiene la pureza de LOX recomendada para el inicio de producción de Argón crudo, y aún no se tiene el nivel recomendado de LOX en el Reboiler.

- El turno que para la planta debe tener media hora antes de la parada un nivel de 80% en el Reboiler y 43 % en la columna HP, estables, para facilitar el arranque de planta.

PRODUCCIÓN DE ARGÓN CRUDO.

6. Una vez cumplido con las condiciones recomendadas se inicia la producción de LAR crudo de acuerdo a lo indicado en el capítulo 5.3.
7. Se debe proceder a concentrar el Argón crudo, considerando los siguientes parámetros de operación estable del sistema de Argón Crudo
 - Nivel en vaporizador de aire líquido (LIC-1) = 8 – 10 %.
 - Nivel en condensador de LAR crudo (LIC-3) = 41 - 44 %.
8. Cuando se tenga estabilidad de estos parámetros debemos proceder a dar el ajuste fino, si es necesario al flujo de GOX, con la finalidad de mantener una concentración de 92 % - 93 % de oxígeno en la alimentación cruda. Esto permitirá acelerar la concentración de argón crudo.

9. Como recomendación, se debe proceder a calibrar luego del arranque el analizador AE-0520 de la columna de Argón. Para asegurarse de tener una lectura correcta.
10. El punto final de la etapa de concentración de Argón crudo será cuando se tenga una concentración de oxígeno en el Argón de 2,3 – 2,1 %.
11. Debe indicarse que cuando se tenga que producir LIN, el flujo será ajustado recién cuando se inicie la extracción de LIN. El flujo recomendado de GOX es de 10 518 m³/h (400 000 scfh). Este podrá ser ajustado un poco más o menos dependiendo básicamente de lo indicado en el punto 7.

DESOXIGENACION DEL ARGÓN CRUDO Y ENFRIAMIENTO DE LA COLUMNA DE ARGÓN PURO.

12. El sistema DEOXO debe arrancarse cuando se tenga un máximo de 2,3 % de oxígeno en el LAR Crudo.
13. En el momento del arranque del compresor DEOXO debe iniciarse el proceso de enfriamiento de la columna de Argón puro, previa purga del sistema antes de ingresar el argón a la columna de LAR puro. Esta primera etapa de enfriamiento se va a realizar simplemente por intercambio de calor en el intercambiador HX0520 de alimentación a dicha columna.
14. Una vez alcanzado aproximadamente los -100 °C en el ingreso a la columna de LAR puro, se puede proceder a enfriarla usando LIN de la columna HP, mediante las válvulas LIC-2 y HIC-2. La válvula PIC-4 debe regularse para mantener presiones de alrededor de 103 – 110 kPa, presiones menores significan temperaturas más frías en el condensador de la columna de LAR Puro, que pueden provocar congelamiento de argón y licuación de nitrógeno. En este

mismo momento puede iniciarse la inyección de hidrógeno con la finalidad de avanzar en paralelo el proceso de purificación y enfriamiento.

15. Siempre debe mantenerse el porcentaje de O₂ en el Argón crudo entre 2,1 y 2,3%, el mantenernos dentro de este rango de valores nos posibilitará manejar flujos de 139 m³/h (equivalente a una señal de 15.0 mA) hacia el sistema DEOXO, y con proyección de aumentar el flujo, dependiendo del porcentaje de O₂. Cuanto más bajo sea este porcentaje más flujo se podrá procesar en el sistema DEOXO. Alta porcentaje de oxígeno y alto flujo producen lo siguiente: Altas temperaturas en el reactor con riesgo de parada, altos niveles de humedad y altos consumos de hidrogeno. Este porcentaje debe controlarse como es conocido reduciendo la admisión al sistema DEOXO, o si es necesario con la apertura de la válvula HIC-59.
16. Si se produjese una elevación del porcentaje de O₂ debe procederse a reducir el flujo al DEOXO, para disminuir este porcentaje, y cuando ya nos encontremos en los valores recomendados se procederá a normalizar el flujo progresivamente. Este porcentaje depende directamente de la cantidad extraída de la columna de Argón crudo, y del porcentaje de oxígeno en la alimentación cruda, es por ello la importancia de mantener controlados estos valores.
17. Se considera que el sistema DEOXO está estable cuando se ha logrado controlar el flujo de modo que el porcentaje de oxígeno se mantenga entre 2,1 - 2,3 % O₂.
18. Se considera que el sistema de LAR puro se encuentra estabilizado cuando se tenga las siguientes condiciones:
 - Diferencial de presión en la columna de LAR Puro mayor a 35 in H₂O (DPI-4),

- Nivel en el Reboiler HX0525 de LAR en 25 % aproximadamente,
- Temperatura de admisión menor a -170 °C.
- Nivel de LIN en condensador HX0526 de LAR entre 60 - 70 %.
- Presión de LIN en condensador HX0526 entre 103 - 110 kPa.

19. La producción de LAR a tanques debe iniciarse cuando se tenga una impureza de oxígeno en el argón puro de 20 ppm como máximo en el inicio, y no mayor a 5 ppm en plena operación.

Las siguientes figuras muestran las pantallas de control de proceso para las pruebas realizadas para la purificación de argón crudo haciendo uso de hidrógeno STD.

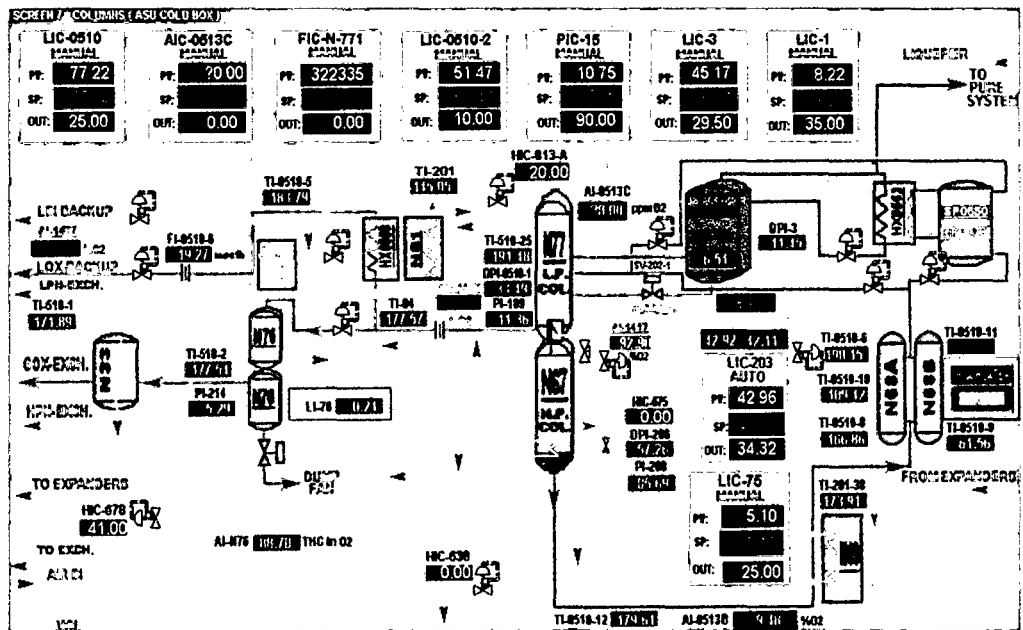


Figura 24. Pantalla de estabilidad de columna de argón crudo.

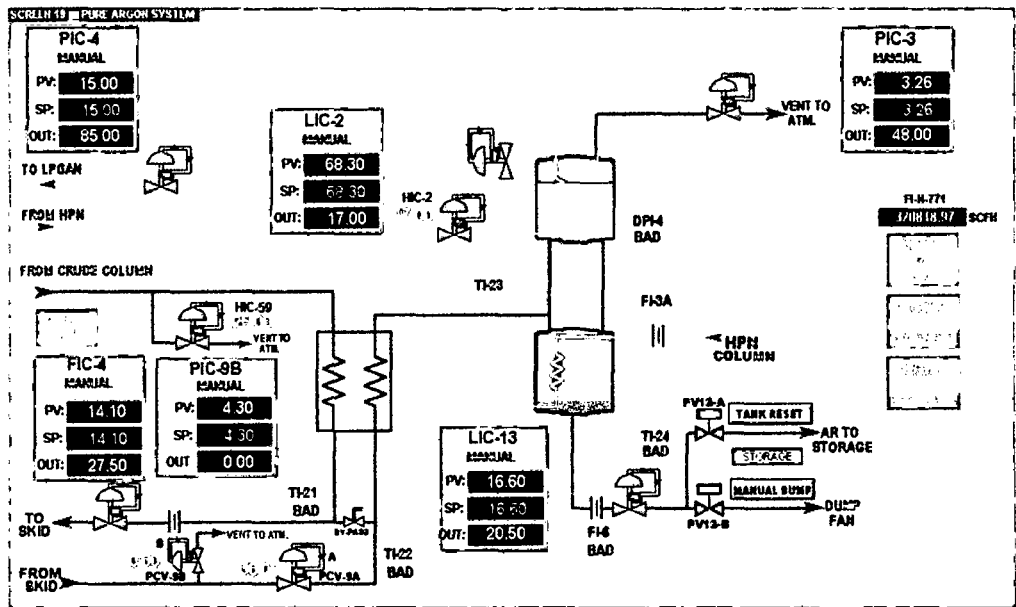


Figura 25. Pantalla de estabilidad de columna de argón puro

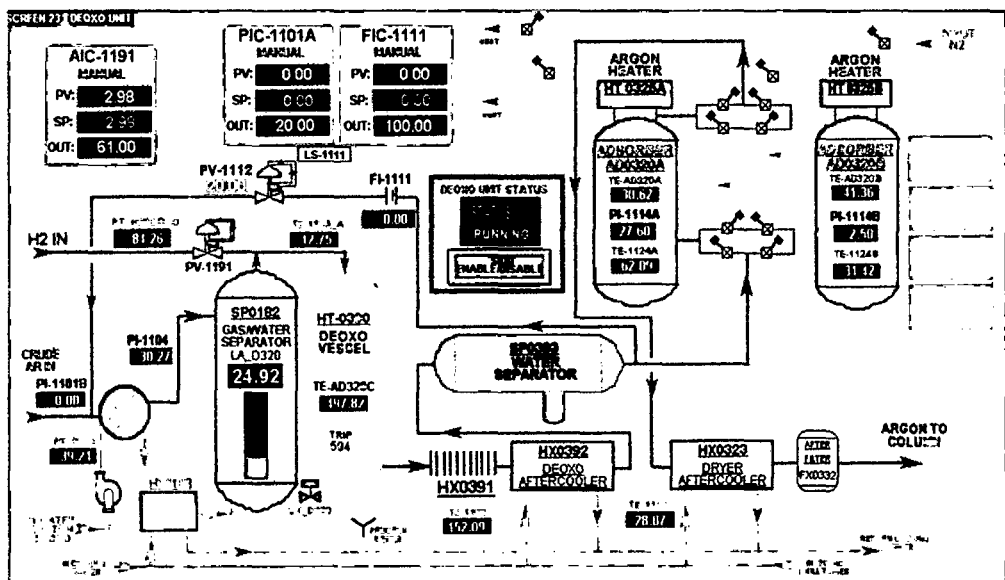


Figura 26. Pantalla de desoxigenación de argón crudo en reactor DEOXO.

5.7. RESULTADOS Y EVALUACIÓN DE PRUEBAS REALIZADAS CON HIDRÓGENO ESTÁNDAR.

Las pruebas realizadas con hidrogeno estándar 99,90 % de pureza obtenidas de la Empresa OLVICSA, se llevan a cabo durante los meses de febrero y marzo del 2012.

La tabla 13 muestra las variables del proceso para la purificación del argón crudo, esta tabla contiene parámetros de presión, temperatura, nivel y pureza, dichos tags se podrán observar en la figura 25 y 26.

La tabla 14 muestra la producción diaria del argón UHP así como el consumo de hidrógeno para lograr la purificación del argón crudo.

Tabla 13. Pruebas realizadas para la purificación de argón crudo.

Fecha	Hora	AE-0520	FIC-4	PI-1104	LA_D320	PT_HEDEOXO	AIC-1191	TE-AD320C	TE-1109	TE-1110	AD0320A/B	TI-23	LIC-2	LIC-13	AI-0207	AI-0525A	AI-1130
-	-	% O2	Mscfh	Psi	%	Psi	% H2	°C	°C	°C	A/B	°C	%	%	ppm O2	ppm N2	ppm H2O (°C)
01/02/2012	04:10	2,50	0,00	0,00	0,00	56,60	0,00	188,90	19,00	20,90	B	-5,80	35,20	0,00	-	-	-
	04:12	2,50	6,20	4,40	18,00	59,50	8,40	193,10	19,20	19,90	B	-6,40	35,00	0,00	-	-	-
	04:14	2,40	8,16	29,80	35,10	31,80	1,40	211,90	23,40	18,80	B	-33,50	39,20	0,00	-	-	-
	04:16	2,40	8,16	33,30	28,50	83,50	1,10	240,10	29,30	18,30	B	-55,00	39,50	0,00	-	-	-
	04:18	2,40	8,16	34,30	21,70	83,50	3,10	277,00	44,30	17,80	B	-79,40	53,50	0,00	-	-	-
	04:24	2,40	8,16	31,70	24,90	83,40	3,30	242,30	66,60	17,50	B	-115,30	50,40	0,00	-	110,8	-78,10
	04:28	2,30	8,16	29,30	25,10	83,40	3,30	284,50	72,70	18,40	B	-130,40	47,50	0,00	-	80,2	-78,10
	04:36	2,30	8,16	31,50	26,20	83,30	3,30	459,80	98,90	20,50	B	-147,10	45,60	0,00	-	44,60	-78,10
	04:40	2,30	8,16	32,10	25,00	83,20	3,10	468,00	116,30	21,00	B	-151,30	46,20	0,00	65,7	38,5	-78,10
	04:44	2,30	8,16	31,80	25,00	83,20	3,10	468,50	130,50	21,70	B	-156,00	47,80	0,00	54,6	26,80	-78,30
	04:48	2,20	8,16	31,60	25,10	83,30	3,20	473,50	138,40	21,50	B	-159,50	54,60	0,00	45,00	18,50	-78,10
	04:52	2,20	8,16	31,80	25,20	83,20	3,20	478,60	147,00	21,40	B	-162,20	60,30	0,00	30,00	12,60	-77,80
	05:05	2,20	8,16	32,30	25,10	83,20	3,40	472,30	159,70	21,80	B	-167,30	56,10	0,00	16,00	7,50	-77,80
	05:10	2,20	8,16	32,30	25,10	83,20	3,40	470,30	162,60	21,90	B	-168,50	57,80	0,00	9,00	4,60	-78,70
	05:15	2,20	8,39	32,50	25,00	83,30	3,30	469,00	164,60	22,00	B	-169,50	59,50	0,00	8,00	3,90	-78,30
	05:20	2,20	8,39	32,40	25,20	83,30	3,40	468,00	165,60	22,20	B	-170,50	61,40	5,90	5,80	2,70	-78,20
	05:30	2,20	8,39	32,20	25,00	83,40	3,50	468,40	165,40	22,20	B	-171,80	64,60	6,60	4,80	1,60	-77,00
	05:40	2,20	8,39	32,70	25,00	83,30	3,40	468,60	166,70	22,40	B	-173,10	68,70	9,70	4,20	1,00	-77,30
	05:50	2,20	8,39	32,30	25,10	83,30	3,40	469,20	166,30	22,60	B	-174,00	70,00	14,20	3,20	1,00	-75,50
	06:00	2,20	8,39	32,30	25,10	83,30	3,40	472,00	168,80	22,70	B	-174,60	72,30	21,20	2,50	1,00	-75,70
06:30	2,20	8,39	32,60	25,10	83,00	3,30	471,30	165,10	23,00	A	-176,00	78,30	36,50	1,10	1,00	-76,20	

Fuente: Datos de operación Planta APU Messer Gases.

Tabla 14. Pruebas realizadas para la producción de argón UHP - Febrero 2012

Día	Fecha	Lote	Horas Prod. Ar	Prod. Diaria Argón (kg)	Prod. Total de Argón x lote (kg)	Ratio de producción kg/h	Consumo de H2 x día Nm3	Ratio de Consumo de H2 Nm3/h	Consumo de H2. Nm3 x kg de Ar.	Observaciones
MIE	1	1	12,0	2800	20900,000	233	236,5	20	0,084	
JUE	2		17,5	4100		234	408,9	23	0,100	
VIE	3		24,0	5800		242	471,6	20	0,081	
SÁB	4		17,5	4200		240	307,4	18	0,073	
DOM	5		12,0	2800		233	259,3	22	0,093	
LUN	6		5,0	1200		240	147,6	30	0,123	Parada de Planta
MAR	7	2	12,0	2900	25600,000	242	269,8	22	0,093	
MIE	8		12,0	2900		242	275,8	23	0,095	
JUE	9		17,5	4100		234	395,4	23	0,096	
VIE	10		24,0	5800		242	451,5	19	0,078	
SÁB	11		17,5	4200		240	341,1	19	0,081	
DOM	12		12,0	2800		233	253,9	21	0,091	
LUN	13		12,0	2900		242	268,9	22	0,093	
MAR	14	3	12,0	2900	25100,000	242	264,9	22	0,091	
MIE	15		12,0	2800		233	263,9	22	0,094	
JUE	16		17,5	4100		234	392,4	22	0,096	
VIE	17		24,0	5800		242	466,3	19	0,080	
SÁB	18		16,5	3900		236	328,6	20	0,084	
DOM	19		12,0	2800		233	279,7	23	0,100	
LUN	20		12,0	2800		233	268,5	22	0,096	
MAR	21	4	12,0	2900	28100,000	242	237,4	20	0,082	
MIE	22		12,0	2800		233	242,9	20	0,087	
JUE	23		17,0	4200		247	384,0	23	0,091	
VIE	24		24	5800		242	463,6	19	0,080	
SÁB	25		17,5	4300		246	343,2	20	0,080	
DOM	26		0,0	0		0	0,0	0	0,000	Parada de Planta
LUN	27		10,5	2500		238	274,6	26	0,110	
MAR	28		11,5	2800		243	274,0	24	0,098	
MIE	29		12,0	2800		233	276,0	23	0,099	
			417,5	99700,0		238,8	8847,7	21,2	0,089	

Fuente: Datos de producción Messer Gases.

CAPITULO 6

SELECCIÓN, MONTAJE E INSTALACIÓN DE PLANTA PRODUCTORA DE HIDRÓGENO UHP.

6.1. TIPO DE PLANTA.

Se ha estudiado la factibilidad de instalar una planta de producción de hidrógeno UHP por el método de electrólisis alcalina del agua, es decir por descomposición de las moléculas del agua para obtener hidrógeno al 99,9 % de pureza luego este hidrógeno es enviado a un sistema de purificación para lograr obtener hidrógeno UHP.

6.2. UBICACIÓN.

Dependiendo de la complejidad de la planta, algunos factores deben ser considerados para que el equipo refleje las características deseadas de seguridad. Esos factores, como el ciclo del proceso, condiciones climatológicas, tamaño de planta, construcciones cercanas, productos producidos, si la producción es gas o líquido, almacenaje, requerimientos de recepción y envío; todo esto influye el diseño de la planta.

- ✓ La planta debe ser instalada en fundaciones firmes.
- ✓ Se debe tomar en consideración los efectos de polvo y sustancias corrosivas en el ambiente.

Tomando en cuenta los factores de la ubicación, se seleccionó un terreno en la ciudad de Chimbote (instalaciones de Siderperú), que presenta las siguientes características:

- ✓ Plano, 100 % aprovechable.
- ✓ Área de 15 m de frente por 13 m de fondo.

- ✓ Acceso 100 % seguro.
- ✓ Líneas telefónicas.
- ✓ 13,8 kV de energía como suministro.
- ✓ Instalaciones de agua potable.

6.3. SEGURIDAD DE LA PLANTA.

Los siguientes factores de seguridad afectan directamente el diseño de la planta y deben ser considerados:

- ✓ El acceso al equipo e instalaciones de la planta debe ser de manera que las operaciones de mantenimiento se puedan realizar en forma segura.
- ✓ Protecciones al personal, como barandas deben ser consideradas para ubicaciones elevadas para prevenir caídas.
- ✓ Se deben evitar zonas con difícil acceso para los trabajadores y las unidades de transporte.

6.4. TAMAÑO DE LA PLANTA.

Para el cálculo del requerimiento mínimo de planta, se consideró los dos modos de operación en planta ASU para la producción de argón UHP (modo start/stop y operación continua), estos cálculos son mencionados en el capítulo 5.5 de esta tesis.

Para el modo start/stop se requiere 100 000 m³ anuales de hidrógeno para purificar y producir 645 000 m³ anuales de argón UHP, con estos cálculos el requerimiento de la planta será de 20,88 m³/h de hidrógeno UHP.

El en caso de operación continua el requerimiento es de 180 000 m³ anuales de hidrógeno para purificar y producir 1 162 330 m³ anuales de argón UHP.

6.5. ESPECIFICACIONES DE LA PLANTA.

Se contactó a varias empresas estadounidenses, alemanas e italianas fabricantes de equipos para la producción de hidrógeno UHP por electrólisis alcalina del agua, y se seleccionó a la empresa Teledyne Energy Systems, por las siguientes ventajas.

- ✓ Planta pre-ensamblada en un contenedor.
- ✓ Menor tiempo requerido para iniciar operaciones.
- ✓ Menor tiempo de espera desde que se coloca la orden hasta que se envía el equipo.
- ✓ Componentes de la Planta con agencias en Venezuela y Colombia, lo que garantiza un suministro de repuestos en plaza.

6.6. CAPACIDAD DE LA PLANTA.

La operación de la Planta es de lunes a domingo, con dos turnos de operación de 12 horas cada uno. Asumiendo que la Planta de hidrógeno no para durante la operación start/stop el volumen de producción de hidrógeno sería de 180 000 m³ anuales (considerando que la planta vende hidrógeno al mismo ratio cuando no consume para purificación de argón crudo).

La capacidad máxima de la Planta de producción de hidrógeno es de 42 m³/h lo que proporcionaría una producción máxima anual de 367 000 m³.

6.7. RECONOCIMIENTO Y LISTADO DE EQUIPOS Y ACCESORIOS DE PLANTA DE HIDRÓGENO.

La Planta de hidrógeno está constituida principalmente por los siguientes módulos y componentes^[17]:

- Un módulo generador de hidrógeno Teledyne EC-750.

- Un módulo compresor de hidrógeno PDC Machines, PDC-3-800-3000-100 %.
- Un módulo fuente rectificador de energía (Power Supply) modelo Neltran Inc, ES-E38008-06.
- Un módulo de 2 tanques horizontales de almacenamiento de hidrógeno de 1 200 m³ c/u.
- Un panel de control de hidrógeno de alta y baja presión.
- Un panel principal de distribución eléctrica.
- Un higrómetro compuesto por su unidad de control y la unidad sensora de humedad.
- Un analizador de trazas de oxígeno.
- Un detector de combustible.
- Sistema de suministro de nitrógeno como gas inerte y aire de instrumentación.
- Los sistemas de tuberías de agua de alimentación, enfriamiento, hidrógeno, nitrógeno y oxígeno.
- Los sistemas de tuberías eléctricas y de control.

A continuación se muestra el listado de equipos y el P&ID de la Planta de hidrógeno Teledyne EC-750.

Tabla 15. Lista de equipos y accesorios de Generador EC-750.

NÚMERO	TAG	COMPONENTE/TIPO	NÚMERO	TAG	COMPONENTE/TIPO	NÚMERO	TAG	COMPONENTE/TIPO
1	001-002	Filter/regulator	31	210	Valve, Ball, manual	61	375	Restrictor, 0,080φ
2	003	Valve selenoid, 3 way	32	211	T/C, module temp	62	376	Valve check
3	005	Pressure switch	33	220	Valve, Ball, manual	63	378	Pressure transducer
4	006-009	Valve selenoid, 3 way	34	232	T/C, KOH Temp control	64	380	Coalescing filter
5	010-011	Valve selenoid, 3 way	35	301	Condenser	65	381	Catalyst tank H2
6	012	Enclosure purge system	36	302-303	Trap	66	382	TC, Catalyst tank, H2
7	013	I/P converter, CW control	37	304	Restrictor, 0,005φ	67	385-401	Condenser
8	014	Valve selenoid, 3 way	38	305	Gas detector, combustible	68	402-403	Trap
9	016	Dryer bypass control SV	39	308	Gauge, pressure	69	405	Gas detector, combustible
10	018	I/P converter, diff press, O2 side	40	309	Back pressure regulator	70	410	Flow controller
11	019	I/P converter, diff press, H2 side	41	310	Flow controller	71	420	Valve, air motor operated
12	100-A	Electrolysis module	42	313	Valve, Ball, air motor OP	72	426	Gauge, pressure
13	101	Phase separator, H2	43	314-A/314-B	Dryer, H2	73	427	Restrictor, 0,040φ
14	102	Pump, H2 KOH	44	315-A/315-B	Dryer, H2	74	430	Valve, air motor operated
15	103	Heat exchanger	45	316-317	Filter	75	503	Gauge pressure
16	106	Valve, Ball, manual	46	320	Valve, air motor operated	76	504	Valve, selenoid, 3 way
17	107	Filter	47	325	Transducer, pressure	77	505-506	Valve manual
18	108	Valve, Ball, manual	48	328	Transducer, diff pressure	78	507-508	Valve check
19	109-A/109-B	Flow switch (12 GPM)	49	329	Gauge, pressure	79	509-512	Valve check
20	110	Valve, Ball, manual	50	330	Valve, air motor operated	80	530	Valve relief
21	111	T/C, module temp	51	331-332	Valve, Check	81	601	Strainer, cooling water
22	113	Transducer, liquid level	52	334	Restrictor, 0,017φ	82	603-605	Valve manual
23	115-117	Valve, Ball, manual	53	335	Valve, air motor act. NC	83	606-608	Valve manual
24	118-120	Valve, Ball, manual	54	336	Restrictor, 0,040φ	84	609	Control valve, cooling tower
25	201	Phase separator, O2	55	340	Back pressure regulator	85	610-611	Valve manual
26	202	Pump, O2 KOH	56	370	Valve, air motor operated	86	701	Pump feed water
27	203	Heat exchanger	57	371	Coalescing filter	87	702	Valve selenid, NC
28	206	Valve, Ball, manual	58	372	Valve NO, air operated	88	703	Valve check
29	207	Filter	59	373	Trap	89	705	Sensor resistivity
30	208	Valve, Ball, manual	60	374	Valve NC, air operated	90	707	Valve check

Fuente: Manual de Planta de H2 - Teledyne.

6.8. PROCEDIMIENTO GENERAL DE MONTAJE DE LA PLANTA DE HIDRÓGENO.

El procedimiento general para efectuar el montaje de la planta de hidrógeno^[17] será la siguiente.

PRIMERA ETAPA.

1. Instalación del módulo generador de hidrógeno.
2. Instalación del módulo fuente rectificador de energía (Power Supply).
3. Instalación del panel principal de distribución de energía.
4. Instalación del panel de control de gas hidrógeno.
5. Instalación del higrómetro.
6. Instalación del analizador de trazas de oxígeno.
7. Instalación del detector de gas combustible.
8. Instalación de las tuberías mecánicas, tuberías eléctricas y de control para poner en funcionamiento el generador de hidrógeno y la fuente rectificadora de energía.
9. Pruebas de funcionamiento y puesta en marcha de los equipos de la primera etapa de la planta de hidrógeno.

SEGUNDA ETAPA.

1. Montaje del compresor.
2. Montaje de los tanques de almacenamiento de gas hidrógeno.
3. Instalación de los sistemas de tuberías mecánicas y eléctricas para poner en funcionamiento el compresor y los tanques de almacenamiento.

4. Pruebas de funcionamiento y puesta en marcha de los equipos de la segunda etapa de la planta de hidrógeno.

6.9. TRABAJOS A REALIZAR EN LA OBRA.

6.9.1. ALCANCES DE LOS TRABAJOS DE LA PRIMERA ETAPA.

Para llevar a cabo los trabajos de la primera etapa, se deben efectuar lo siguiente:

6.9.1.1. Trabajos Preliminares.

- ✓ Modificación de las líneas existentes de hidrógeno que se utilizaron para el suministro de hidrógeno STD de Olvicsa.

6.9.1.2. Obras civiles.

Los trabajos a efectuarse son:

- ✓ Construcción de las bases de concreto para el generador de hidrógeno, rectificador de corriente y panel de control de hidrógeno de alta y baja presión.
- ✓ Habilitación de los pases de tubería en los muros divisorios de los ambientes de los equipos de la planta de hidrógeno, del rectificador al generador de hidrógeno, del rectificador a la planta de tratamiento de agua desionizada, del generador al compresor y del compresor hacia el patio de distribución y tanques de almacenamiento.
- ✓ Perforación de los pases en la pared para las tuberías de agua desionizada de la planta de tratamiento de agua desionizada al generador de hidrógeno.

- ✓ Colocación de un suministro y línea de drenaje en el piso de concreto para el generador de hidrógeno.
- ✓ Suministro y colocación de dos puertas metálicas de los ambientes del generador y de la fuente rectificadora de energía (Power supply).
- ✓ Pintado general de los ambientes de la planta de hidrógeno.

6.9.1.3. Trabajos electromecánicos.

Los trabajos electromecánicos que deben efectuarse son:

- ✓ Montaje del generador, rectificador de corriente, panel de control de alta presión e instalación del tablero de distribución eléctrica de potencia.
- ✓ Instalación de las unidades de análisis y sensado del higrómetro.
- ✓ Montaje de la planta de tratamiento de agua desionizada y las líneas de suministro desde la planta de tratamiento de agua hacia el ingreso del generador de hidrógeno.
- ✓ Instalación de la línea de hidrógeno gas; desde la salida del generador hasta la "T" de desviación hacia el reactor deoxo o a la succión del compresor, pasando por el higrómetro y el medidor de trazas de oxígeno y desde la "T" hasta el tablero de distribución hacia el reactor deoxo.
- ✓ Instalación de las líneas de oxígeno desde el generador de hidrógeno hasta una altura de 1,0 m por encima del techo del ambiente del generador.

- ✓ Instalación de las líneas nitrógeno como gas inerte y aire de instrumentación, desde el tanque LIN de 21 000 kg (16 500 m³) de capacidad hasta el manifold y desde el manifold hasta el generador de hidrógeno.
- ✓ Instalación de las tuberías eléctricas conduit y el cableado de fuerza desde el panel de distribución de potencia (MCC2) hasta el rectificador de corriente y desde el rectificador de corriente hasta el generador de hidrógeno.
- ✓ Instalación de tuberías eléctricas conduit y el cableado de control desde el generador de hidrógeno hasta el rectificador de corriente y el cableado de control desde la unidad de análisis del higrómetro y sensor de trazas de oxígeno hasta su unidad de sensado.
- ✓ Pintado de los sistemas de tuberías instalados entre el rectificador, el generador de hidrógeno y el panel de control.

6.9.2. ALCANCES DE LOS TRABAJOS DE LA SEGUNDA ETAPA.

Esta segunda etapa tiene por objetivo el montaje del compresor y del módulo de 2 tanques de almacenamiento de hidrógeno, para lo cual se debería efectuar los siguientes trabajos:

6.9.2.1. Trabajos preliminares.

- ✓ Preparación de los terrenos y carretas para el montaje de los dos tanques de almacenamiento de hidrógeno.

6.9.2.2. Obras civiles.

Dentro de las obras civiles de la segunda etapa, se efectuarán los siguientes trabajos:

- ✓ Construcción de la base de concreto del compresor de hidrógeno.
- ✓ Construcción de la losa de concreto donde se ubicarán las carretas que contengan los tanques de almacenamiento.
- ✓ Instalación del manifold de los tanques de almacenamiento hacia el reactor de oxo.
- ✓ Instalación del manifold desde el generador hacia el reactor de oxo y hacia los tanques de almacenamiento.
- ✓ Colocación de dos puertas metálicas para el ambiente del almacén y planta de tratamiento de agua desionizada.
- ✓ Pintado de paredes del ambiente del compresor.

6.9.2.3. Trabajos electromecánicos.

Los trabajos electromecánicos de esta segunda etapa son los siguientes:

- ✓ Montaje del compresor de hidrógeno.
- ✓ Montaje de los tanques de almacenamiento de hidrógeno a las carretas correspondientes.
- ✓ Instalación de las líneas de suministro y retorno del agua de refrigeración al compresor de hidrógeno.
- ✓ Instalación de las líneas de entrega de hidrógeno del compresor; desde la conexión de salida hasta el ingreso al panel de control a los tanques de almacenamiento.

- ✓ Instalación de las líneas de abastecimiento de hidrógeno al compresor, desde la T a la salida del higrómetro hasta la conexión de entrada del compresor.
- ✓ Instalación de la línea de suministro de nitrógeno inerte desde el manifold de nitrógeno inerte hasta la "T" en la línea de alimentación de hidrógeno al compresor, y como nitrógeno de instrumentación para el compresor.
- ✓ Instalación de la línea de ventilación del hidrógeno al exterior del ambiente del compresor, desde la salida del equipo hasta 1,0 m por encima de la salida en la pared del compresor.
- ✓ Instalación del sensor de trazas de oxígeno en el ramal a la salida del generador de hidrógeno.
- ✓ Instalación de la línea de ventilación del sensor de oxígeno, desde la salida de este equipo hasta 1,0 m por encima de la salida en la pared del ambiente del generador de hidrógeno.
- ✓ Instalación de la línea de venteo en la entrada de hidrógeno al compresor hacia la tubería de ventilación al exterior del compresor.
- ✓ Instalación de la tubería eléctrica conduit y el cableado de fuerza desde el power supply hasta el arrancador del motor del compresor.

6.10. DESARROLLO Y CARACTERÍSTICAS DE LOS EQUIPOS DE LA PLANTA DE HIDRÓGENO.

6.10.1. GENERACIÓN DE HIDRÓGENO.

La figura 28, muestra un esquema de principio de la planta de producción de hidrógeno electrolítico. La corriente continua alimenta, en modo de acoplamiento directo, un electrolizador bipolar donde se descompone el agua en hidrógeno y oxígeno que son liberados a los sistemas de almacenamiento adecuados. Para el funcionamiento del sistema es necesaria la existencia de sistemas auxiliares tales como : nitrógeno gaseoso para la inertización en arranques y paradas, sistemas de refrigeración y control de temperaturas del electrolizador, sistema de alimentación de agua al electrolizador, convertidor AC/DC, sistemas de detección y extinción de incendios y por último, sistemas de adquisición de datos que permitirá la recopilación de parámetros operacionales del sistema para su posterior análisis y evaluación.

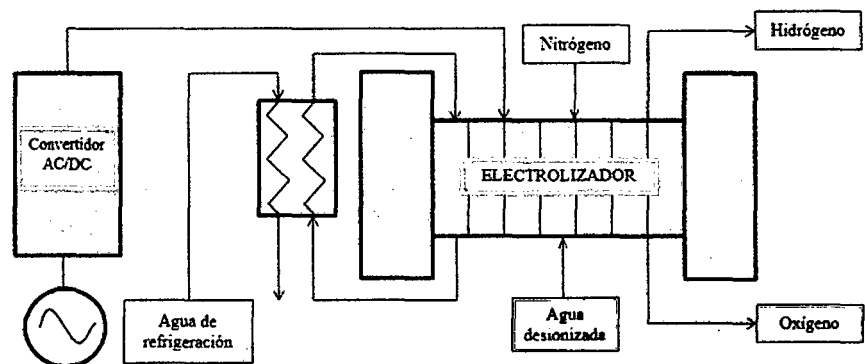


Figura 28. Esquema de principio de la planta de producción de H₂.

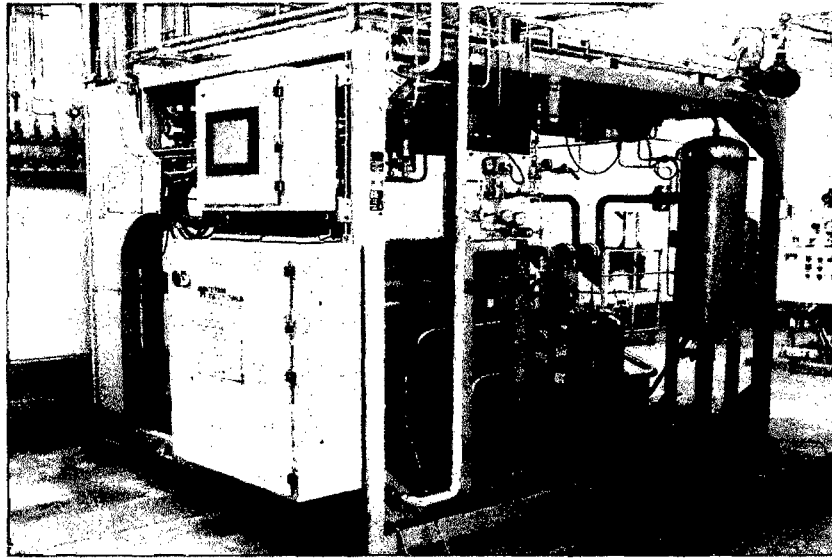


Figura 29. Generador EC-750 en Messer Gases.

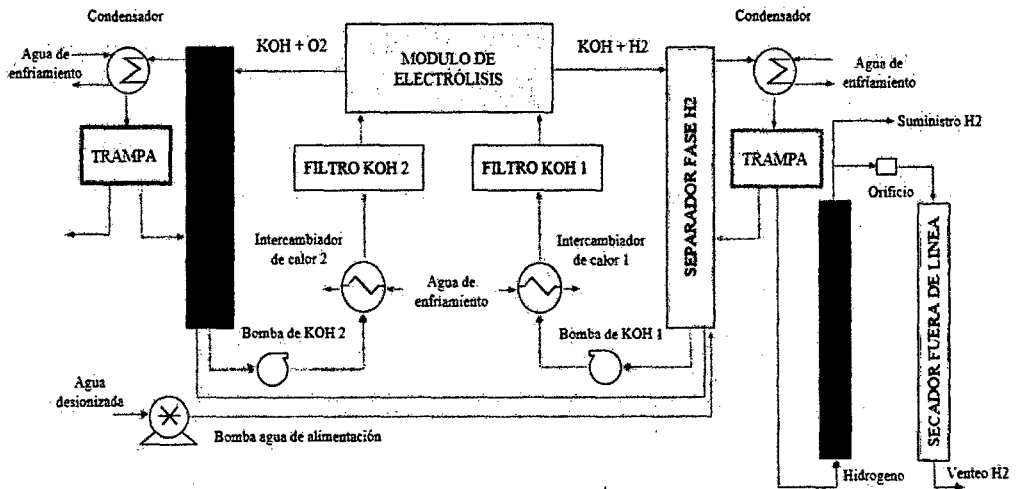


Figura 30. Esquema simplificado de la producción de H₂.

La siguiente tabla 16 muestra las principales características de la Planta de Hidrógeno Teledyne EC-750.

Tabla 16. Principales características de Planta de Hidrógeno.

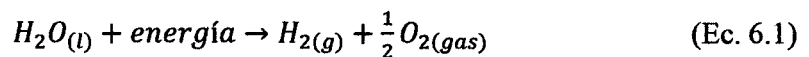
COMPONENTE	PARÁMETRO	ESPECIFICACIÓN
HIDRÓGENO	Flujo	750 SLM
		1590 SCFH
		42 Nm ³ /h
	Presión	90 psi - 150 psi
	Pureza	99,9998%
OXÍGENO	Flujo	375 SLM
		795 SCFH
		21 Nm ³ /h
	Presión	60 psi - 110 psi
	Pureza	99,9993%
AGUA DE ALIMENTACIÓN	Flujo	42 l/h
	Especificación	ASTM D1193 Tipo II Máx 1 µS
	Presión	0,3 bar - 6,9 bar (5 psi - 100 psi)
ELÉCTRICA	AC Breaker size (380 V)	750 A
	AC Breaker size (480 V)	600 A
	Electrólisis AMPS DC	100 - 1100 DCA
	Electrólisis VOLTS DC	215 - 280
ELECTROLITO	Concentración	200 l de KOH al 30 % Wt
AGUA DE ENFRIAMIENTO	Especificación	150 l/min dependiendo de la temp. máxima caída de presión 1,9 bar máxima Temp. de ingreso 40 °C
GAS INERTE	Especificación	Nitrógeno al 99,95 % de pureza
AIRE DE INSTRUMENTACIÓN	Mínima presión	5,8 bar (85 psi)
	Máxima presión	17,2 bar (250 psi)
	Consumo	1 Nm ³ /h (35 SCFH)
RATIO PRESIÓN DE SISTEMA	Especificación	11,7 bar (170 psi)
TEMPERATURA AMBIENTAL	Especificación	5 °C - 50 °C

Fuente: Manual de Planta de H₂ - Teledyne.

El sistema de generación de gas hidrógeno es una unidad completamente automatizada. Está constituida por tres elementos claramente diferenciados:

6.10.1.1. Electrolizador.

El electrolizador es el núcleo del proceso y donde tiene lugar el proceso electrolítico, cuyo resultado neto, como se expuso en los capítulos anteriores es:



Esta reacción tiene lugar en el interior de celdas electrolíticas diseñadas y patentadas por Teledyne. La figura 27 muestra el esquema del proceso e instrumentación asociada al funcionamiento de la planta.

El electrolizador está constituido por un apilamiento de celdas bipolares, conectadas en serie entre dos conectores eléctricos. Todas las celdas al estar conectadas en serie, están atravesadas por la misma intensidad de corriente continua y en cada compartimiento anódico y catódico tienen lugar las reacciones electroquímicas indicadas anteriormente. Se utiliza una solución de KOH al 30% en peso para dotar al electrolito de conductividad eléctrica adecuada a fin de optimizar el consumo energético. El electrolito circula a través del electrolizador por movimiento natural inducido por la generación del hidrógeno y oxígeno en cada compartimiento. La figura 31, muestra el stack donde tiene lugar el proceso electrolítico. Pueden observarse las 121 celdas de que está constituido así como los sellos existentes entre celdas para garantizar la estanqueidad del sistema.

Tabla 17. Características del stack EC-750

COMPONENTE	CARACTERÍSTICA	ESPECIFICACIÓN
STACK ELECTROLÍTICO	Tipo de celdas	Bipolar Teledyne EC-750
	Numero de celdas	121
	Superficie de electrodo por celdas	1134 cm ²
	Intensidad de corriente máxima	1000 A
	Activación de electrodos	Niquel Raney depositado
	Materiales internos del stack	Niquel puro
CONDICIONES DE OPERACIÓN	Presión máxima	170 psi
	Temperatura máxima	75 °C
CALIDAD DE AGUA DESMINERALIZADA	Conductividad eléctrica máxima a 25°C	1µS/cm
	Materia en suspensión máxima	1 mg/l
	<i>pH</i>	6,5 - 7,5
ELECTROLITO	Tipo	Solución KOH 30% en peso
	Capacidad	53 galones/200 litros
CONVERTIDOR AC/DC	Suministro	380 VAC / 50Hz / 3 Fases
	Potencia	280 kW
DIMENSIONES	Electrolizador/Unidad de control	204*263*200 cm
	Convertidor AC/DC	122*122*200 cm

Fuente: Manual de Planta de H2 - Teledyne.

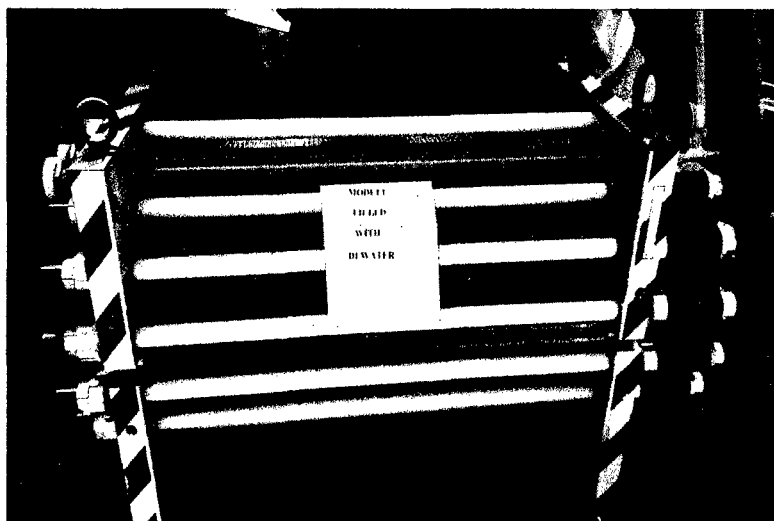


Figura 31. Disposición del stack.

El agua desmineralizada consumida en el proceso electrolítico alimenta al electrolizador desde un depósito situado en el área de la planta de tratamiento de agua desionizada a un flujo de 56,7 l/h (0.25 GPM). El aporte del agua viene controlado por la actuación de una autómatas programable localizada cerca del panel de control. El aporte de agua se realiza a través de una bomba de desplazamiento rotativa de paletas de 94,6 l/h (25 GPH) situada al costado del stack.

El hidrógeno y oxígeno generados en el electrolizador alcanzan, separadamente, los dos separadores. Estos separadores realizan una doble función:

- Separar los gases producidos del electrolito que fue arrastrado desde el electrolizador. El electrolito retorna al electrolizador impulsada por una bomba centrífuga con acoplamiento magnético de 45,4 l/min (12 GPM).
- Controlar la temperatura del proceso. En el tramo que hay entre el separador y el electrolizador, existe un

intercambiador de placas planas refrigeradas con agua fría para mantener la temperatura del proceso entre los márgenes recomendados (aproximadamente 60 °C).

Estos dos separadores se encuentran comunicados por la parte inferior de forma que las presiones de los compartimientos anódicos y catódicos sean las mismas. La igualación de las presiones en los compartimientos es vital para garantizar la integridad mecánica de la membrana de separación entre ánodo y cátodo.

El sensor de nivel incorporado al sistema, permite determinar cuando el sistema de control necesita aportar agua de alimentación al proceso. Estos sensores de nivel evitan así mismo que se pueda producir una mezcla explosiva de hidrógeno y oxígeno por el conducto de comunicación de los dos separadores.

6.10.1.2. Sistema purificador.

El gas que sale de la fase separadora ingresa a un condensador de placas (301) donde la temperatura se reduce logrando la condensación del vapor de agua, el gas que sale del condensador ingresa a una trampa (302) donde el agua condensada es reunida y retornada por gravedad a la fase separadora.

El agua de enfriamiento fluye en el condensador de gas a través de las placas planas; las bajas temperaturas del agua de enfriamiento mejoran el proceso de la condensación y ayudan a minimizar la carga de los filtros y secadores posteriores. Una torre de enfriamiento (chiller) es recomendable para el requerimiento de altas purzas en zonas de altas humedades. El operar con válvulas manuales antes del ingreso al condensador, proporcionan la velocidad del flujo adecuado del agua de

enfriamiento en esta parte del sistema. Tomando como ejemplo si la temperatura de agua de enfriamiento está en el rango de 15 °C a 20 °C el flujo en cada condensador sería de aproximadamente de 4,0 l/min a 7,5 l/min, las variaciones de temperatura en el lugar no requieren frecuentes o significativos cambios en el flujo antes mencionado.

El flujo de hidrógeno que sale de la trampa pasa por uno filtro coalescente (380), cada filtro consiste de un recubrimiento de acero inoxidable y un conjunto de filtro de cartuchos. Como el gas pasa por la parte interna de los cartuchos hacia afuera, el vapor conducido por el gas es condensado para formar gotas de agua en la parte externa de los cartuchos, las gotas de agua drenan por gravedad a la trampa 373.

La válvula 372 ubicada entre el filtro coalescente de drenaje y la trampa 373 es normalmente abierta. La válvula 374 que es conectada al sistema de venteo del gas es normalmente cerrada. Cada 15 minutos las válvulas 372 y 374 cambian de estado durante 5 segundos. La válvula 372 aísla el procesos mientras que la presión en la trampa 373 causada por pequeñas cantidades de agua en la trampa son enviados al venteo del sistema.

Después del primer filtro coalescente (380) el hidrógeno fluye a un tanque lleno de un catalizador DE-OXO que elimina la cantidad de oxígeno remanente de la corriente de gas hidrógeno. El catalizador en este tanque (381) mezcla el oxígeno con el hidrógeno y produce vapor de agua en una reacción exotérmica. Luego este flujo de gas pasa por un condensador de placa plana (385) para enfriar el gas y condensar algo de agua antes que el flujo de gas pase por el segundo filtro coalescente (371).

El secado final del gas hidrógeno así como la remoción final de las trazas de oxígeno que pudiera permanecer ocurre en dos conjuntos de tanques secadores de 12,7 cm de diámetro ubicados aguas abajo del filtro coalescente 371. Los tanques son designados como 314A y 314B, 315A y 315B. Cada tanque contiene un conjunto alterno de molécula sieve y catalizador de-oxo. El catalizador provoca la recombinación de las trazas de moléculas de oxígeno con hidrógeno para formar vapor de agua. El agua junto con la humedad que lleva el hidrógeno es removida por el conjunto del sieve. El sistema podría remover hasta lograr una humedad por debajo de 1 ppm en una típica operación de presión.

Para el funcionamiento adecuado de las secadoras, la humedad retenida en el molecular sieve debe ser retirada periódicamente. Esto se cumple llevando el secador fuera de servicio durante 6 horas y completando un proceso de regeneración automática. Parte del proceso de regeneración involucra una purga lenta de hidrógeno puro del secador en línea hacia fuera del secador y esto se logra a través de las aperturas de las válvulas 313 y 370 hacia el venteo del sistema, este flujo purgado de forma cruzada es a través del orificio 304 (0.005 Φ), el flujo entre los conjuntos de secado es constante y se lleva a cabo a través de la válvula 304 (se invierte la dirección cada 6 horas).

En la primera hora de regeneración, elementos calentadores dentro de los tubos del secador fuera de línea son energizados, esto provoca que el sieve se dilate y descargue el vapor de agua atrapada, luego los calentadores se apagan y la válvula 335 conectada en línea a la salida del secador se abre durante 60 min, este flujo que pasa por el restrictor 334 (0.017 Φ) incrementa el flujo de purga de hidrógeno y enfría los

secadores. Luego de 60 min la válvula 335 se cierra y por el resto del tiempo muerto la purga lenta continúa. Después de 5.5 horas de regeneración (aproximadamente 30 min antes del cambio de cama) la válvula 370 se cierra y la válvula 335 se abre otra vez. El incremento del flujo del secador en línea se aprovecha para presurizar el secador fuera de línea, preparando para iniciar el cambio de cama e iniciar a trabajar en línea. Cuando el secador que estaba fuera de línea (desconectado) esta presurizado, y esta señal es captada por el transmisor de presión 378, el secado se interrumpe.

Tres minutos antes que se interrumpa el secado, la válvula 370 se abre, causando que el otro secador quede despresurizando y listo para el ciclo de regeneración.

Luego de secar el hidrógeno en el mole sieves, pasa a través de un filtro de 0.5 micras (316/317) para remover las partículas del sieve que pudieran ser arrastrados. Luego de la filtración, el hidrógeno pasa a través de una válvula check (331/332) y son enviados al manifold.

La presión del hidrógeno puro enviado al manifold se indica en el manómetro (308). El hidrógeno pasa a través de un regulador de presión BPR (309) que previene la sobredemanda por cierre si el sistema de presión cae hasta niveles bajos de presión (5,5 bar). El regulador de presión BPR (340) es conectada entre la entrega al manifold y el sistema de venteo del hidrogeno. Si la presión del sistema está por encima del valor seteado (11,3 bar), este regulador se abrirá y se eliminará hidrógeno hacia el venteo con el fin de mantener la presión de hidrógeno en el sistema.

6.10.1.3. Sistema de control.

Un número de controles automáticos han sido creados y son controlados por un controlador lógico programable (PLC). El PLC es un microprocesador que toma la información en varios formatos de entrada tales como corriente, voltaje o temperatura, y energiza o desenergiza la salida de acuerdo a las instrucciones de un programa definido. El programa (referido a la lógica de escalera) tiene comparaciones, temporizadores, contadores, lógicas matemáticas y otras informaciones que pueden manipularse de acuerdo a la capacidad del personal capacitado y habilita una decisión y correspondiente acción de salida.

La información guardada en la Unidad Central de Procesamiento (CPU) incluyendo la lógica de escalera, valores de proceso y los valores seteados; estos valores seteados que son solo de lectura consisten en los cambios de los valores seteados (set point) usados para la comparación por la CPU (Típicamente alarmas seteados y registros de tiempo). El programa y los datos de solo lectura son instalados por el fabricante. Los valores de trabajo cambian con la operación de la máquina y pueden o no ser retenidos por la CPU cuando esta se apague.

Un terminal opcional hand-held para la interface con la PLC es disponible y puede ser de ayuda en la solución de problemas.

El PLC está físicamente configurado como: una fuente de poder, CPU y un número de módulos de entrada y salida.

- Presión de hidrógeno de secador fuera de línea (378).
- Amperaje de modulo (fuente de poder).
- Presión de nitrógeno (510).

Entradas Digitales (24 voltios DC)

- Flujo de KOH lado hidrógeno (109).
- Flujo de KOH lado oxígeno (209).
- Presión de aire de instrumentación (005).
- Problemas en la fuente de poder.
- Señal externa habilitada NC (normalmente cerrada).
- Utilidad de la potencia OK (UPS).
- Falla de UPS.
- Batería baja (UPS).
- Parada de emergencia NC (normalmente cerrada).
- Alarma externa NC (normalmente cerrada).

Entrada Análoga (Temperatura)

- Temperatura de KOH en el lado de hidrógeno (111).
- Temperatura de KOH en el lado de oxígeno (211).
- Control de temperatura del agua de enfriamiento (232).
- Temperatura de oxígeno en hidrógeno (305).
- Temperatura de hidrógeno en oxígeno (405).
- Temperatura tanque deoxo lado hidrógeno (382).

La lista de módulos de salida son los siguientes:

Salida Digital.

- 006 presión neumática para venteo de secador (370/470).
- 009 presión neumática para venteo de sistema 320/420.
- 010 válvula selenoide suministro de nitrógeno.
- 011 presión neumática para purga de trampa 372/472.
- 003 presión neumática para switch de secador 315/415.
- 014 presión neumática para switch de secador 314/414.
- 016 presión para purga de secador 335/435.
- 504 válvula de nitrógeno.
- 701 bomba de alimentación de agua y SV702.
- Arranque de motor de la bomba de KOH.
- Habilitación de la corriente DC para el suministro de potencia.
- 314 contactor del calentamiento de secador.
- 315 contactor del calentamiento de secador.

Salida Análoga (4-20 mA)

- 013 transductor I/P del agua de enfriamiento.
- 019 transductor I/P de hidrógeno.
- 018 transductor I/P de oxígeno.
- Demanda del suministro de potencia.

La pantalla táctil (touch screen) es la interface del operador con el generador EC-750, proporcionando una forma de control así como los valores de los parámetros más importantes de la máquina. La pantalla táctil está interfaceada directamente con el PLC y puede ser considerada como un dispositivo de entrada y salida. Cada pantalla es programada por separado y cargado dentro de la memoria de la pantalla táctil.

La pantalla táctil también puede ser usada para proporcionar al operador información tales como programar valores seteados y pantalla de ayuda que son utilizados si ocurre una parada automática.

El sistema de control se programó para establecer una operación segura y eficiente del sistema. Los parámetros fijados se muestran en la tabla 18.

6.10.1.4. Convertidor AC/DC.

Distribución de Potencia.

La potencia eléctrica para la electrólisis y los sub-sistemas asociados son distribuidos desde el gabinete de suministro de potencia. La única conexión de entrada realizada por el usuario es la potencia AC de 3 fases.

Esta conexión en el lado primario del transformador principal EC se realiza desde un interruptor trifásico que se ubica cerca a la fuente de poder.

Desde el lado primario del transformador principal, un voltaje trifásico es proporcionado para el arranque de los motores de las bombas de alimentación de agua al generador y dos motores de

Tabla 18. Puntos de consigna del sistema de control.

PARÁMETRO	TAG	VALOR
Presión del sistema	PT-325	140 psi
Temperatura de KOH	TC-232	61 °C
Presión de arranque de secador	PT-325	75 psi
Presión de parada de secador	PT-325	70 psi
Diferencial de presión lado O ₂	DPT-328	-3,0 in H ₂ O
Diferencial de presión lado H ₂	DPT-328	3,0 in H ₂ O
Temperatura de reseteo KOH	TC-232	70 °C
Tiempo de reseteo de señales	-	15 s
Selección de modelo	-	1
Rango de corriente de suministro de potencia	-	1000 A
Corriente máxima	-	900 A
Corriente mínima	-	250 A
Número de celdas del stack	-	121
Presión final luego de parada	PT-325	1,7 psi
Baja presión de nitrógeno	-	70 psi
Ciclos de pre-presurización	-	3
Alta presión de purga en pre-presurización	PT-502	20 psi
Baja presión de purga en pre-presurización	PT-502	10 psi
Mínima presión de activación luego de pre-presurización	PT-502	25 psi
Ciclos de purga en parada	-	2
Alta presión de purga en parada	PT-502	40 psi
Baja presión de purga en parada	PT-502	30 psi
Tiempo máximo de purga luego de parada	-	15 s
Presión que acepta abortar durante purga de parada	PT-502	1 psi
Límite de temperatura de H ₂ en O ₂ en purgas	TC-305	175 °C
Límite de temperatura de O ₂ en H ₂ en purgas	TC-325	175 °C
Nivel alto de agua	-	47 %
Nivel bajo de agua	-	37 %

Fuente: Manual de Planta de H₂ - Teledyne.

las bombas de KOH; y una entrada de voltaje monofásico es alimentada al lado primario de varios transformadores auxiliares. Estos circuitos están protegidos por un circuito de interruptores localizados al frente del gabinete de suministro de potencia. Un transformador proporciona de 110 - 120 VAC para el sistema de control del generador. Un segundo transformador proporciona 230 - 240 VAC para el calentamiento de las resistencias en el sistema de secado del generador.

Dependiendo del consumo del suministro de potencia, se instalarán 1 o 2 transformadores de 110 - 120 VAC para el control del suministro de potencia y para el funcionamiento de los ventiladores de enfriamiento del suministro de potencia.

El UPS montada en el gabinete de suministro de potencia proporciona la potencia para el control de la EC y es usado como un interruptor de control de encendido y apagado. Este voltaje de 110 - 120 VAC es usado por el controlador programable (934), instrumentos, indicadores/alarmas, válvulas selenoides y otros dispositivos de control. Este voltaje es también la entrada al suministro de potencia de 24 VDC (966) usado para los instrumentos análogos.

Rectificador AC a DC.

El rectificador consiste de un circuito de 6 pulsos tipo puente de onda completa (6 SCR s) y varias tarjetas de control. La tarjeta principal de control y disparo (CAT) reciben corriente habilitada y señales de control análogo 4 mA - 20 mA de la cabina de gas del generador. La tarjeta también recibe entradas de 3 fases y retroalimenta señales de corriente y voltaje desde los terminales de salida tipo puente. La respuesta de los controles es tal que la corriente DC de 100 A a 1000 A es

suministrada correspondiente a una entrada de 4 mA - 20 mA. Este se logra a través de la variación de los pasos del SCRs. Un circuito de amortiguamiento está en serie con la señal de control que previene al módulo de incrementos muy rápidos de corriente. La corriente DC y el voltaje pueden estar limitados por el operador ajustando potenciómetros en el panel del suministro de potencia. Estas funciones son útiles en los arranques y en la solución de problemas.

El amperaje total y voltaje del módulo son mostrados en los medidores colocados en la parte frontal del gabinete del suministro de potencia. Las luces que indican el encendido de la potencia AC, encendido de la corriente DC, pérdida de fase y alarmas de altas temperaturas son también incluidas en el panel de suministro de potencia.

La entrada al rectificador tipo puente es desde el transformador secundario principal de tres fases que reduce los voltajes de entrada de 480 VAC hasta 200 VAC. La entrada AC es monitoreada por una pérdida de fases. El transformador principal y los SCRs son monitoreados por alta temperatura. Las llaves de estos dispositivos de alarma son conectadas en serie y monitoreadas por la PLC de la EC, las cuales verifican para un circuito completo a través de todos los interruptores de alarmas. La tarjeta CAT de la fuente de poder también tiene funciones de monitoreo interno que podrían deshabilitar la salida en una condición de falla.

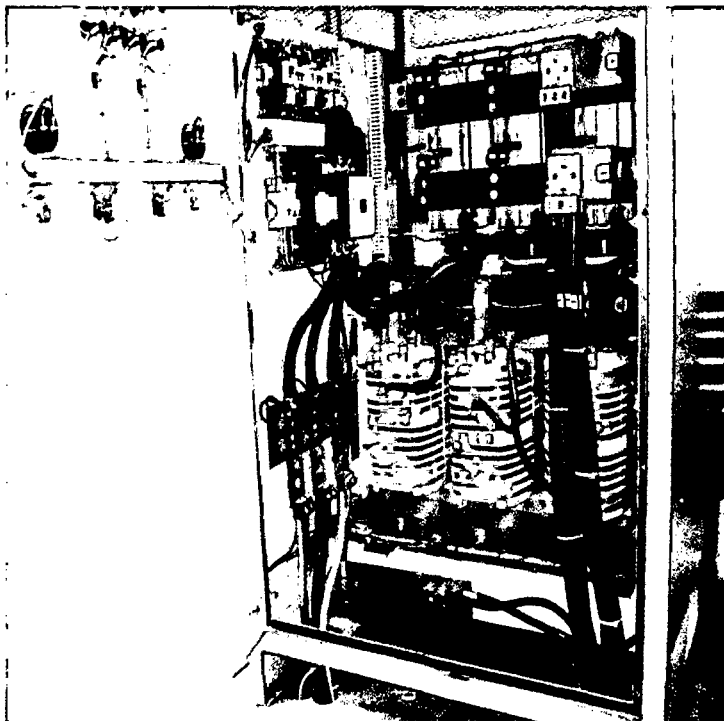


Figura 34. Gabinete de suministro de potencia de generador EC-750.

6.10.2. INSTALACIONES AUXILIARES.

6.10.2.1. Tratamiento de agua de alimentación.

Las características técnicas de la planta instalada, definen unos parámetros de calidad de agua de alimentación al electrolizador, debiéndose cumplir unos determinados requerimientos en cuanto a potencial de hidrógeno, conductividad y contenido máximo de partículas en suspensión.

A efectos del dimensionamiento del sistema de tratamiento de agua requerida, se realizó el análisis del agua de alimentación disponible en el emplazamiento. Dicho análisis arrojó los resultados que se presentan en la tabla 19.

Tabla 19 Análisis de agua de alimentación a sistema ósmosis.

PARAMETRO	VALOR	
Conductividad	20 - 25	μS/cm
Potencial de hidrógeno (pH)	6,0 - 7,0	-
Calcio	1,5	ppm CaCO ₃
Magnesio	1,0	ppm MgCO ₃
Dureza total	2,0	ppm CaCO ₃
Sólidos totales disueltos	12,0	ppm TDS
Sílica total	0,5	ppm SiO ₂
Cloruros	8,0	ppm Cl
Sulfatos	0	ppm SO ₄
Hierro total	0,05	ppm Fe
Sólidos totales suspendidos	1,0	ppm TSS
Cobre total	0,05	ppm Cu
Aspecto	Limpia	-
Olor	Insípido	-
Sabor	Inodoro	-

Fuente: Laboratorio de análisis - Accuaproduct.

Del análisis de los datos presentados en ésta, se desprendió la necesidad de disminuir la conductividad del agua antes de introducirla en el sistema.

El sistema instalado se muestra en la figura 35 y consta de:

➤ **Acondicionamiento químico del agua.**

- ✓ Bomba de alimentación: de 1 kW de potencia succiona agua del tanque de alimentación y descarga a una presión de 276 kPa, en este tramo es donde se adiciona la soda para regular el potencial de hidrógeno.

- ✓ Dosificación de NaOH: Esta dosificación se realiza para la regulación del potencial de hidrógeno a la salida de la bomba de alimentación. Esta dosificación se realiza a través de una bomba tipo diafragma (de pulso) que cuenta con un tanque de 56 litros con soda debidamente diluido (180 g NaOH/19 litros de agua).
- ✓ Filtro de 5 micras: El agua es previamente filtrada antes del ingreso al equipo reteniendo partículas superiores a 5 micras.
- ✓ Filtro de carbón activado: Diseñado para eliminar olor, sabor, orgánicos, cloro residual.

➤ **Etapas de tratamiento.**

Esta etapa se realiza en sí con el equipo de ósmosis inversa, el cual consta de los siguientes accesorios.

- ✓ Bomba de alta presión: de 3 kW de potencia es la que se encarga de elevar la presión hasta 965 kPa para mejorar la eficiencia del equipo de ósmosis.
- ✓ Membrana Ósmosis: El porta membranas contiene 2 membranas de 6,3 cm de diámetro x 53 cm de largo. El primer housing recibe la alimentación del agua pre tratado impulsado por la bomba de alta presión y la corriente atraviesa la membrana del primer housing. La corriente de rechazo del porta membrana del primer housing es dirigida hacia el ingreso del segundo housing. El rechazo del segundo housing se rechaza a la línea de efluentes, siendo esta un caudal de 2,6 l/min (0.7 GPM). La

corriente de permeado obtenida en cada tubo de presión, se reúne en la línea de conducción de agua producto

- ✓ Medidores de flujo: Estos medidores de flujo están instalados en las líneas de agua producto, rechazo y recirculación.
- ✓ Instrumentos para medición: Esta planta de tratamiento cuenta con dos medidores de conductividad, uno a la salida de las membranas de ósmosis y el otro a la salida del desionizador. También se cuenta con un medidor de potencial de hidrógeno que está instalado a la salida del filtro de carbón activado.
- ✓ Manómetros: Estos manómetros permiten visualizar el estado de las bombas, filtros o membranas, están instaladas en las siguientes ubicaciones.
 - ✓ Pre y post filtro de 5 micras.
 - ✓ Post filtro de carbón activado.
 - ✓ Descarga de la bomba de alta presión.
 - ✓ Línea de rechazo.
 - ✓ Descarga de bombas de recirculación
 - ✓ Salida de equipo UV.
- ✓ Tablero de control eléctrico: Consta de un PLC Siemens donde está todo el automatismo del sistema, también consta de selectores y luces indicadores del estado de los equipos.

➤ **Etapas de post tratamiento**

- ✓ Equipo Ultravioleta: Es un esterilizador que elimina bacterias del agua usando radiación ultravioleta producida por una lámpara colocada en su interior, por lo general usa una dosificación de 32000 $\mu\text{W/s}$ por cada cm^2 en una longitud de onda de 254 nanómetros.
- ✓ Equipo desionizador: Contiene resina mixta cuya función es de asegurar que la conductividad de agua producto se supere los 1 $\mu\text{S/cm}$.

Tabla 20. Análisis de agua producto del sistema de ósmosis.

PARAMETRO	VALOR	
Conductividad	< 1,00	$\mu\text{S/cm}$
Potencial de hidrógeno (pH)	6,0 -7,0	-
Calcio	0,0	ppm CaCO_3
Magnesio	0,0	ppm MgCO_3
Dureza total	0,0	ppm CaCO_3
Sólidos totales disueltos	0,0	ppm TDS
Sílica total	0,0	ppm SiO_2
Cloruros	0,0	ppm Cl
Sulfatos	0,0	ppm SO_4
Hierro total	0,0	ppm Fe
Sólidos totales suspendidos	0,0	ppm TSS
Cobre total	0,0	ppm Cu
Aspecto	Limpia	-
Olor	Insípido	-
Sabor	Inodoro	-

Fuente: Laboratorio de análisis - Accuaproduct.

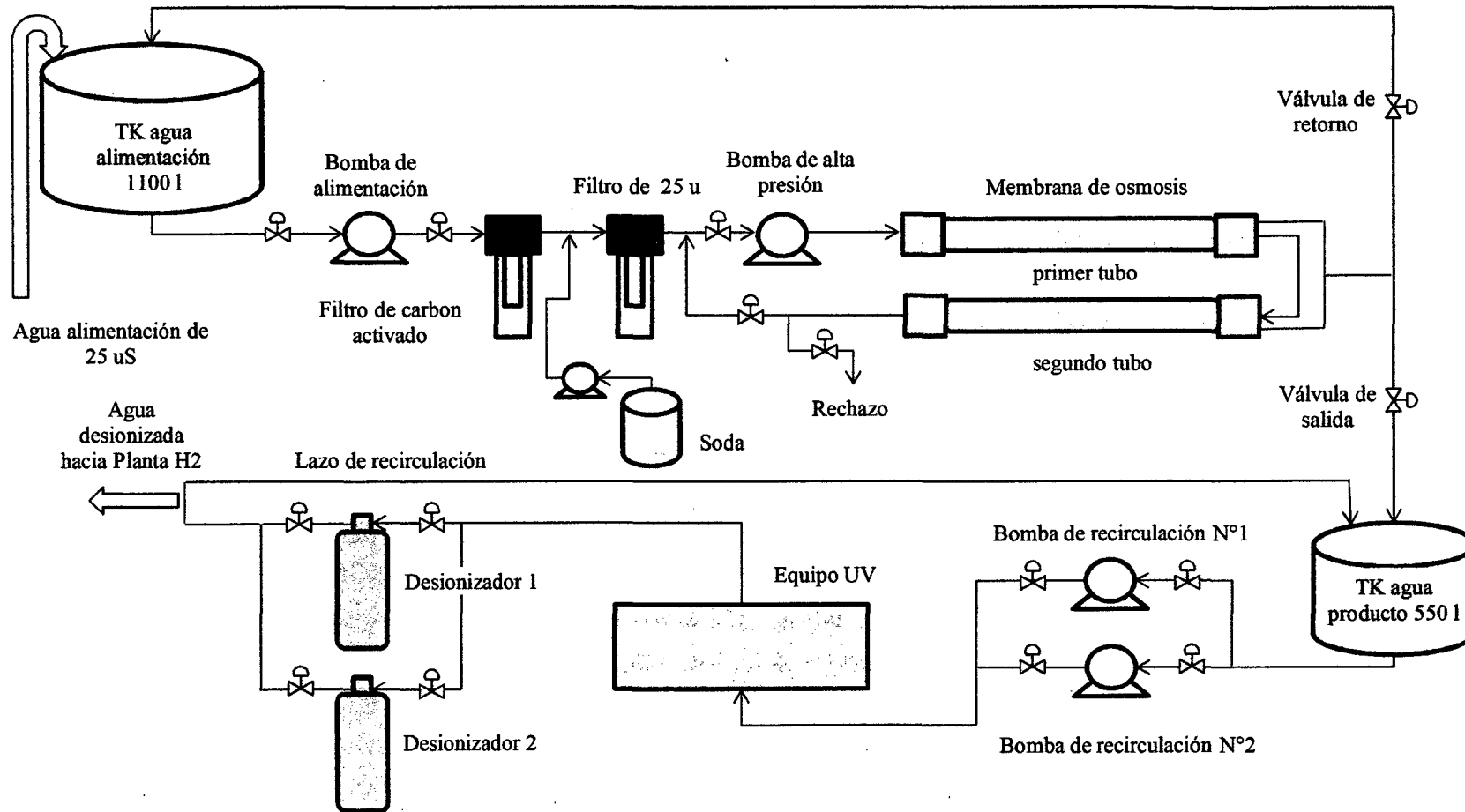


Figura 35. Planta de de agua desionizada

6.10.2.2. Instalación contra incendios.

Dado los límites de detonación e inflamabilidad tan estrechos de las mezclas hidrógeno - oxígeno, fue necesario disponer de una serie de medidas de protección tanto activas como pasivas a la hora de salvaguardar la seguridad de las personas y las instalaciones.

➤ **Medidas de seguridad pasiva.**

Las medidas pasivas se tomaron desde el momento en que se definió y ejecutó la construcción que alberga la Planta de producción de hidrogeno. Las directrices seguidas fueron las siguientes:

- ✓ Diseño de un edificio no estanco. En caso de fugas de hidrógeno, éste tendría una vía de escape con lo que se evitaría su acumulación y la formación de mezclas explosivas. Este objetivo se cumplió con el diseño de un edificio con ventilación natural.
- ✓ Evitar la instalación de falsos techos que podrían favorecer el estancamiento de fugas de hidrógeno.
- ✓ Instalación de un lecho liviano en comparación con la resistencia estructural de los materiales nobles. De esta forma, en caso de explosión, los gases tendría una vía preferencial de escape.

➤ **Medidas de seguridad activa.**

Las medidas de seguridad activa que se tuvieron en cuenta a la hora de definir la instalación contraincendios se centraron en un sistema de detección y extinción contraincendios.

Para ello se cuenta con extintores de polvo de CO₂ para mitigar cualquier amague de incendio y para protección en caso de fuga de hidrógeno, se cuenta con un sensor de gas combustible el cual presenta los siguientes características

- ✓ Sierra Monitoring modelo 5100-02-IT.
- ✓ Seteado para un nivel de alarma de 2 % de hidrógeno.
- ✓ Anti explosión.
- ✓ Requiere 50 % LEL de gas para calibración.
- ✓ Señal de 4 mA - 20 mA al el PLC.
- ✓ Montada en el punto más alto de la sala.

6.10.2.3. Sistema de Nitrógeno para inertización.

Como se puso de manifiesto en una sección previa, se requiere la utilización de nitrógeno para inertizar el electrolizador y los circuitos de gases en los arranques y paradas del sistema, así como para el funcionamiento de las válvulas del sistema en caso no se tuviera aire de instrumentación.

Para el abastecimiento continuo se consta de un tanque de nitrógeno líquido de una capacidad de 21000 kg el cual recibe producto del tope de una columna de alta presión de destilación criogénica de gases del aire. En la figura 36, se muestra el ingreso de nitrógeno de inertización en el sistema.

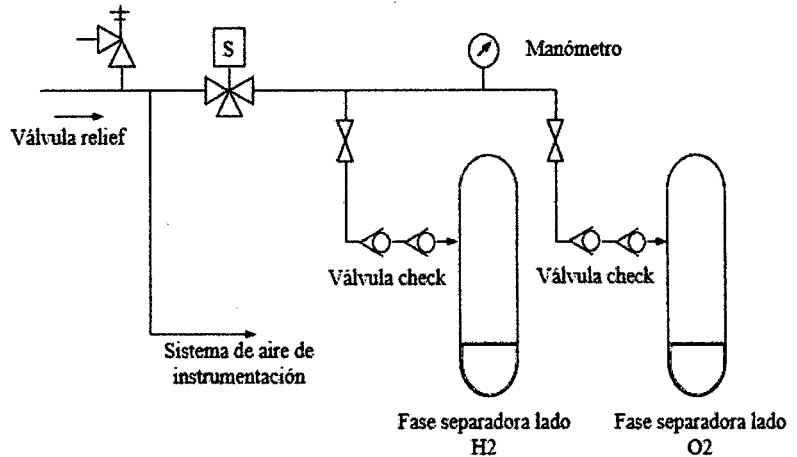


Figura 36. Sistema de suministro de gas inerte.

6.10.2.4. Sistema de aire de instrumentación.

Como se ha mencionado en los sub-sistemas anteriores, algunas funciones mecánicas requieren de la presión de aire de instrumentación, referido a la figura 37, hay dos suministros del manifold que operan a diferentes presiones. El aire es suministrado al sistema a través del regulador 001 seteado en 5,5 bar (80 psi). Este es la presión de operación para el actuador de las válvulas de control.

El regulador 002 es fijado a 1,37 bar (20 psi) este es la presión de suministro de instrumentos neumáticos requeridos para los transductores I/P 013, 018 y 019 que controla las válvulas de agua de enfriamiento y las válvulas de venteo de los gases de hidrógeno y oxígeno.

Para asegurar el suministro adecuado, el interruptor 005 es fijado de tal manera que si la presión de suministro cae por debajo de 4,80 bar (70 psi), esta señal enviada por el PLC detiene la electrólisis y despresa el sistema, debido al funcionamiento crítico de los instrumentos neumáticos. La

pérdida del suministro de aire de instrumentación también causa que la válvula 010 se energice para suministrar temporalmente gas inerte al sistema de aire. Esto ayudaría que los mandos de control no se desactiven mientras el generador se despresuriza, logrando de esta manera una parada adecuada para el sistema.

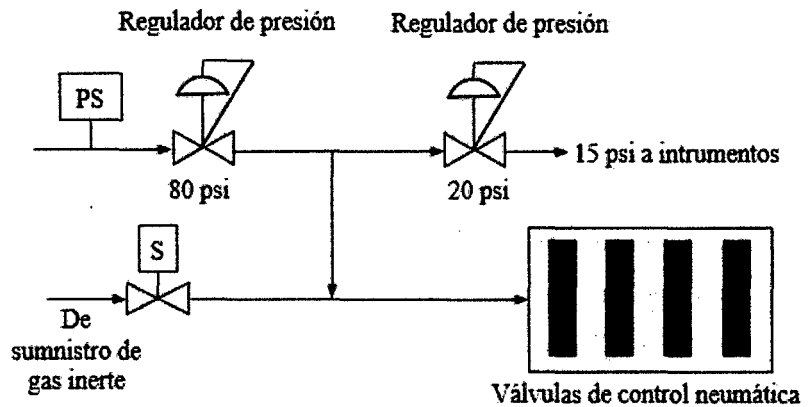


Figura 37. Suministro de aire de instrumentación.

6.10.3. SISTEMA DE CONTROL Y ADQUISICIÓN DE DATOS

El sistema de control y adquisición de datos son importantes en un proceso, ya que esto nos permite operar la planta y tomar decisiones frente a cualquier perturbación que se pueda generar; esto se logra a través del PLC marca Omron y la interface hombre máquina.

Para que un sistema de control sea confiable debe cumplir algunos requisitos siendo estos los siguientes:

➤ Flexibilidad.

El sistema de control y adquisición de datos debe permitir modificaciones o sustituciones de elementos en función de los cambios a los que pueda verse sometido la planta.

Esta flexibilidad en el diseño inicial permitirá acometer estas modificaciones con la menor incidencia posible en los sistemas de control y adquisición de datos

➤ Seguridad.

La producción y el manejo de un gas como el hidrógeno, con amplios rangos de inflamabilidad y detonabilidad, conllevan la aplicación de rigurosas medidas de seguridad tanto en el proceso en sí como en las instalaciones de las plantas. Es necesario que la respuesta a cualquier eventualidad se produzca en forma lo más rápida posible y afectando a cada uno de los componentes de la planta implicados. Esta premisa implica la existencia de unas variables de proceso críticas que es preciso medir de forma continua, conectando estas medidas con unos niveles de alarma en diversas etapas, con un mayor grado de actuación sobre la planta a medida que se avanza en esos niveles.

➤ Máxima información.

Es preciso disponer del máximo de información sobre los procesos que tienen lugar en el sistema. Esto se consigue con un número suficiente de medidas de variables de proceso a la entrada y salida de los principales equipos de la planta.

➤ Disponibilidad.

A fin de garantizar la operatividad de la planta, se ha previsto la utilización de componentes de tipo industrial

6.10.3.1. Adquisición de datos.

El objetivo principal de todo sistema de adquisición de datos se orienta a proporcionar el número de datos suficientes para

conocer el funcionamiento de la planta con la exactitud que requiera el proceso que en ella tenga lugar. Los datos se toman del proceso mediante sensores y son almacenados en un soporte adecuado para su posterior procesado y evaluación.

El sistema ha de tener un máximo de flexibilidad, soportando fácilmente ampliaciones o modificaciones sin tener que recurrir a soluciones costosas tanto en tiempo como en equipos.

Actualmente la planta cuenta con los suficientes canales de diversos tipos (temperatura, presión, caudal, nivel, etc.).

Variables medidas.

El control de la instalación, tanto del punto de vista de proceso como de la seguridad, requiere la toma de datos de determinadas variables de operación, que se unirán a las necesarias para conocer el funcionamiento de la planta.

A fin de establecer un mejor control del proceso, se miden y almacenan las siguientes variables.

- ✓ TC-232 Temperatura de recirculación de KOH.
- ✓ TC-111 Temperatura de H₂ a la salida del generador.
- ✓ TC-211 Temperatura de O₂ a la salida del generador.
- ✓ Nivel del agua en el separador lado hidrógeno.
- ✓ TC-305 Temperatura de mezcla de H₂ en O₂.
- ✓ TC-405 Temperatura de mezcla de O₂ en H₂.
- ✓ PT-325 Presión del sistema.
- ✓ DPT-328 Diferencial de presión entre sistemas.

- ✓ TC-382 Temperatura del deoxo lado H₂.
- ✓ PT-502 Presión del nitrógeno de inertización.
- ✓ RS-705 Conductividad del agua de alimentación.
- ✓ Ratio de flujo en %.
- ✓ Medición de flujo de H₂ en SLM
- ✓ TC-378 Presión de secador que regenera.
- ✓ DPR-2 % abertura válvula venteo lado O₂.
- ✓ DPR-1 % abertura válvula venteo lado H₂.
- ✓ Corriente medida DC.
- ✓ Corriente requerida DC.
- ✓ Horas de operación.

6.10.3.2. Control de procesos.

En condiciones normales, control y adquisición de datos son dos términos que se encuentran íntimamente relacionados puesto que las acciones de control se realizan gracias a los datos registrados por el sistema de adquisición, y el hardware empleado para el control suele ser el mismo tipo que el usado para la adquisición de datos.

En general, los requerimientos operacionales impuestos a la planta de producción de hidrógeno se pueden agrupar en los siguientes.

- ✓ Seguridad.
- ✓ Especificaciones de producto.

- ✓ Restricciones operacionales.
- ✓ Economía.

El cumplimiento de estos requisitos implica la necesidad de inspeccionar continuamente la operación de la planta y actuar sobre el proceso mediante un sistema de control. Este sistema de control ha de permitir:

- ✓ Minimizar y suprimir la influencia de perturbaciones externas sobre el proceso.
- ✓ Asegurar la estabilidad del sistema.
- ✓ Optimizar el rendimiento de la operación.

Más concretamente, los principales requisitos que debe de cumplir la operación de la planta de producción de hidrógeno son la seguridad, las restricciones operacionales y las especificaciones del producto de salida, H₂.

La condición de seguridad viene impuesta, como se ha comentado en otras secciones, por los amplios límites de detonabilidad e inflamabilidad que presenta el H₂ en mezclas con O₂ o aire. Con la instrumentación adecuada se ha de tomar medidas, continuamente, de la concentración de hidrógeno en la corriente de oxígeno, y viceversa, a fin de tomar las medidas adecuadas en caso se alcancen ciertos límites.

Las restricciones operacionales vienen impuestas por las condiciones de funcionamiento del electrolizador, en concreto, por el mantenimiento de una temperatura del electrolito por debajo de 61°C para una solución de KOH al 30 % en peso.

Las especificaciones del producto, cantidad y calidad del hidrógeno producido, están íntimamente relacionadas con el

caudal del agua de alimentación y la intensidad de corriente de la operación.

➤ **Variables controladas de proceso.**

Temperatura de operación.

La conductividad de la solución de KOH al 30 % en peso es máxima para temperaturas comprendidas entre 60 °C y 80°C. Ello implica una optimización del consumo de energía al disminuir las pérdidas óhmicas a través del electrolito.

A fin de controlar la temperatura de operación, y mantenerla por debajo de los límites admisibles, se utilizó un control con realimentación, midiendo la temperatura del electrolito a la salida del stack (temperatura de KOH que se separa en el separador y retorna al stack) y comparándola con un punto de consigna prefijado.

El proceso de electrólisis crea un exceso de calor que debe removerse a través de los intercambiadores de calor KOH (103, 203). El control de temperatura del KOH es una parte crítica en la operación del generador, tal como se muestra en la figura 38. Un flujo de agua de enfriamiento controla el sistema a través de la termocupla (232) en la línea de salida del intercambiador de calor (203), el PLC compara esta señal de entrada con el set point (61°C) y envía una señal de 4 mA – 20 mA al transductor I/P que convierte la señal eléctrica en neumática (3 psi – 15 psi) y es utilizado para la operación de la válvula de control (609), de esta manera se logra mantener la temperatura de proceso entre 63° C y 73°C.

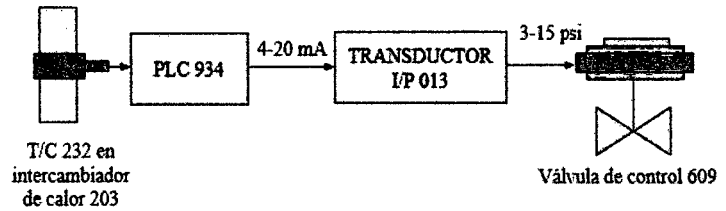


Figura 38. Control del flujo del agua de enfriamiento.

Normalmente se trata de mantener la temperatura de KOH en la salida del módulo entre 63°C a 73°C. Este variará con el flujo de gas producido en el generador. Cuando el generador opera a una baja temperatura de KOH produce una pérdida de la eficiencia y un alto consumo de energía. Operaciones continuas a temperaturas superiores a 73°C pueden acelerar la corrosión de los componentes del sistema. Una falla en el suministro adecuado del agua de enfriamiento causará una elevación en la temperatura del KOH y eventualmente se activará la alarma de parada. Un sobre enfriamiento en el módulo durante la operación de alta corriente también puede causar daños al módulo desde que la resistencia ha sido incrementada.

Agua de alimentación.

Referido a la figura 39. Para proporcionar agua de alta pureza al sistema, una bomba de desplazamiento rotativa de paletas (701) es usado. La bomba es de bajo flujo, alta presión, con una característica cercana al flujo constante. La capacidad es de 94,6 l/h; la bomba está localizada en la parte inferior debajo del gabinete del PLC. El motor de la bomba es 246 W trifásico. El motor es un diseño non-sparking, totalmente cerrado y enfriado por ventiladores.

El arranque del motor y el módulo de sobrecarga están localizados en la fuente de poder.

Como el generador consume agua, el nivel del líquido en la fase separadora podría descender, esta señal es medida por el transmisor 113. Cuando el nivel cae por debajo de 37 %, el PLC energiza el motor arrancando y abriendo la válvula 702. La bomba operará hasta que el nivel llegue a 47 %. Las válvulas check 703 y 707 son localizados en la línea que está entre la bomba y la fase separadora de hidrógeno. Estas válvulas junto con la válvula solenoide 702 aseguran que el gas hidrógeno no fluya en sentido contrario. Una operación inadecuada que ocasiona una caída del nivel por debajo del 20 % o por encima del 70 % podría causar que el PLC pare la bomba y el proceso de electrólisis.

Cuando el sistema no genera gas, el operador puede encender la bomba desde la pantalla táctil en forma manual. Todos los materiales del proceso excepto las paletas de la bomba son de acero inoxidable 316.

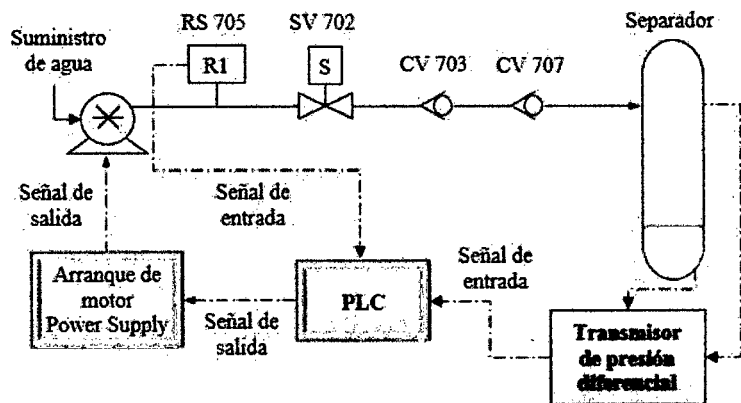


Figura 39. Control de nivel del líquido

Note que el proceso de adición de agua purificada solo ocurre en sistema de hidrogeno, esto se debe a la naturaleza del proceso básico de electrólisis que tiende a diluir el electrolito en el lado del oxígeno e incrementa la concentración del electrolito en el lado del hidrógeno, la adición de agua en el lado del hidrógeno neutralizar este efecto.

Control de presión y respuesta a la demanda de gas.

Referido a la figura 40. Los controles del generador EC-750 son diseñados para reaccionar inmediatamente frente a la demanda del usuario de hidrógeno u oxígeno. Esto se logra detectando cambios en los sistemas de presión que resulta del aumento o disminución del flujo y alterando la señal de control en la fuente de poder. El PLC recibe una señal de 4 mA - 20 mA del transmisor de presión 325 correspondiente a una escala de 0 bar a 20,6 bar. Los equipos están diseñados para que operen normalmente a una presión seteado de 9,6 bar (140 psi), pero Teledyne puede personalizar la presión entre 6,2 bar y 11 bar (90 psi y 160 psi). El PLC compara la presión actual del sistema con la presión seteada y envía señal análoga al tablero de control rectificado. Cuando esta señal se incrementa el rectificador controla el incremento en la proporción ascendente del SCRs, que resulta en un alto amperaje DC en el módulo. Como el sistema de presión se acerca a los valores fijados, la señal de salida disminuye y el modulo se estabiliza en la corriente correspondiente demandada por el usuario.

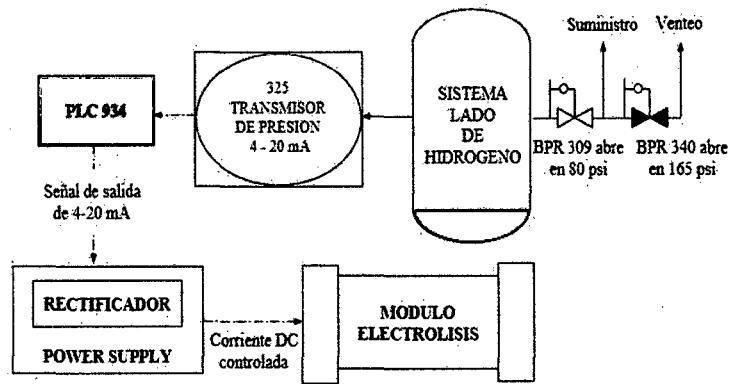


Figura 40. Control del sistema de presión.

Con el sistema operando a una temperatura normal, una repuesta al cambio (perturbación) en la demanda empezará en algunos segundos y dependiendo de la magnitud del cambio, se estabilizará en un tiempo de 1 min a 4 min aproximadamente. Con esta señal también se supervisa cuando la presión cae o está por debajo de la presión seteada, el generador entra en alarma.

Control de diferencial de presión.

El generador es pretendido operar sin diferencial de presión entre los lados de oxígeno e hidrógeno. El control de diferencial de presión (referido como delta de P) entre los sub-sistemas de hidrogeno y oxígeno es un aspecto esencial para la operación, este es efectuado con ambos componentes de operación: eléctrica y aire. Este sistema es extremadamente crítico, por esta razón, un suministro de potencia ininterrumpible UPS proporciona una potencia guardada (back up) a los controles de delta de P en caso que falle la potencia utilizada. Por ello no se debe apagar la UPS mientras el sistema está presurizado.

Los componentes usados para el control del diferencial de presión son:

- ✓ Un transmisor de presión diferencial 328 que proporciona una señal de salida de 4 mA - 20 mA correspondiente a la diferencia de presión entre los gases de hidrógeno y oxígeno.
- ✓ Un PLC que toma la señal proveniente del transmisor y la compara con el valor seteada proporcionalmente para generar una señal de salida 4 mA - 20 mA para controlar el sistema de delta P.
- ✓ Dos transductores de corriente a presión (018, 019) las cuales convierten las señales de 4 mA - 20 mA a señales de 3 psi -15 psi, para el veteo neumático del hidrógeno y oxígeno.
- ✓ Válvulas de veteo 330 y 340 cuya posición del vástago depende de la señal de salida del transductor respectivo (IP).

Los transductores de control 018 y 019 son de tal manera que una entrada de 4 mA a 20 mA crea una salida de 3 psi a 15 psi, lo que corresponde a las válvulas 430 y 330 una abertura del 0 % a 100 %. El rango de delta de presión del transmisor es de -20 in H₂O a 20 in H₂O equivalente a una salida de 4 mA - 20 mA del PLC. Los controles del PLC están fijados de tal manera que se mantenga un delta P entre -3 in H₂O (alto oxígeno) y +3 in H₂O (alto hidrógeno). El PLC detendrá el generador si el delta de P alcanza valores entre -10 in H₂O y +10 in H₂O.

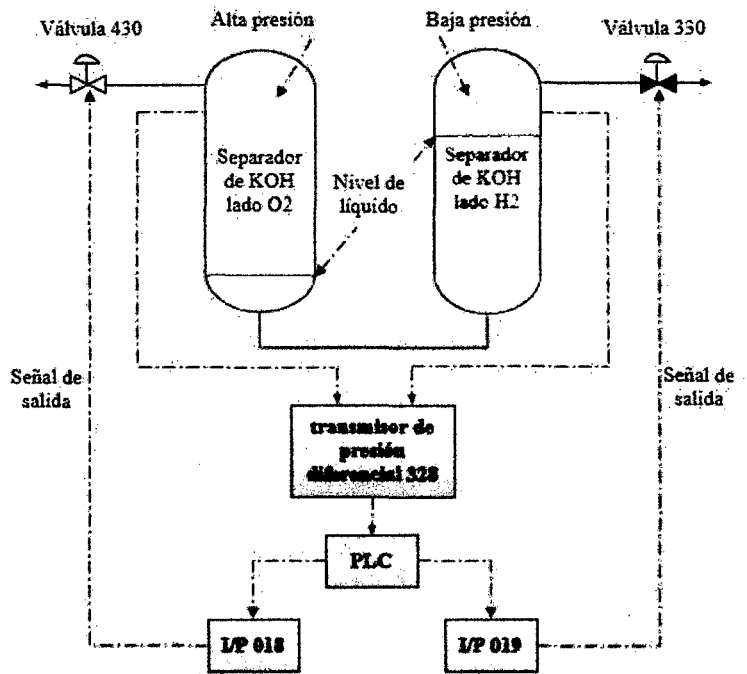


Figura 41. Control delta de presión - venteo de oxígeno.

Referido a la figura 41. Para un modo típico de entrega de hidrógeno, en este escenario la presión de oxígeno es típicamente más alta que la presión de hidrógeno. La válvula de venteo en el lado del oxígeno (430) está activada. El PLC está controlando de manera inversa, de tal manera que la señal de salida de la válvula de venteo (430) crece, mientras que la señal de presión desde el transmisor 328 decrece. Cuando el delta de P excede el valor seteado (-3 in H₂O), la señal de salida del PLC y el I/P 018 podrán incrementar la abertura de la válvula de venteo 430, causando que el oxígeno se venté del sistema provocando una disminución de la presión del oxígeno.

Aire de instrumentación a una presión de 20 psi es esencial para la operación correcta del control del diferencial de

presión en los subsistemas y debería estar siempre operativa mientras el generador está operando.

➤ **Variables controladas de seguridad.**

Detección de O₂ en H₂ e H₂ en O₂.

Cada flujo de gas es monitoreado por la presencia de otro gas usando una sonda especial que consiste de una termocupla tipo J el cual ha sido unido a un electrodo catalizador pequeño. El oxígeno e hidrogeno podrían combinarse en la superficie de prueba y causaría un incremento en la temperatura. Después de la fabricación, la prueba es verificada usando un 2 % de H₂ en una mezcla de gases de aire, por lo general la temperatura se elevará de 100 °C a 150 °C durante la calibración.

La señal de temperatura está conectada a la tarjeta de entrada del PLC. Si la temperatura excede a 200 °C el generador se detendrá.

El flujo apropiado sobre la sonda es importante en esta función. Para el lado de hidrógeno, oxígeno en la corriente de hidrógeno es medido a través del uso de un regulador de presión. El regulador 310 está en serie con un rotámetro y la sonda de gas 305. El gas es muestreado al ingreso del sistema de secado el cual necesita un filtro 303 para remover las impurezas y el KOH residual. En el lado de oxígeno, los mismos componentes son usados para detectar el hidrógeno en el flujo de oxígeno.

Tabla 21. Alarmas que generan parada de planta de hidrógeno

CONDICION DE PARADA	ACCIÓN	TAG	VALOR	
Temperatura de KOH lado H ₂	Parada/despresuriza	TC-111	75	°C
Temperatura de KOH lado O ₂	Parada/despresuriza	TC-211	75	°C
Alto contenido de H ₂ en O ₂	Parada/despresuriza	TC-305	200	°C
Alto contenido de O ₂ en H ₂	Parada/despresuriza	TC-405	200	°C
Baja presión de H ₂	Parada	PT-325	51	psi
Alta presión de H ₂	Parada/despresuriza	PT-325	165	psi
Activa alarma de baja presión de H ₂	Parada	PT-325	55	psi
Delta de P lado H ₂	Parada/despresuriza	DPT-328	10,0	in H ₂ O
Delta de P lado O ₂	Parada/despresuriza	DPT-328	-10,0	in H ₂ O
Tiempo de permanencia de activación delta P	Parada/despresuriza	DPT-328	10	s
Temperatura de tanque DEOXO	Parada/despresuriza	TC-382	200	°C
Tiempo de alarma de pre-presurización	Parada/despresuriza	PT-325	999,9	s
Tiempo de alarma en purga de parada	Parada/despresuriza	PT-325	999,9	s
Alto nivel de KOH	Parada/despresuriza	DPT-113	%	70
Bajo nivel de KOH	Parada/despresuriza	DPT-113	%	20
Bajo flujo de KOH lado H ₂	Parada/despresuriza	FS-109	-	-
Bajo flujo de KOH lado O ₂	Parada/despresuriza	FS-209	-	-
Problemas en la fuente de poder	Parada/despresuriza	-	-	-
Baja presión del aire de instrumentación	Parada	PT-502	70	Psig
Baja pureza del agua de alimentación	Parada	RS-705	1	µS
Problemas en el secador de hidrógeno	Parada	PT-378	30	min
Falla en UPS o baja batería	Parada/despresuriza	-	-	-

Fuente: Manual de Planta de H₂ - Teledyne.

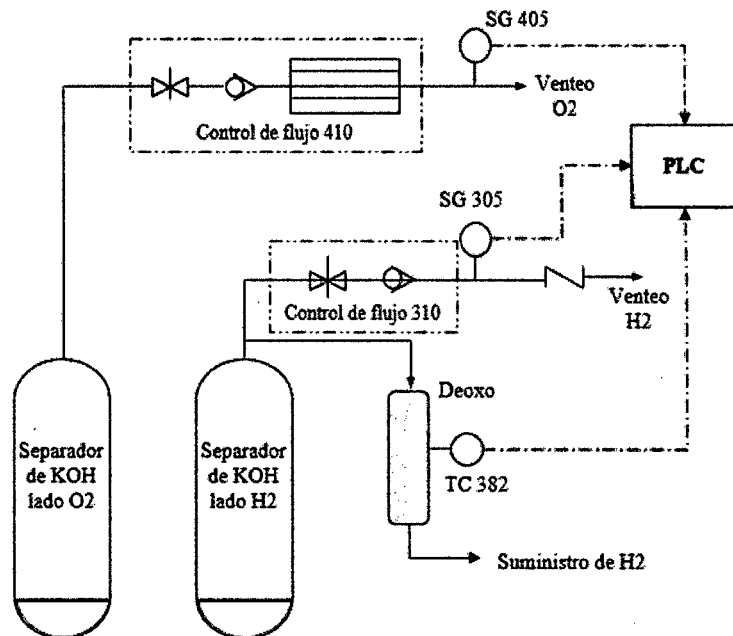


Figura 42. Sistema de detección de gases de O₂ en H₂ e H₂ en O₂.

6.11. EQUIPOS DE ALMACENAMIENTO.

Messer gases del Perú cuenta con equipos de almacenamiento^[16] que serán utilizados para almacenar hidrógeno UHP con la finalidad de ser utilizados para la purificación de argón crudo en los siguientes casos:

- ✓ Paradas intempestivas de Planta de hidrógeno.
- ✓ Paradas programadas para el mantenimiento predictivo.
- ✓ Para ventas de hidrógeno a granel (planes futuros).
- ✓ Para llenado de cilindros de hidrógeno UHP (planes futuros).

Los equipos de almacenamiento constan de dos buffer debidamente instalados en las carretas respectivas y con los manifold conectados para ser usado en cualquier momento. Las características de estos equipos de almacenamiento son los siguientes:

1. Buffer ZG-2462.

- ✓ Marca : Fiba Technologies.
- ✓ Tipo de equipo : 11 Tubos.
- ✓ Máxima presión de llenado : 189 bar.
- ✓ Máxima capacidad de llenado : 1200 m³.

2. Buffer ZI-8778.

- ✓ Marca : Fiba Technologies.
- ✓ Tipo de equipo : 3 Tubos.
- ✓ Máxima presión de llenado : 193 bar.
- ✓ Máxima capacidad de llenado : 1200 m³.

CAPITULO 7

PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DE PLANTA PRODUCTORA DE HIDRÓGENO UHP.

7.1. PLAN DE ENSAYOS PREVIOS AL ARRANQUE DE PLANTA ^[17].

Luego de culminado las instalaciones, se procede a realizar las verificaciones de los conductos de corriente y presión previos al arranque de planta.

7.1.1. POTENCIA ELÉCTRICA.

El control potencia es requerida para realizar pruebas preliminares. Esto energizara el PLC, pantalla táctil y los instrumentos eléctricos.

En la fuente de potencia, gire los potenciómetros de voltaje y corriente hasta el valor de cero y apague los circuitos de interruptores para las bombas de KOH, bombas de alimentación de agua y los calentadores de los secadores. Colocar el botón de parada de emergencia en el panel del generador en la posición de parada.

Usando procedimientos de seguridad de la planta, probar la potencia de la fuente de poder cerca de los circuitos apagados. El suministro potencia encenderá la luz de encendido (ON) y los ventiladores empezaran a trabajar.

En el gabinete del suministro de potencia, encender la UPS. La alarma sonará. En la pantalla táctil pulse el botón Alarma y pulse el botón “Silenciar alarma”.

Suministro de potencia ininterrumpible UPS.

La UPS muestra un LED que se displaya indicando el porcentaje de carga o capacidad de batería dependiendo del modo de operación. Esto también incluye pruebas de diagnóstico propios, una combinación de botones tales como encendido/ silenciador de alarma / prueba manual de batería y apagado.

Durante una operación normal la potencia utilizada proporciona energía a la UPS y esta mantiene la batería en un estado de carga completa. Los cuatro LEDs verdes indican un nivel aproximado de carga de 25 % en 25%.

La UPS proporciona un camino alternativo para utilizar la potencia a la carga conectada frente a eventos desagradables de un mal funcionamiento de la UPS. Si la UPS presenta los casos de una sobrecarga, una sobre temperatura o una condición de falla, la UPS automáticamente transferirá las cargas conectadas al bypass. Esto también causa que el generador se para y despresurizarse.

La operación bypass está indicada por una alarma y un LED iluminado de Bypass (otras LEDs pueden estar iluminadas a indicar problemas diagnosticados). Una señal de alarma es enviada al PLC para iniciar la despresurización. El sistema no puede reiniciar hasta que la UPS sea restaurada.

Para transferir manualmente la carga conectada desde el inversor al bypass, presionar una vez más el botón Standby.

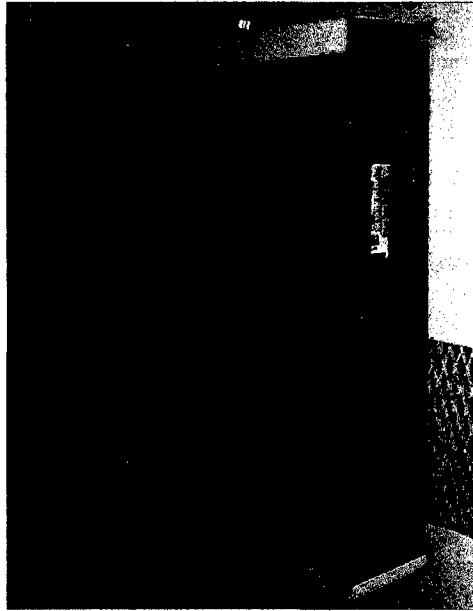


Figura 43. UPS Suministro de potencia ininterrumpible.

7.1.2. PANTALLA TÁCTIL DEL GENERADOR.

Note la pantalla del generador. La pantalla principal es la mostrada en la figura 44. Este proporciona un diagrama flujo de proceso simplificado con indicación de todos los parámetros críticos del proceso, tales como: temperatura KOH, presión del sistema, diferencial de presión, nivel de líquido, temperaturas de seguridad, estado de bombas y válvulas.

Cuando el generador está en estado "READY" (ver figura 44) como se ve en lado izquierdo al fondo, el generador está apagado y el operador puede prender las bombas KOH (y agregar agua de alimentación o inyectar nitrógeno desde otras pantallas) o iniciar la generación si no hay alarmas activadas. Un botón ABORT aparece si se presiona le botón START GENERATION y desaparece cuando la pre-presurización se ha completado. La figura 45 muestra la Pantalla del generador de gas una vez que generador está produciendo hidrogeno.

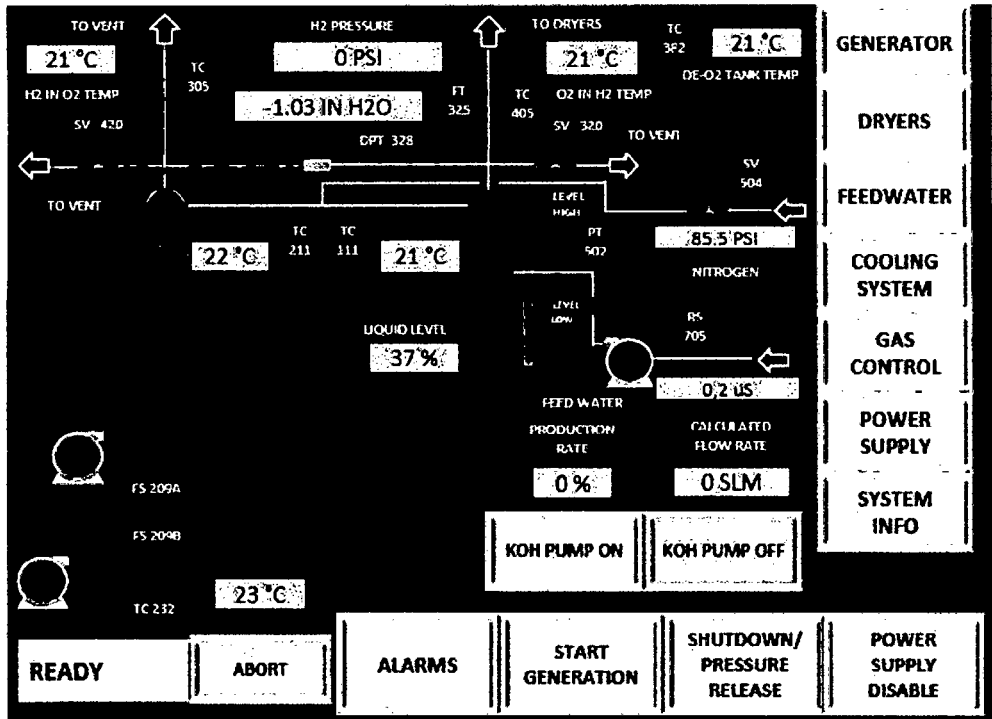


Figura 44. Pantalla del generador de gas – READY

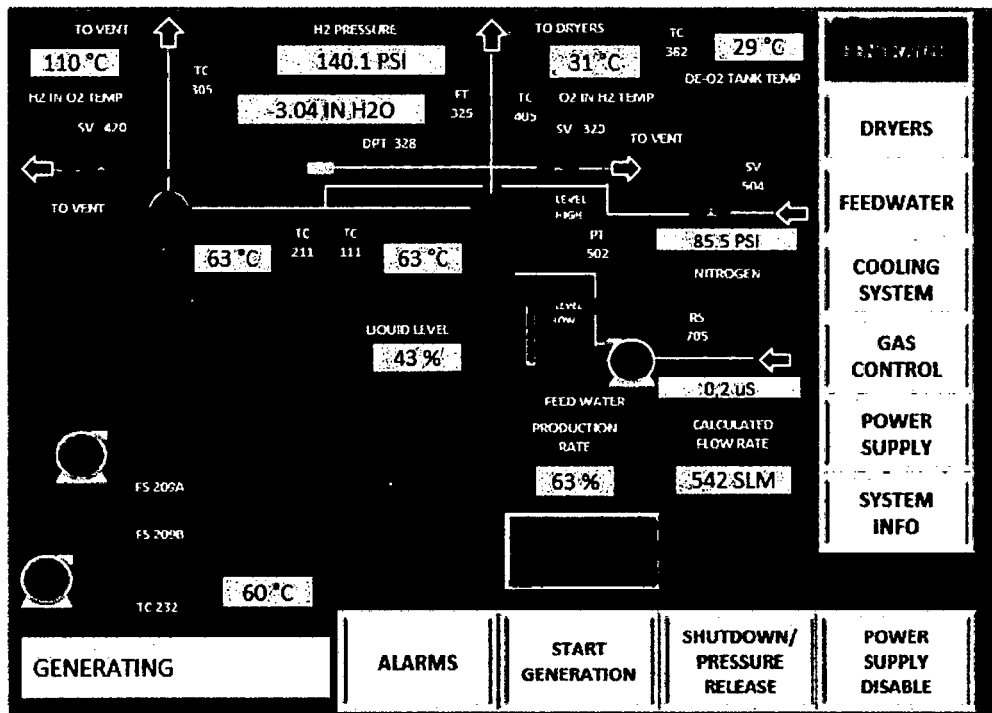


Figura 45 Pantalla del generador de gas – GENERATING.

7.1.3. VERIFICACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL GAS INERTE.

Durante condiciones normales de operación la purga de gas inerte es completamente automática y la purga manual no es necesaria. El nitrógeno puede ser agregado manualmente para una prueba de presión u otras razones. La función de suministro de gas inerte deberá ser verificada en esta vez. Abierta las válvulas para suministro de gas inerte, pulse el botón **SISTEM INFO** y luego el botón **MANUAL N₂ FILL AND VENT** (Botón manual de llenado y venteo de N₂), para tener acceso al control del gas inerte. Pulse el botón de **N₂ ON** y el sistema de válvulas de venteo se cerraran y la válvula 504 cambiará de posición. Estas pueden ser sentidas cuando el botón es activado. Verificar si hay flujo de gas inerte a través de válvulas 506 y 505 dentro de las fases separadoras. La presión del sistema deberá empezar a subir poco a poco y serán mostradas en la pantalla táctil.

7.1.4. ENTRADA DE AGUA DE ALIMENTACIÓN.

En esta etapa, el sentido de rotación de la bomba alimentadora de agua debe ser verificada. En la parte posterior del gabinete de gas se localiza la bomba/motor y la flecha del sentido de flujo se muestra en la carcasa de la bomba. Abrir las válvulas que suministran agua de alimentación a la interface del generador. En la conexión T cercana a la succión de la bomba, se localiza un tapón (no extraída), que permite el drenaje del agua de alimentación antes de encender la bomba. Esto asegurará que la bomba este húmeda y eliminará agua estancada de las tuberías de alimentación.

Seleccione la pantalla **FEED WATER** (alimentador de agua). Mientras esté mirando a través de las ranuras del adaptador de bomba/motor, pulse el botón **PRIME** y luego suéltelo. Si la dirección de rotación es incorrecta, dos de las tres fases deben ser invertidas. Esto es normalmente realizado en el cerco de control del suministro

de potencia. Cambie las guías en el arrancador del motor en el lado de entrada MS1.

7.1.5. ESTADO DE VÁLVULAS MANUALES DURANTE OPERACIÓN.

De un modo u otro, arrancando con KOH o llenando con agua para una prueba de presión, las válvulas manuales del sistema deberán ser verificados para un correcto funcionamiento. Las válvulas listadas en la Tabla 22, son para propósitos de mantenimiento y no son cambiadas durante la operación normal del generador. Se verifica, observando si estas válvulas están en posición apropiada de apertura o Cierre.

Tabla 22. Estado de válvulas manuales.

VÁLVULA	ACCIÓN	ESTADO
110	Purga	Cerrado
115	Homogenizar KOH	Abierto
210	Purga	Cerrado
117	Homogenizar KOH	Abierto
120	Purga	Cerrado
106	Salida de KOH de separador	Abierto
108	Entrada de KOH a módulo	Abierto
206	Salida de KOH de separador	Abierto
208	Entrada de KOH a módulo	Abierto
220	Purga	Cerrado

Fuente: Manual de Planta de H2 - Teledyne.

Otras válvulas manuales del sistema requieren un ajuste durante el arranque y serán tomados en cuenta para los procedimientos de arranque.

7.1.6. LLENADO Y RECIRCULACIÓN DE AGUA.

Después de la instalación o mantenimiento general, el generador deberá ser llenado con agua o una solución de KOH al 30 %. Esto ayuda a verificar el funcionamiento del bombeo de agua de alimentación y una prueba de presión del sistema. El uso de agua también ayudaría a remover alguna contaminación del sistema.

En la pantalla táctil encienda la bomba de agua de alimentación, presionando PRIME en la pantalla FEED WATER. Escuche el flujo de agua en la fase separadora del lado de hidrogeno. Cuando use agua desmineralizada, continúe llenando hasta que el nivel del líquido aproximadamente llegue al 40 %. En este momento, el operador, puede arrancar las bombas KOH, presione el botón de encendido de la bomba KOH (KOH PUMP ON).

Una vez pulsado el botón de arranque, las bombas correrán y forzarán el líquido hacia el módulo de la electrolisis. La redistribución del líquido causará que el nivel del mismo caiga hasta 20 %, causando que las bombas KOH se apaguen debido a una alarma de bajo nivel. Reseteo la alarma y encender la bomba de alimentación de agua. Repita los intentos de arrancar las bombas KOH cada vez que el nivel del líquido llegue aproximadamente al 40 %. Cuando el nivel del líquido es capaz de estar encima del 20 % las bombas KOH continuarían trabajando. El operador debe parar de agregar agua alimentación una vez que el nivel es estable y aproximadamente 40 %. Las bombas KOH pueden ser operadas una vez que haya líquido en el sistema, incluyendo durante la prueba de presión.

7.1.7. PRUEBA DE PRESIÓN EN EL SISTEMA.

Luego de instalado todo el sistema del generador EC, se procede a una prueba de presión del sistema usando gas inerte. Después de la prueba de presión, cierre la alimentación de gas inerte, en la pantalla táctil.

Los trabajos de mantenimiento y/o reparación requieren desconectar líneas de presión o conexiones de tuberías. Revise con agua jabonosa estas conexiones cuando el sistema está presurizado.

Una comprobación de las fugas una vez por año es recomendable. Use una solución jabonosa para comprobar las partes del sistema presurizado.

7.1.8. DESPRESURIZACIÓN DEL SISTEMA.

Cuando se pulsa el botón N2 OFF, ya no hay alimentación de gas. Pulse el botón DESPRESURIZACION (DESPRESSURIZE) para abrir el sistema de válvulas de venteo 320 y 420 e iniciar el venteo del gas. Si desea, cierre las válvulas de venteo, simplemente pulsando el botón N2 ON, luego inmediatamente pulse el botón N2 OFF. En este punto el gas inerte no fluirá y las válvulas de venteo se cerraran.

7.1.9. LLENADO Y RECIRCULACIÓN DEL ELECTROLITO.

Hay dos métodos básicos para el llenado del electrolito en el generador EC. El método recomendado es utilizar una bomba química pequeña para forzar el líquido dentro del separador de lado oxígeno. En el separador de la fase de oxígeno se ha adaptado una conexión en la parte superior para el uso de un embudo por donde el electrolito se puede verter.

Para un mantenimiento regular, fabricar un conjunto compuesta por un tanque de almacenamiento de KOH montado en un carro portátil con bomba química y tuberías.

Para llenar el electrolito se deben seguir los siguientes pasos:

- ✓ El sistema de aire de instrumentación debe estar en ON. El suministro de potencia y los controles (UPS) deben estar en ON. Esto energiza el instrumento del nivel del líquido y permite la operación de las bombas de electrólisis.
- ✓ Si una bomba química es utilizada, conecta el tubo de descarga al lado de la válvula 220 de drenaje del lado de

oxígeno o en la toma encima de la fase separadora lado oxígeno.

- ✓ Abrir las válvulas manuales 505 y 506 para que el transductor de presión diferencial 328 opere y ordene abrir las válvulas de venteo en el tope. Esto permite el desplazamiento de los gases cuando el líquido es bombeado dentro de generador EC.
- ✓ Energizar la bomba de químicos, abrir las válvulas 210 y 220, y una adición del líquido en el lado oxígeno se iniciará. Como el nivel de líquido alcanza la fase separadora, el líquido comienza a fluir hacia el lado del hidrógeno a través de la válvula 117. Como se inicia el llenado en la fase separadora de hidrógeno, el instrumento del nivel del líquido 113 indicará el nivel.
- ✓ Continúa adicionando el líquido hasta que el instrumento 113 de nivel marque aproximadamente 40 %.
- ✓ Energiza las bombas de electrolito pulsando KOH PUMP en la pantalla táctil. Normalmente, los primeros intentos para arrancar la bomba resulta en la redistribución del líquido (principalmente en el módulo), un descenso en el nivel del líquido, y una parada automática de las bombas debido al bajo nivel (o por debajo de 20 %).
- ✓ Continúe agregando el líquido hasta que las bombas de electrolito operen con un nivel de líquido estable entre 35 % - 40 %.
- ✓ Cierra las válvulas 210 y 220, y parar la bomba química.
- ✓ Desconecte las tuberías e instale el tapón de drenaje.

Después del drenado de agua y llenado del electrolito, se debe permitir que el KOH recircule por un espacio de 2 horas antes de iniciar el proceso de la electrólisis. Si el sistema es nuevo o se está iniciando el arranque con un módulo de reemplazo o se ha drenado

por varios días, se debe recircular por 8 horas. Se recomienda para mejorar el performance que el sistema recircule toda la noche, luego el sistema estará listo para operar el siguiente día.

7.2. ARRANQUE DE PLANTA DE HIDRÓGENO ^[17].

7.2.1. REVISIONES Y ACCIONES AL PRE-ARRANQUE.

1. Verificar los accesos de ventilación y si es necesario algún monitoreo externo.
2. Verifique que el suministro de aire de instrumentación esté alrededor de los 80 psi como indica en el regulador de presión 001. Verifique que la presión de instrumentación de control sea 20 psi como indica en el regulador 002.
3. Verifique el suministro de gas inerte en la interface del generador. Abrir la válvula de suministro. Verifique que las válvulas 505 y 506 estén abiertas para que permitan el paso del flujo del gas inerte a las fases separadoras.
4. Verifique el suministro del agua de alimentación a la interface del generador. Abrir las válvulas de suministro. Suelte la tapa ubicada en la T de la línea de succión de la bomba de agua de alimentación, y purgue el remanente de agua de alimentación que se acumula en las tuberías, esto mejorará el funcionamiento de la bomba y la calidad del agua.
5. Gire los potenciómetros de voltaje y corriente hasta el valor de cero.
6. Encienda el acceso de potencia al rectificador. Una luz blanca se encenderá en ON y los ventiladores se encenderán.
7. Encienda la UPS en el gabinete de suministro de potencia. La bocina sonará y la pantalla táctil se activará. La pantalla GENERATOR se mostrará en la pantalla táctil.
8. Pulse los botones ALARM y BUZEER OVERRIDE para silenciar la bocina.

9. Todos los LEDs de instrumentación y las luces de indicación mostrarán ON. El transmisor 113 indica el nivel de KOH. El transmisor 325 indicará la presión del sistema.
10. La concentración de KOH será verificada de tal manera que se mantenga en un rango normal de operación entre (28 % - 32 %) para la EC-750.

Revisar la condición de los rotámetros 310 y 410. Los reguladores y las válvulas de aguja deben estar abiertos para permitir el paso del flujo. Los ajustes más precisos están hechos con un sistema en una operación normal de presión.

Si el generador ha estado a la presión ambiental por algunos minutos. Se recomienda purgar algo de aire que hubiera migrado dentro del sistema. Esta purga se puede realizar presurizando el sistema con gas inerte a 15 psi luego se corta el ingreso de gas inerte para proceder a ventear el sistema. Repita este procedimiento varias veces. Como el flujo de gas inerte entra al sistema, el operador deberá supervisar cuidadosamente la temperatura de O₂ en H₂. Como el gas inerte fuerza al aire a salir del sistema y pasa por la sonda 310, la temperatura se incrementará. Si la temperatura se incrementa por encima de los 100 °C, se cierra el suministro de gas inerte y se inicia la despresurización del sistema. Cuando la temperatura cae cercana a la temperatura ambiental, se inicia de nuevo el ingreso de nitrógeno. El sistema estará listo para la generación de gas.

7.2.2. PROCEDIMIENTO DE ARRANQUE DEL GENERADOR.

1. Abrir las válvulas de descarga para recibir el hidrógeno. Esto podría involucrar temporalmente la derivación de los gases al sistema de veteo cuando el gas inerte está iniciando su purga.
2. Abrir las válvulas de agua de enfriamiento del condensador, tanto en el lado de entrada y salida. Las válvulas del condensador en el generador deben fijarse en una posición

parcialmente abierta, caso contrario regule para que el flujo en cada intercambiador de calor sea de 3,7 l/min aproximadamente o cada 2 vueltas de abertura. Ajuste los flujos de nuevo durante la operación.

3. Pulse el botón PRIME en la pantalla FEED WATER para encender la bomba de alimentación de agua por el lapso de 5 a 10 segundos para que fluya agua fresca por la sonda del agua de alimentación, esto mejorará la lectura de la calidad del agua.
4. En el panel del suministro de potencia, gire el potenciómetro de voltaje en la dirección de las agujas del reloj hasta el máximo valor seteado. Gire el potenciómetro de corriente entre 35 % - 100 %, para arrancar un sistema que se encontraba a la temperatura ambiental. Esto limitará la entrada de corriente DC para mantener por lo menos 100 A por módulo. Para esto es mejor operar el generador en modo automático.
5. Soltar el botón de la parada de emergencia hacia afuera, de tal manera que habilite la electrólisis.
6. Pulse el botón START GENERATION. Este borrará cualquier aviso de alarma e iniciará la secuencia de arranque automático.
7. El estado en el fondo izquierdo de la pantalla táctil se mostrará PRE-PRESSURIZATION.
8. El sistema de presurización y las válvulas 320, 420 pueden oírse cuando se van a la posición de cierre. A una presión prefijada las válvulas 320 y 420 se abrirán y se inicia la descarga de la presión, este ciclo se repite 2 veces. Cuando está fluyendo el gas inerte, el operador podrá verificar para un balance de flujo en cada lado observando la lectura del diferencial de presión. Si el diferencial de presión es alta en

- un lado (por encima del valor seteado), ajuste las válvulas manuales 505 y 506 con el gas inerte fluyendo.
9. Las bombas de KOH estarán corriendo. El arranque de la secuencia puede pararse presionando el botón ABORT en cualquier momento.
 10. Si las temperaturas en el sensor de gas son altas, el generador automáticamente se despresurizará y luego intentará presurizarse de nuevo. Si después de 15 minutos el sistema no habilita para el arranque, el generador permanecerá parado.
 11. Después que la pre-presurización se ha completado, habrá unos 15 segundos de pausa, luego la generación de gas comenzará. El control manual del gas inerte y el arranque/parada de las bombas de KOH no se mostrarán durante el proceso de la electrólisis. Los botones KOH PUMP OFF, MANUAL N2 FILL AND VENT y ABORT desaparecerán de las pantallas.
 12. El proceso puede detenerse en cualquier momento simplemente pulsando SHUTDOWN/PRESSURE RELEASE o POWER SUPPLY DISABLE en la pantalla táctil o EMERGENCY STOP en el panel de control debajo de la pantalla táctil. Solo pulsando SHUTDOWN/PRESSURE RELEASE se descarga la presión en el generador. Cuando el operador pulse cualquiera de estos botones, aparecerá una pantalla de confirmación en caso que el botón fue tocado casualmente.
 13. Después de aproximadamente de 15 segundos de operación, encender el circuitos de interruptores para el sistema se secadores y catalizadores.

7.2.3. PRECALENTAMIENTO DEL SISTEMA Y APROVECHAMIENTO DE LOS VALORES PREFIJADOS.

7.2.3.1. Presión y corrientes DC

Durante algunos minutos siguientes, el sistema de presión se incrementará y la temperatura de KOH empezará a subir. Cuando la presión esté entre 70 psi y 80 psi, el regulador 309 se abrirá y el gas empezará a fluir con facilidad.

En los primeros 5 a 10 minutos. La presión diferencial estará ligeramente alto en el lado de hidrógeno. Esto es debido a la presencia del gas inerte pesado en el lado del hidrogeno y a varios orificios pequeños en el sistema que son llenados por hidrógeno generando una restricción. Mientras en una situación de demanda de hidrógeno, el cambio en la presión diferencial (de más a menos) en el lado del oxígeno, es una indicación que el gas inerte se está eliminando del sistema.

El generador mandará lentamente la rampa a la corriente límite durante los primeros minutos y operará en la corriente máxima permitida por la rampa y la corriente DC seteado por el potenciómetro en el panel de suministro de potencia. Cuando la presión en el transmisor 325 está dentro de 1 psi o 2 psi del valor fijado (normalmente 140 psi), el generador automáticamente ajustará la producción para cumplir con la demanda.

Si la presión está por debajo del Set Point, la corriente subirá hasta alcanzar el valor seteado. La corriente está limitada por el valor seteado del potenciómetro, el cual está en términos de porcentaje del ratio del suministro de potencia. Este puede tomar algunos minutos para estabilizar la relación actual de presión y corriente basados en el set point y la demanda. Si la demanda se incrementa, el sistema de presión caerá y la corriente empezará a subir, después de algunos minutos el

sistema se estabilizará en una corriente alta. Si la demanda baja, el sistema de presión se incrementará y la corriente bajará y se estabilizará en un nivel bajo.

Cuando se está demandando más gas que el ratio de salida, La producción de gas estará limitada por la corriente o el voltaje del suministro de potencia. Cuando el sistema está totalmente caliente y estable, la corriente limitada por el potenciómetro podrá ajustarse a la corriente total. Si no hay demanda de gas, la corriente podrá caer a un 10 % del ratio promedio de salida (aproximadamente 100 A).

7.2.3.2. Control de temperatura de KOH.

Cuando la temperatura de KOH está fría, esta también limita la corriente. Esta rampa de corriente límite termina cuando la temperatura de entrada (232) de KOH alcanza los 55 °C. Si la presión está por debajo del set point, la corriente subirá hasta alcanzar el set point.

Cuando la temperatura de KOH está entre 1 °C o 2 °C del set point, la válvula del agua de enfriamiento iniciará su abertura para que fluya agua a través del circuito de intercambiadores de calor. El sistema se estabilizará y permanecerá entre 1 °C del set point establecido por Teledyne. La temperatura de KOH como se indica en la pantalla táctil de la T/C's 111 y 211 podrán variar en el rango de 60 °C a 73 °C, dependiendo de la demanda del sistema. Cuando el generador es operado a un flujo máximo, la temperatura no deberá exceder a 73 °C.

Los detalles del sistema de control de temperatura son mostrados la pantalla COOLING SYSTEM, que se muestra a continuación.

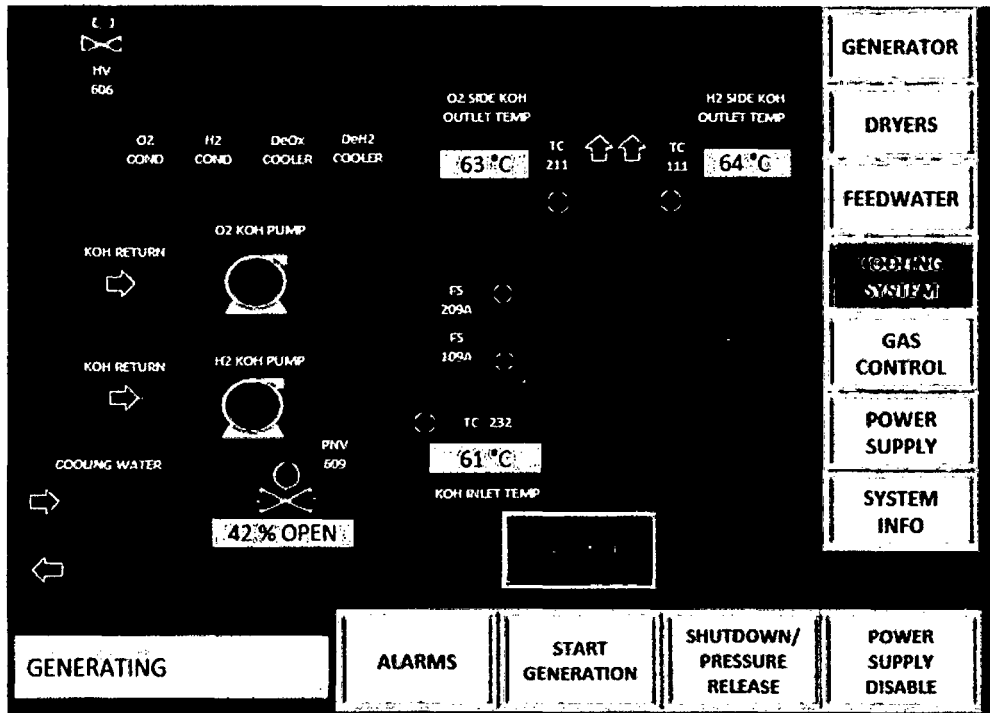


Figura 46. Pantalla del sistema de enfriamiento – COOLING SYSTEMS.

7.2.4. AJUSTES EN OPERACIÓN.

7.2.4.1. Control de flujo de gas hacia la sonda.

Cuando el sistema está alrededor de los 60 psi, verificar que los reguladores 310 y 410 estén controlando la presión del flujo entre los valores de 7 psi a 10 psi. Ajuste la válvula de aguja para obtener las lecturas correctas en la escala del rotámetro (indica cm^3/min de aire) como se muestra en el dato siguiente:

- ✓ Lado del Hidrógeno: 20 a 30 cm^3/min .
- ✓ Lado del oxígeno: 60 a 80 cm^3/min .

7.2.4.2. Flujo de agua hacia el condensador

El condensador de agua tiene inicialmente un valor seteado durante el procedimiento de pre-arranque. El valor seteado final depende de las condiciones del lugar incluyendo la temperatura del agua de enfriamiento. Se realiza un ajuste final solo después

que la máquina esté operando en un control de temperatura normal (61 °C a 73 °C).

Sienta en el tubo, la salida de gas en el lado de cada condensador. Este deberá estar cerca a la temperatura ambiental. Si el tubo está caliente cuando lo tocas, incrementa el flujo de agua de enfriamiento en pequeños cantidades. Espera dos o tres minutos y verifique otra vez. Otra regla general para el ajuste es que las temperaturas a la entrada y salida del agua en los condensadores deberán ser casi los mismos. Si la temperatura a la salida está a unos pocos grados por encima de la entrada, aumente el flujo de agua para todas las etapas.

7.2.5. CICLO NORMAL DE FUNCIONAMIENTO.

7.2.5.1. Purga de trampas de los filtros.

Cada 15 minutos, la válvula 372 y 374, cambiarán de estado por 5 segundos. Esto provocará que las trampas 373 se despresuriza y retiren una pequeña cantidad de vapor de agua a través del sistema de venteo. Cuando las válvulas regresan a su posición normal, el control neumático de las válvulas puede oírse cuando se desfoga la presión neumática.

7.2.5.2. Ciclo de regeneración de secadores.

El secado final del gas hidrógeno así como la remoción final de las trazas de oxígeno que pudiera permanecer ocurre en dos conjuntos de tanques secadores de 12,7 cm de diámetro ubicados aguas abajo del filtro coalescente 371. Los tanques son designados como 314A y 314B, 315A y 315B. Cada tanque contiene un conjunto alternativo de molécula sieve y catalizador de oxo. El catalizador provoca la recombinación de las trazas de moléculas de oxígeno con hidrógeno para formar vapor de agua. El vapor de agua junto con la humedad que lleva el hidrógeno es removido por el conjunto del sieve. El sistema podría

remover hasta lograr una humedad por debajo de 1 ppm en una típica operación de presión.

Cada vez que se cambia de secador, un ciclo de regeneración ocurre en el secador fuera de línea, siguiendo las siguientes etapas:

✓ **Calentamiento (60 minutos)**

En la primera hora de regeneración, elementos calentadores dentro de los tubos del secador fuera de línea son energizados, esto provoca que el sieve se dilate y descargue el vapor de agua atrapada

✓ **Enfriamiento (60 minutos)**

Luego los calentadores se apagan y una válvula 335 conectada en línea al secador se abre durante 60 min, este camino paralelo a través del orificio 334 incrementa el flujo de purga de hidrógeno y enfría los secadores.

✓ **Purga Lenta (210 minutos)**

Para las siguientes 3,5 horas, hay una pequeña purga de gas del secador que está en línea hacia el secador que está fuera de línea y continua la purga hacia el sistema de venteo.

✓ **Presurización (25 minutos)**

La válvula 335 se abre y la válvula 370 se cierra. Esto permite presurizar el secador fuera de línea preparando el sistema para que entre en servicio.

✓ **Paralelo (3 minutos).**

Cuando la presión del sistema y la presión del secador fuera de línea están cercanas (aproximadamente 16 psi) y esta es captada por el transmisor de presión 378 los secadores están listos para la siguiente etapa.

✓ **Despresurización (2 minutos).**

Tres minutos antes que se interrumpa el secado, la válvula 370 se abre, causando que el secador que va a quedar fuera de línea se despresurice quedando listo para el ciclo de regeneración.

Aquí la válvula 313 cambia de posición. Luego el ciclo se repite.

El operador puede ver toda la información relacionada a los secadores pulsando el botón DRYERS.

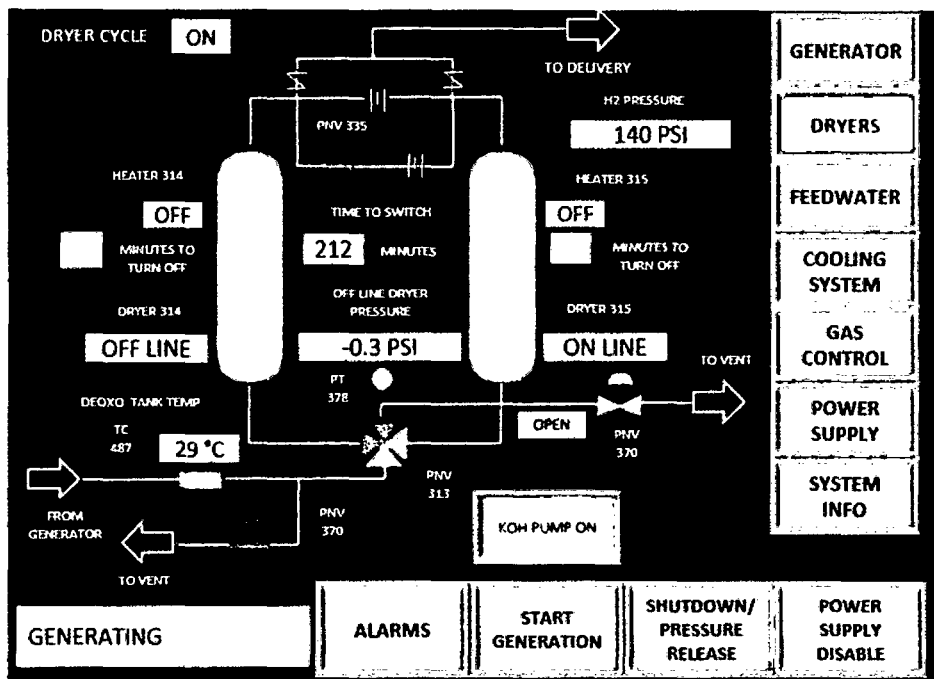


Figura 47. Pantalla del sistema de secado - DRYERS.

7.2.5.3. Adición de agua alimentación.

El PLC monitorea el nivel de líquido de KOH con el transductor de presión 113. El sistema bombea agua de alimentación a la fase separadora de H₂ cuando el nivel del líquido cae hasta el nivel mínimo de activación de la bomba. El tiempo y la frecuencia de llenado dependerán de la demanda del sistema.

Cuando la bomba es arrancada o parada por el PLC, el arrancador del motor MSI se oirá en la sala eléctrica. Cerca del gabinete de gas, revisar las válvulas 507 y 509 que pueden oírse cuando la bomba es parada. La figura 48 muestra todas las acciones, set point del nivel y el nivel actual.

Otras pantallas que proporcionan información útil durante la operación normal son: GAS CONTROL, POWER SUPPLY, SYSTEM INFO tal como se muestra en las figuras 49, 50 y 51.

La pantalla SYSTEM INFORMATION contiene y carga mucha información, en el display se muestra las horas acumuladas de la operación del generador. El operador puede cambiar las unidades de varias señales análogas (°C versus °F, etc.). Se puede tener acceso y operar el control manual del gas inerte y prender y apagar las bombas de KOH cuando el generador no está produciendo gas. También puede ver y fijar algunos instrumentos opcionales comprados con el generador EC.

Otro tema útil que se puede observar en la pantalla SYSTEM INFO es la gráfica de datos que guarda información importante de los parámetros. La figura 52, muestra la pantalla DATA LOGGING. Desde ahí el operador puede cambiar la vista de gráficas de tendencia de diferentes grupos de información. La figura 53, muestra un ejemplo de una pantalla típica mostrando los trends de información.

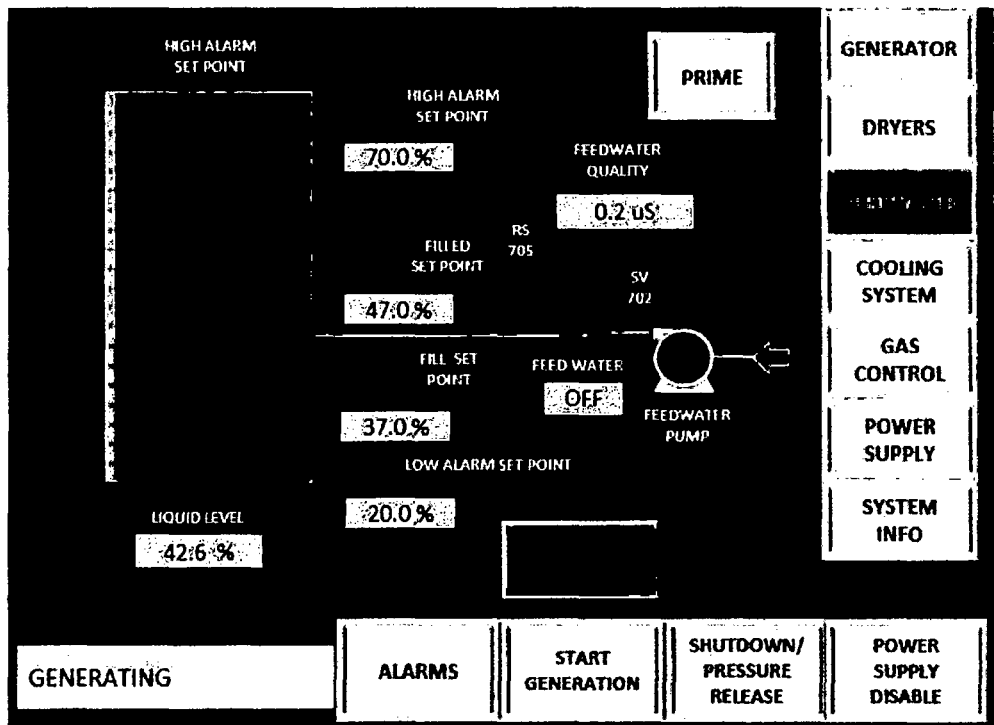


Figura 48. Pantalla de agua de alimentación – FEED WATER

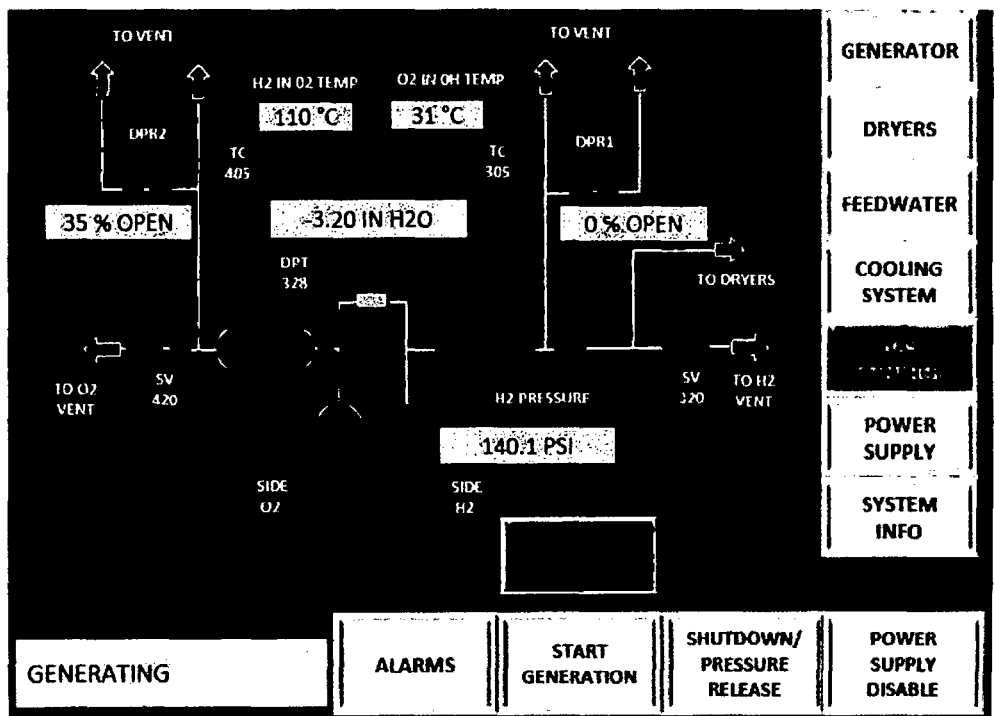


Figura 49. Pantalla de control de gases - GAS CONTROL.

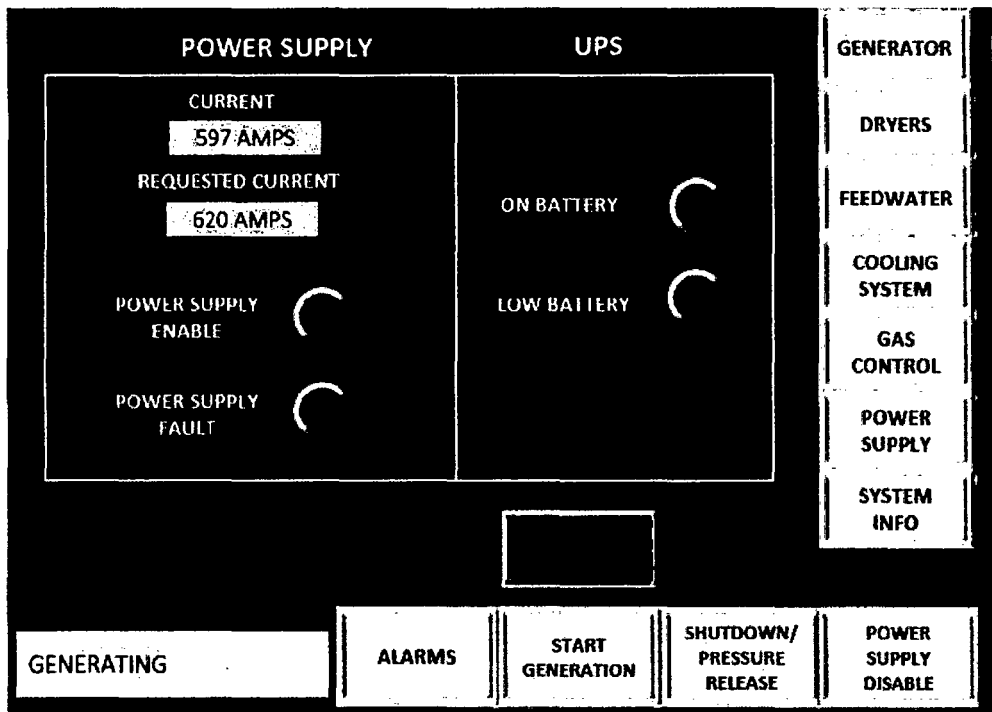


Figura 50. Pantalla de fuente de poder- POWER SUPPLY.

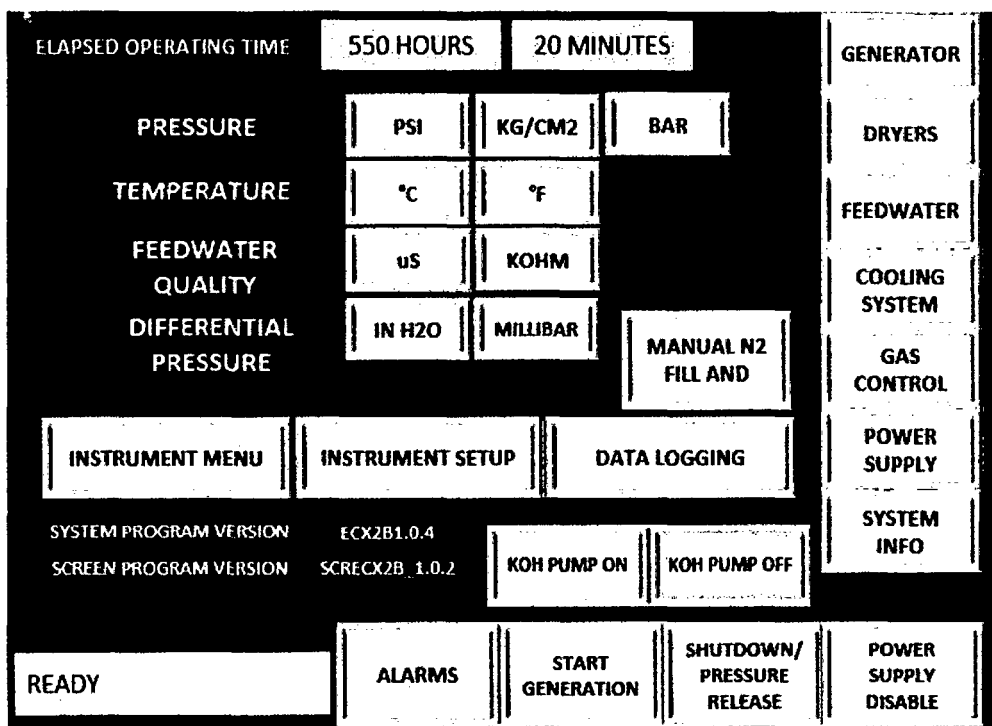


Figura 51. Pantalla de información del sistema - SYSTEM INFORMATION.

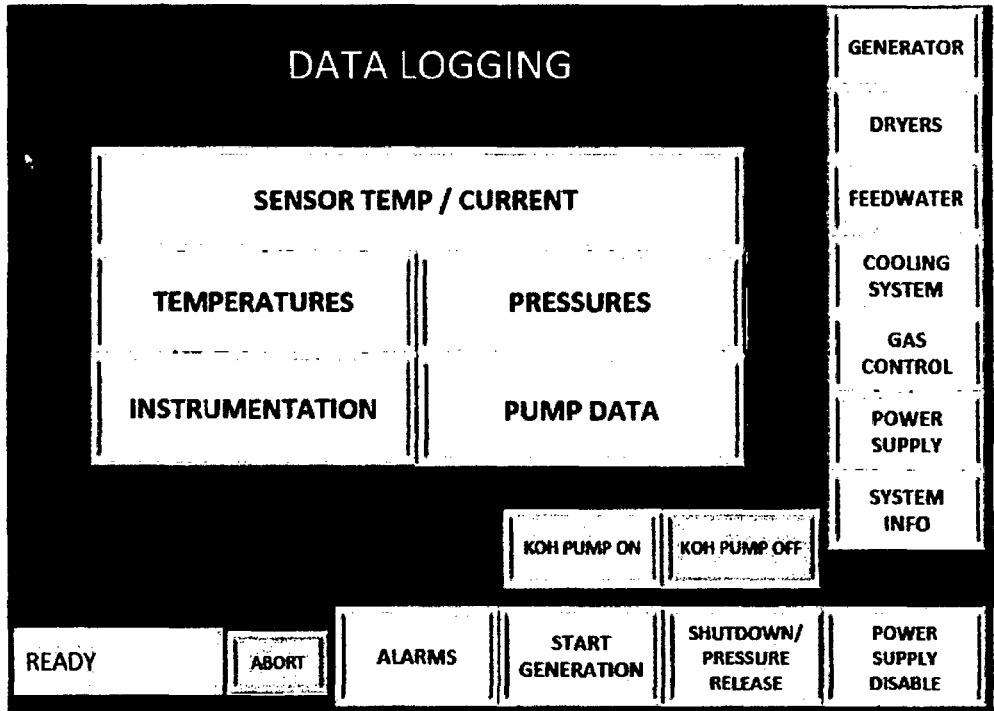


Figura 52. Pantalla DATA LOGGING.

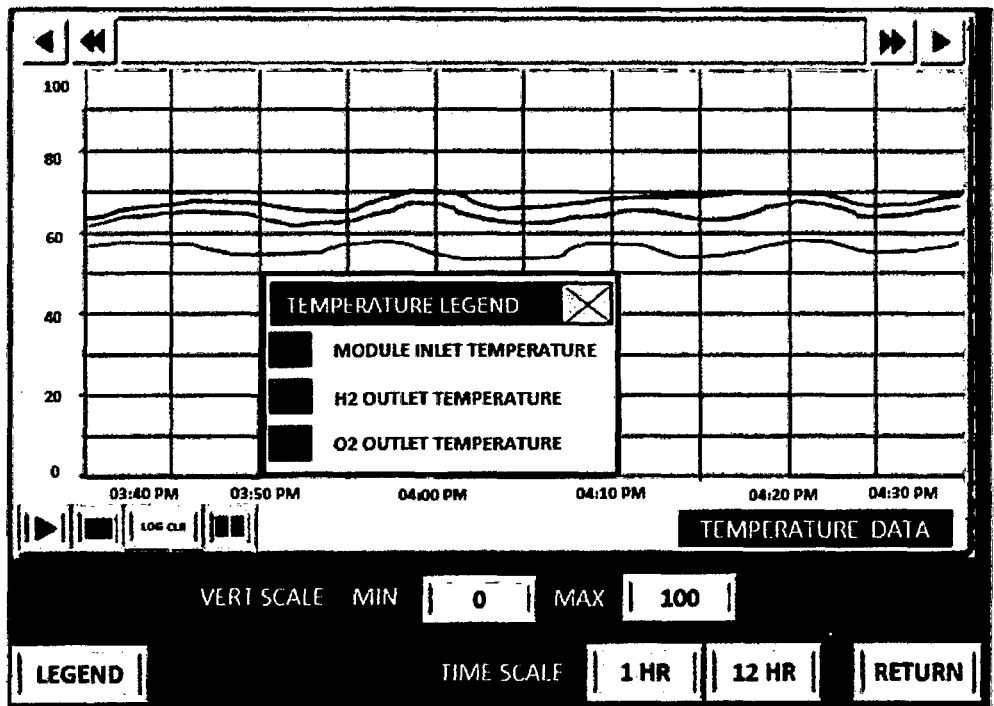


Figura 53. Pantalla de gráfica de tendencias - trend.

7.2.6. PARADA DEL PROCESO DE ELECTRÓLISIS.

7.2.6.1. Parada normal.

El operador puede pulsar el botón POWER SUPPLY DISABLE en cualquiera de las pantallas, esto provocará una interrupción en la corriente DC. El operador también puede pulsar el botón SHUTDOWN/PRESSURE RELEASE en cualquiera de las pantallas. Este podrá interrumpir la corriente y a la vez abre las válvulas de venteo 320 y 420 para despresurizar el sistema. En cualquiera de los casos, las bombas de KOH continuarán corriendo a menos que se pulse el botón de KOH PUMPS OFF. Cuando cualquiera de los dos botones es pulsado, una pantalla de confirmación aparecerá en el cual le preguntará si usted está seguro de parar la generación.

El operador también puede usar el pulsador manual de la parada de emergencia el cual detendrá la electrólisis. Este quizá se use si hay una orden o si se detecta un mal funcionamiento del generador, el resultado es igual como cuando pulsas el botón POWER SUPPLY DISABLE en la pantalla táctil.

Cuando el sistema se despresuriza, el generador irá a través de una despresurización automática incluyendo la purga del gas inerte, esto toma aproximadamente 10 minutos.

Si el sistema se tendrá parado por varias horas, el control de potencia podría pararse desde la UPS.

Esto podrá causar que las válvulas de venteo 320, 420 y 370 se cierren y con esto se logra minimizar que el aire sea arrastrado dentro del sistema.

En la fuente de poder, gire el potenciómetro de voltaje DC y de amperaje hasta el valor de cero. Si se desea parar para un mantenimiento, apague y aisle con un candado de seguridad el acceso a la potencia.

7.2.6.2. Condición de Alarma.

Si una situación anormal es encontrada, el PLC detendrá la electrólisis. La bomba de agua de alimentación se detendrá si estaba encendida durante la alarma. Las bombas de KOH continuarán corriendo a menos que el problema sea el bajo nivel de líquido, alto nivel del líquido o bajo flujo de recirculación. La pantalla táctil se moverá a la pantalla ALARM mostrando el error correspondiente. La pantalla mostrará una lista de alarmas con información de fecha y tiempo. La alarma que se encuentra en el tope es la alarma más reciente y es la alarma activa. El operador puede acceder a otras pantallas mientras esta en alarma, pero en cada una de estas pantallas el botón ALARM parpadeará de color rojo indicando que la alarma no ha sido borrada.

La alarma es reseteada presionando el botón START GENERATION. El botón ABORT puede presionarse si el operador no quiere restaurar el generador. Las alarmas para los instrumentos opcionales deben resetearse paralelamente con el botón INSTRUMENT ALARM RESET y la sirena se silenciará con el botón BUZZER OVERRIDE.

7.2.6.3. Pérdida de la potencia.

Durante la pérdida de la potencia, el sistema de control mantendrá la presión diferencial. Si la carga de batería de la UPS es insuficiente se tendrá 15 minutos para reponer la potencia antes que ocurra una alarma en la UPS. Una descarga de presión es iniciada mientras haya un remanente de potencia y la despresurización lenta se llevará a cabo hasta que la presión sea cero.

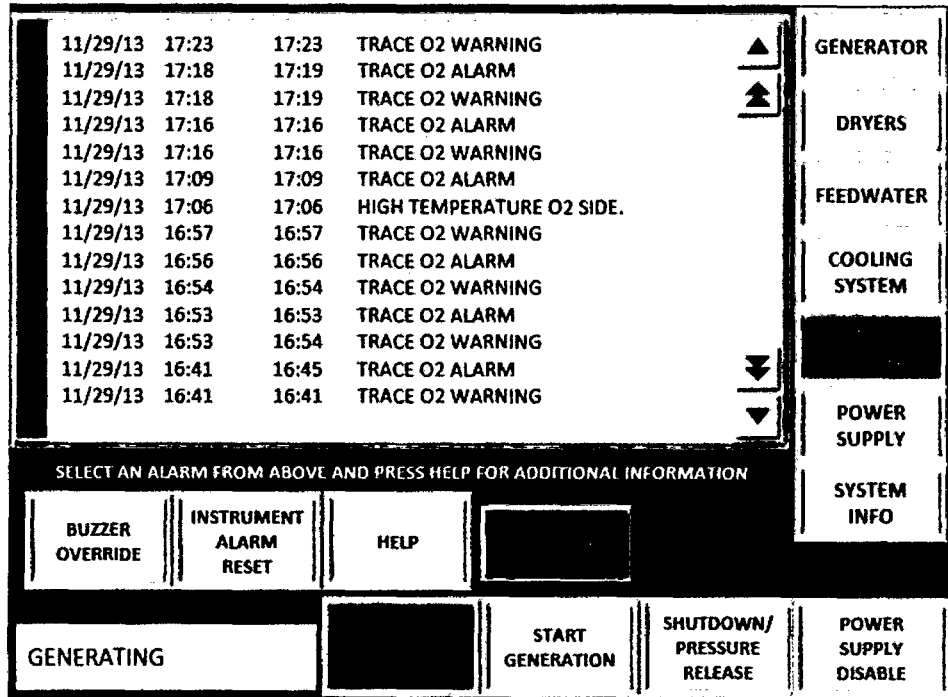


Figura 54. Pantalla de alarmas.

7.3. MONITOREO DEL GENERADOR Y RECOPIACIÓN DE DATOS.

El generador EC es diseñado para una operación en automático y responde a los cambios en la demanda del usuario final. Una práctica normal es la inspección de la máquina 1 o 2 veces cada 8 horas. En esta rutina de inspección se toma datos de la planta en línea para posterior almacenamiento ya que son de gran ayuda cuando haya problemas en la planta y se requiera de un historial para la comparación de datos y posterior solución del problema. El formato actual que se usa es el que se muestra en la tabla 23. Como se observa, los datos que se registran son los más importantes y por lo general son los que están anclados en el sistema como puntos de consigna y protecciones contra cualquier falla del sistema.

7.4. MANTENIMIENTO EN PLANTA DE HIDRÓGENO.

Esta sección proporciona información sobre las revisiones periódicas de los componentes, mantenimiento regular tales como el cambio de los filtros, y los procedimientos para el ajuste de los controles e instrumentos. La inspección periódica y el mantenimiento preventivo son esenciales para asegurar la operación del generador. El tiempo requerido para el mantenimiento rutinario de los equipos es el mínimo.

Son otros los factores que afectan en el tiempo de mantenimiento tales como: rendimiento del personal, calidad del agua de enfriamiento, el número de arranques y otros factores específicos pueden influir en los intervalos del mantenimiento. Se guardarán los archivos detallados de los datos de operación y la información de mantenimiento para ajustar los tiempos en los que un equipo queda fuera de servicio y minimizar el costo de los repuestos reemplazados.

7.4.1. FRECUENCIAS DE MANTENIMIENTO.

Teledyne recomienda el mantenimiento de las máquinas en los meses siguientes o de acuerdo a las horas de operación que se muestra. El tiempo aproximado requerido para cada máquina se muestra en paréntesis.

7.4.1.1. Revisiones semanales.

- ✓ Filtros del agua de enfriamiento.
- ✓ Filtros de las líneas de aire de instrumentación y trampas de humedad.
- ✓ Suministro de nitrógeno (como gas inerte) en Stand.by.

7.4.1.2. Mensualmente

- ✓ Revisión de la presión del suministro de aire de instrumentación/ajustes.

7.4.1.3. Cada tres meses (2000 horas).

- ✓ Verificar la concentración del electrolito KOH.
- ✓ Limpiar los cartuchos metálicos de filtro del electrolito.

- ✓ Verificar el funcionamiento del sensor de gas lado O₂/H₂.
- ✓ Verificar el funcionamiento de los interruptores de flujo lado O₂/H₂.

7.4.1.4. Cada seis meses (4000 horas).

- ✓ Servicio adicional cada tres meses.
- ✓ Reemplazo de los cartuchos de filtros coalescentes (2 horas).
- ✓ Mantenimiento/limpieza del orificio de los restrictores de flujo 304/334 y de las válvulas check del secador (30 minutos).
- ✓ Revisión de fugas de gas usando agua jabonosa (30 minutos).
- ✓ Procedimiento de torqueo del módulo (1 hora).
- ✓ Ajuste de los reguladores de presión del aire de instrumentación (15 minutos).

7.4.1.5. Cada año (8000 horas).

- ✓ Servicio adicional de tres meses.
- ✓ Servicio adicional de seis meses.
- ✓ Reemplazo del electrolito e inspección y limpieza de los intercambiadores de calor del electrolito (2 horas).
- ✓ Reemplazo del molecular sieve en las tubos de secado de los gases (4 horas).
- ✓ Inspección de los filtros reguladores del sistema de aire de instrumentación (15 minutos).
- ✓ Inspección y limpieza de los condensadores de gas (1 hora).
- ✓ Reemplazo del molecular sieve de los sensores de gas 303/403 (1 hora).
- ✓ Reemplazo de los filtros de gas del producto (30 minutos).

- ✓ Inspección y limpieza de las válvulas check (4 horas).
- ✓ Revisión de fugas en las válvulas de control (1 hora).
- ✓ Ajuste en el regulador de presión 340 por sobrepresión. (30 minutos).
- ✓ Revisión del interruptor de presión del aire de instrumentación (30 minutos).
- ✓ Limpieza e inspección interna del suministro de potencia (1 hora).
- ✓ Inspección y limpieza de las válvulas selenoides (4 horas).
- ✓ Inspección/limpieza del orificio de la trampa 375 (30 minutos).

Un trabajo conjunto con el área de mantenimiento no facilita la preparación de un plan de mantenimiento predictivo para evitar paradas intempestivas y retrasos en la producción, La tabla 24 muestra el plan anual de mantenimiento para la planta de hidrógeno.

7.5. PRECAUCIONES Y ADVERTENCIAS DE SEGURIDAD.

Después de una revisión al generador, es importante que las personas encargadas de operar esta planta se familiaricen con los peligros y precauciones de seguridad relacionados a este tipo de procesos. Es importante que se proporcione la información necesaria para protegerse contra los accidentes y/o peligros. El operador está obligado a revisar el sistema y la instalación general para ver las consideraciones de seguridad que se pudieran dar. Resulta de vital importancia que los procedimientos de seguridad y las etapas de implementación deben ser realizados por comisiones debidamente formadas.

Las consideraciones que se tienen que tener en planta generadoras de gas hidrógeno, están relacionadas con los siguientes peligros:

7.5.1. LIQUIDO CAÚSTICO.

Se debe tener los cuidados necesarios para evitar el contacto con el hidróxido de potasio KOH, ello puede ser nocivo e irritante a la piel y ojos. Si el contacto ocurre, neutralizar de inmediato con 5 % de solución de ácido bórico, lave suavemente con jabón y abundante agua potable. El hidróxido de potasio es muy volátil y un menor derrame en el camino o alrededor del generador puede ser peligroso. Neutralice el área derramada con ácido bórico, limpie con agua y luego seque.

Use lentes o protección facial cuando manipule KOH. Lentes normales de seguridad podrían no proteger contra la salpicadura. Cuando manipule KOH use guantes adecuados para aplicaciones caústicas fuertes, Un delantal es recomendado para proteger la piel y la ropa frente a salpicaduras repentinas.

Una estación de lava ojos debe ser instalada en el área. Para neutralizar un derrame o salpicadura, mantener en la zona un contenedor de unos 19 litros de una solución al 5 % de ácido bórico en agua en el área de trabajo.

7.5.2. GAS FLAMABLE.

Gas hidrógeno combinado con el gas oxígeno o aire puede encender una explosión violenta. Se debe tener el cuidado necesario para evitar que el gas hidrógeno se mezcle con esos gases antes mencionados. Se debe establecer un procedimiento para verificar periódicamente las fugas en las conexiones en las tuberías de gases y en las empaquetaduras de las válvulas.

La producción de gas hidrógeno puede iniciarse solo después de verificar que las precauciones normales contra la acumulación e ignición de hidrógeno hayan sido tomadas. Verificar que la construcción de la ventilación esté funcionando y que todo el calor o chispa producida por equipos han sido des energizados o eliminados.

Cuando el sistema está apagado, purgar con gas inerte para eliminar el hidrógeno del sistema. No abrir el lado del hidrógeno del sistema para mantenimiento sin haber purgado por completo el hidrógeno remanente.

7.5.3. OXIDANTE

El gas oxígeno favorece una combustión rápida. Los cuidados deben ser tomados cuando se esté trabajando o purgando el gas oxígeno.

7.5.4. ELÉCTRICO

Hay muchos voltajes operando en el sistema incluyendo la facilidad de un potencia trifásica (incluye la entrada al rectificador y voltaje de motor), voltaje de calentamiento del secador (240 VAC) voltaje para control del sistema (115 VAC) y el voltaje del módulos de electrólisis (encima de 280 VDC). Estos voltajes son letales y se requiere de una precaución extrema cuando esté operativo el sistema o se esté realizando el mantenimiento. Mantener protegidos el cerco en el lugar. Mantener cerrado la puerta del panel de control en el gabinete gas.

Nunca operar el generador sin la protección del policarbonato instalado, Utilizar normas eléctricas y procedimientos de seguridad específicas de la planta.

Asegúrese que todo el equipo se encuentre con una adecuada conexión a tierra.

Cuando se requiera realizar un trabajo de reparación eléctrica o ajustes que no requieran una fuente eléctrica, desbloquear la fuente de suministro principal bajando el contactor de la pared o con las llaves de seguridad haciendo uso de los procedimientos de seguridad de la planta. Verificar repetidamente (check list) la presencia de voltaje antes de maniobrar o trabajar en circuitos de alto voltaje.

7.5.5. GAS COMPRIMIDO.

El hidrógeno, oxígeno, aire de instrumentación y gas inerte opera en los sub-sistemas por encima de 11,7 bar y debe ser tratado con

precauciones apropiadas para gases presurizados. Use precauciones apropiadas de seguridad para el manejo de cilindros y/o reguladores. Usar anteojos de seguridad en el área de maquinarias.

El nitrógeno y las líneas de aire comprimido en la interface del generador no son despresurizados automáticamente cuando el generador está apagado. Use precauciones adecuadas para el desconectando de estas líneas.

Nunca intente ajustar o desajustar una tubería roscada mientras el sistema está presurizado.

7.5.6. ALTA TEMPERATURA.

El generador EC contiene tanques que operan a temperaturas por encima de la ambiental.

Los componentes con cargas electrolíticas y trampas asociadas a estos sistemas operan entre 60 °C y 70 °C, tener cuidado con estos componentes.

Mantenga cercos protectores para los tubos de secado. Tener cuidado al manipular estructuras metálicas alrededor de los tanques catalizadores y alrededor de los tubos de secado de gases, las temperaturas de estas superficies pueden exceder los 200 °C.

CAPITULO 8

COSTO DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO UHP.

8.1. INTRODUCCIÓN.

En esta sección se va a realizar los estudios relacionados al costo de producción de hidrógeno UHP que luego serán usados para el análisis económico de la purificación de argón crudo:

8.2. EQUIPOS.

Los equipos necesarios para la obtención de hidrógeno UHP a partir de electrólisis alcalina del agua haciendo uso de la corriente eléctrica de la red de Sider Perú (Central hidroeléctrica del Cañón del pato) los siguientes:

- ✓ Interruptor trifásico suministro de corriente alterna.
- ✓ Sistema de control de potencia: rectificador de corriente alterna para la obtención de corriente continua.
- ✓ Un bloque de celdas electrolíticas interconectadas en serie.
- ✓ Sistema para purificar el agua de alimentación (agua desionizada).
- ✓ Instalaciones para preparar y bombear constantemente el electrolito.
- ✓ Instalaciones para el agua de enfriamiento hacia condensadores e intercambiadores.
- ✓ Catalizadores para purificar el H₂.
- ✓ Instalaciones de secado, almacenamiento y distribución.

De acuerdo a los cálculos realizados anteriormente, se necesita una producción de 21 Nm³/h para la producción de 240 kg/h de argón UHP, para lo cual de acuerdo a las necesidades y las aplicaciones y/o ampliaciones futuras en la Planta ASU Messer Gases, se tomó la decisión de comprar una Planta generadora de gas hidrógeno por electrólisis alcalina de 42 Nm³/h a la empresa Teledyne Energy Systems.

8.3. INVERSIÓN.

El costo de la inversión para la realización de este proyecto es el costo de adquisición de los equipos descritos en el punto anterior, siendo el precio de adquisición de los mismos el siguiente:

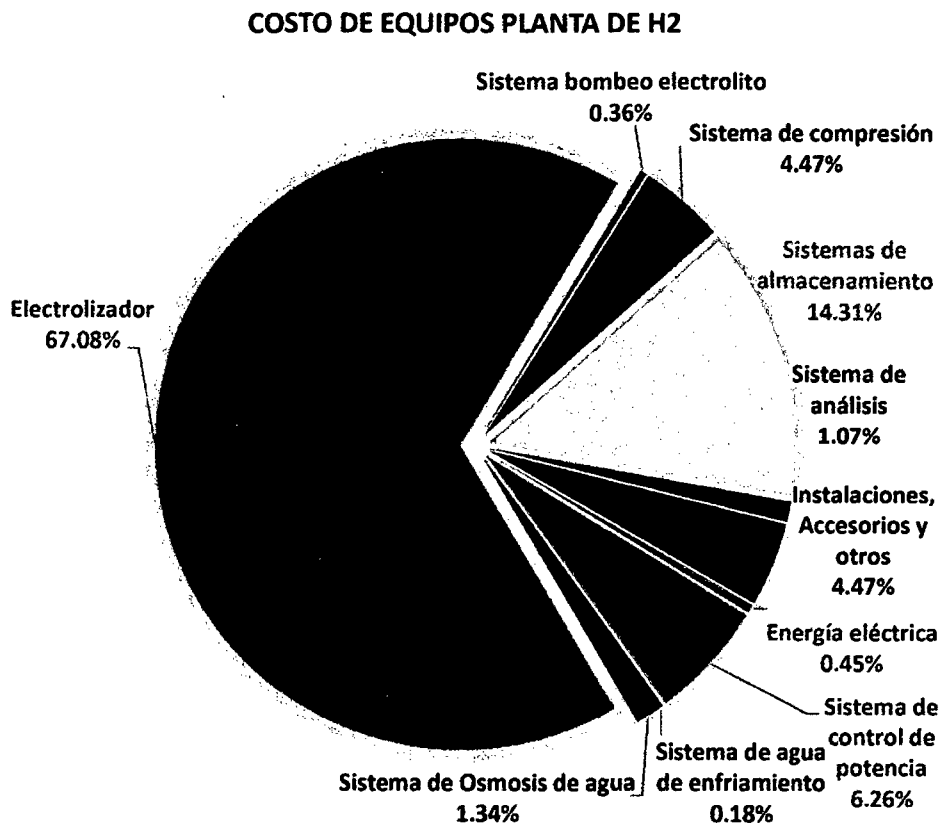


Figura 55. Composición porcentual de la inversión en equipos.

Tabla 26. Costos de adquisición de equipos Planta de Hidrógeno.

DESCRIPCIÓN	UNIDADES	PRECIO UNITARIO US\$	PRECIO TOTAL US\$
Sistema de energía eléctrica: interruptor trifásico	1	5 000,00	5 000,00
Sistema de control de potencia: rectificador de corriente alterna para la obtención de corriente continua.	1	70 000,00	70 000,00
Sistema de bombeo de agua de enfriamiento	1	2 000,00	2 000,00
Sistema de filtración Ósmosis de agua para la obtención de agua de baja conductividad.	1	15 000,00	15 000,00
Electrolizador: incluye stack de celdas electrolíticas, separadores, intercambiadores de calor, condensadores, recator de oxo, sistema de secado, panel de control.	1	750 000,00	750 000,00
Instalaciones para preparar y bombear el electrolito KOH	1	4 000,00	4 000,00
Instalaciones de compresión de hidrógeno	1	50 000,00	50 000,00
Instalaciones de suministro a deoxo, almacenamiento y distribución de hidrógeno a alta presión	2	80 000,00	160 000,00
Instrumentos: sistema de analizadores de impurezas de hidrógeno	2	6 000,00	12 000,00
Instalaciones accesorios y otros	1	50 000,00	50 000,00
<i>INVERSIÓN TOTAL EN EQUIPOS US\$</i>			1 118 000,00

Fuente: Información interna de la empresa.

8.4. PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO.

Partiendo que el factor limitante de la producción de hidrógeno es el argón crudo al 95 % de pureza que se quiere purificar, se instalará un electrolizador descrito en el apartado de equipos, Teledyne EC-750, para el cual se requiere una potencia de 280 kW.

Teniendo en cuenta que la energía requerida por este equipo para la producción de hidrógeno es de 6,8 kWh/Nm³. Partiendo que el consumo promedio de hidrógeno es de 0,13603 Nm³H₂/m³Ar (sin considerar el exceso de hidrógeno inyectado) y 0,0875 Nm³H₂/kgAr (considerando el exceso del 14 % de hidrógeno para asegurar la reacción de desoxigenación). Tendremos los siguientes resultados en cuanto a la producción anual de hidrógeno para la purificación del argón crudo al 95 % y la producción total anual de hidrógeno donde el resto del producto no utilizable será destinado a la comercialización en cilindros de diferentes capacidades (estudio realizado en otro proyecto).

Tabla 27. Ratios de consumo y productividad de hidrógeno.

TIPO DE ELECTROLIZADOR	TELEDYNE EC-750	
	valor	unidad
Energía producción unitaria	6,8	kWh/Nm ³
Número de electrolizadores	1	-
Número de celdas por electrolizador	121	-
Producción unitaria por electrolizador	42	Nm ³
Producción máxima diaria de H ₂	1 008	Nm ³ /día
Producción máxima anual de H ₂	367 920	Nm ³ /año
Producción máxima de Ar modo start/stop	1 204 500	Kg/año
Producción máxima de Ar modo continuo	2 102 400	Kg/año
Consumo máximo de H ₂ para Argón modo Start/stop	105 394	Nm ³ /año
Consumo máximo de H ₂ para Argón modo continuo	183 960	Nm ³ /año

Fuente: Información área de producción Messer Gases.

8.5. COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO.

Para este estudio se han considerado como costos de operación para el funcionamiento de la planta de hidrógeno, asumiendo una producción de argón en modo start/stop, los siguientes:

- ✓ **Consumos de agua de alimentación:** hemos estimado, según las especificaciones técnicas del fabricante del electrolizador, unas necesidades de volumen de agua de $1.0 \text{ l/Nm}^3 \text{ H}_2$ producido. Lo que supone un consumo anual de 105 394 l/año. Estimando un precio medio de mercado de compra de agua de 0.1 US\$/l tenemos un costo anual de 10 539,40 US\$.
- ✓ **Consumo de electrolito (KOH):** hemos estimado, según las especificaciones técnicas del fabricante del electrolizador, unas necesidades de peso de electrolito (85 % - 90 % de pureza) de $0.0011386 \text{ kg/Nm}^3 \text{ H}_2$ producido. Lo que supone un consumo anual de 120 kg/año. Estimando un precio medio de mercado de compra de KOH de 60 US\$/kg. Tenemos un costo anual de 7 200,00 US\$.
- ✓ **Tratamiento de agua de enfriamiento:** hemos estimado, según las especificaciones técnicas del fabricante del sistema de refrigeración del agua de enfriamiento para los intercambiadores y los condensadores, unos costos asociados de $0.062 \text{ US}/\text{m}^3$. Lo que supone un costo anual de 5 000,00 US\$.
- ✓ **Consumo de aire de instrumentación y gas inerte:** debido a la gran producción de nitrógeno gaseoso en planta ASU Messer Gases, se ha tomado la decisión de usar nitrógeno inerte como aire de instrumentación, según las especificaciones técnicas de la planta de producción de nitrógeno hemos estimado unos costos asociados de $0.04 \text{ US}/\text{kg N}_2$ y de acuerdo a las pruebas realizadas el consumo aproximado de nitrógeno como aire de instrumentación y como gas inerte es de aproximadamente 500 kg/día lo que hace un

consumo anual de 182 500 kg N₂/año, lo que supone un costo anual de 7 300,00 US\$.

- ✓ **Mano de obra:** Se ha considerado oportuno tener unos costos de mano de obra (formado por 2 supervisores de planta y 1 supervisor instrumentista) de 25 000,00 US\$/año con cargas sociales incluidas.
- ✓ **Fungibles y mantenimiento:** Se han considerado como costos de mantenimiento de las instalaciones un 4,0 % anual de la inversión inicial, los que supone una cantidad el primer año de 44 720.00 US\$.

Tabla 28. Costos de operación y mantenimiento de Planta de Hidrógeno.

DESCRIPCIÓN	COSTO TOTAL US\$
Consumo de agua de alimentación	10 539,40
Consumo de electrolito KOH.	7 200,00
Consumo de agua de enfriamiento.	5 000,00
Consumo de aire de instrumentación y gas inerte	7 300,00
Mano de obra.	25 000,00
Fungibles y mantenimiento 4 %	44 720,00
Costo total	99 759,40

Fuente: Información área de producción Messer Gases.

Con los siguientes datos se calcula el costo de producción de hidrógeno por metro cúbico, para realizar estos cálculos se considerará solo el 50 % del costo de la inversión ya que el resto de la inversión será considerado en otro proyecto que está relacionado con la venta de hidrógeno en cilindros como producto terminado.

La tabla 29, muestra que el costo de la producción de hidrógeno UHP es de 1.92 US\$/m³. Este dato será utilizado como costo de operación para la producción de argón UHP.

Tabla 29. Costo de producción de hidrógeno UHP.

UTILIZACIÓN DE HIDRÓGENO PARA PURIFICACIÓN				AÑOS										
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Capacidad máxima de producción	m ³ /h	42												
Producción máxima de argón en ASU	Th m ³	666	máx	645	666	666	666	666	666	666	666	666	666	666
Consumo necesario hidrógeno	Th m ³	18,3	m ³ /h	88	91	91	91	91	91	91	91	91	91	91
Pérdidas	Th m ³	14%		12	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
Producción necesaria	Th m ³			100	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103
Cap. Máxima de producción	Th m ³			367	367	367	367	367	367	367	367	367	367	367
Utilización de planta para Purificar Argón crudo	%			27	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28
COSTO DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO														
Eficiencia	kWh/m ³			7,14	7,14	7,14	7,14	7,14	7,14	7,14	7,14	7,14	7,14	7,14
Consumo de energía activa	Th kWh			715	738	738	738	738	738	738	738	738	738	738
Costo unitario	US\$/kWh			0,051	0,051	0,051	0,051	0,051	0,051	0,051	0,051	0,051	0,051	0,051
Costo de energía	Th US\$			36,5	37,6	37,6	37,6	37,6	37,6	37,6	37,6	37,6	37,6	37,6
Costo de operación	Th US\$			99,8	99,8	99,8	99,8	99,8	99,8	99,8	99,8	99,8	99,8	99,8
Costo total	Th US\$			136	137	137	137	137	137	137	137	137	137	137
Costo unitario de hidrógeno	US\$/m ³			1,36	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33
Costo unitario de capital	US\$/m ³	10%		1,12	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08
Total costo unitario de producción	US\$/m ³			2,48	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41
Total costo unitario de producción (50% capital)	US\$/m ³			1,92	1,87	1,87	1,87	1,87	1,87	1,87	1,87	1,87	1,87	1,87
Costo total de producción	Th US\$			248	249	249	249	249	249	249	249	249	249	249
Costo total de producción sin/capital	Th US\$			136	137	137	137	137	137	137	137	137	137	137
Costo total de producción + 50% cap	Th US\$			192	193	193	193	193	193	193	193	193	193	193

Nota: Th = 1000

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO 9

ANÁLISIS ECONÓMICO PLANTA DE PRODUCCIÓN DE ARGÓN UHP.

9.1. INVERSIONES.

9.1.1. GENERALIDADES.

Las inversiones que requieren un proyecto son los desembolsos que hay que efectuar desde la identificación de la idea y estudios de preinversión hasta los requerimientos de maquinarias, equipos, instalaciones, vehículos, capital de trabajo y otros a fin de dejar la planta en condiciones de operación normal.

El conocimiento del monto de inversión de un proyecto, permite descartar algunos que no se encuentran al alcance de los recursos financieros.

Las inversiones a utilizar en este como en cualquier proyecto de inversión, pueden agruparse en dos rubros: inversiones en activos fijos y en capital de trabajo. Ambas sumadas constituyen la inversión total del proyecto.

9.1.2. INVERSIÓN EN ACTIVOS FIJOS.

Son aquellos desembolsos de dinero que se efectúan para la adquisición de determinados activos, que van a servir para el normal funcionamiento de la planta. Así tenemos:

- ✓ Equipos para la producción en Planta APU (Unidad Purificadora de Argón).
- ✓ Equipos para el almacenamiento y distribución del argón líquido.
- ✓ Equipos para el envasado del argón en cilindros.

9.1.3. INVERSIÓN EN CAPITAL DE TRABAJO.

Se denominan así a las inversiones necesarias para mantener en marcha el proceso productivo y su posterior comercialización. Por lo tanto, es el capital que se requiere una vez finalizada la etapa de proyecto, construcción y puesta en marcha de la planta. Este capital está destinado a:

1. Materia prima.

El costo de materia prima para la producción de argón UHP serán considerados desde el punto de vista que al producir 240 kg de argón UHP, se deja de producir 500 kg de oxígeno o nitrógeno líquido, esto se logra con la finalidad de estabilizar la columna de argón crudo, es por ello que se asume un costo de materia prima de 0,30 US\$/m³ de argón crudo.

2. Mano de obra.

Como mano de obra serán considerados dos supervisores y un mecánico instrumentista para la Planta de producción de argón UHP, un conductor criogénico para la distribución del argón líquido, un envasador y un vendedor para el área de envasado, ello incluye lo siguiente:

- ✓ Sueldos.
- ✓ Alimentación.
- ✓ Atención a trabajadores.
- ✓ Costo total : US\$ 84 000,00 x año.

3. Gastos de fabricación.

a. Depreciación.

Estimada en un 10 % anual del costo de maquinarias y equipos.

- ✓ Costo total de maquinarias y equipos.
: US\$ 3 460 000,00

- ✓ Depreciación anual (10 % costo de maquinarias y equipos)

: US\$ 346 000,00 x año

b. Repuestos en general.

Los que se necesita para el mantenimiento anual, diferente a los del stock.

- ✓ Costo estimado de : US\$ 173 000,00 x año

c. Seguros.

Se deberán tomar los mismos por:

- ✓ Explosión e incendio de maquinarias y equipos.
- ✓ Responsabilidad civil.
- ✓ Robo.
- ✓ Maquinaria.
- ✓ Vehículos.
- ✓ Riesgo.
- ✓ Vida.
- ✓ Accidentes individuales.
- ✓ Costo estimado de : US\$ 15 000,00 x año.

d. Insumos.

Se consideran insumos aquellos que son considerados útiles para la producción de argón UHP. (Ver Anexo

E)

- ✓ Energía.
- ✓ Agua de enfriamiento.
- ✓ Hidrógeno UHP para purificación.
- ✓ Aire de instrumentación.
- ✓ Nitrógeno UHP para regeneración.
- ✓ Combustible para unidad móvil.
- ✓ Celdas y gases de calibración.
- ✓ Grasas lubricantes.

✓ Costo estimado de : US\$ 920 000,00 x año.

4. Gastos administrativos

a. Por administración y ventas.

Estos costos incluyen algunos costos administrativos y costos realizados por el personal de ventas y comisiones, por lo general se asume el 10 % de las ventas totales.

✓ Costo estimado de : US\$ 363 000,00 x año.

9.2. FINANCIAMIENTO.

9.2.1. GENERALIDADES.

La financiación del proyecto es una actividad sumamente importante que requiere especial atención para obtener las mejores ventajas de su aplicación.

Una adecuada financiación permitirá incrementar los beneficios del proyecto y mejorar su rentabilidad económica. Una desertada financiación, conllevará mayores costos financieros y probables problemas de liquidez que también se reflejarán en su rentabilidad pero con un efecto negativo.

El financiamiento de proyecto tiene como objetivo principal la obtención de recursos de capital en las mejores condiciones, de manera que contribuyan a incrementar la rentabilidad de la inversión.

9.2.2. FUENTES DE FINANCIAMIENTO.

Para este proyecto existen muchas fuentes de financiamiento, así como:

- ✓ Banca individual.
- ✓ Banca grupal.
- ✓ Accionistas.
- ✓ Recursos propios.

Entre estos y haciendo referencia a que es una alternativa de inversión, la fuente de financiamiento más oportuno sería utilizando

los recursos propios, los mismos que tendrán un costo de acuerdo a la tasa de descuento bancaria de 12,0 % anual.

9.3. EVALUACIÓN ECONÓMICA.

9.3.1. GENERALIDADES.

Todo proyecto o conjunto de ellos deberán ser necesariamente evaluados, esto indicará si los mismos cumplirán con las expectativas perseguidas, así como si son o no rentables.

Son aplicables diversos criterios referidos a la evaluación del proyecto, los mismos que indicarán en cierta forma la rentabilidad, Cabe considerar para éste que el valor residual al término del horizonte de planeamiento será nulo por política propia de la empresa ejecutora.

9.3.2. CRITERIOS DE EVALUACIÓN.

Los criterios de evaluación son índices que nos permiten determinar si un proyecto es rentable.

La tabla 31 muestra el flujo de caja proyectada a partir de las cuales se realizarán los criterios de evaluación de las inversiones tales como el VAN, TIR, Punto de equilibrio, etc.

9.3.2.1. Valor actual neto VAN/VPN.

Este método consiste en determinar la suma actualizada con la tasa de descuento de los flujos netos de fondos (FNF's) de todo el horizonte del planeamiento, los parámetros del VAN son la tasa de descuento TD y el año al cual se actualizan los FNF's, generalmente el año cero.

El VAN es un número que reemplaza a un perfil de FNF's. El proyecto será factible y aceptable, si el valor actual neto es positivo y se rechaza en caso contrario.

Tomando:

$$VAN = \frac{Vf}{(1+i)^n}$$

(Ec. 9.1)

De los datos calculados del flujo de caja proyectada, se procede a realizar la evaluación del VAN tal como se muestra en la tabla siguiente:

Tabla 32. Cálculo del Valor Actual Neto VAN

<i>AÑO</i>	$1/(1.120)^n$	<i>UTILIDAD</i> <i>ThUS\$</i>	<i>VAN</i> <i>ThUS\$</i>	<i>VPNA</i> <i>ThUS\$</i>
0	1,00000	-3 460	-3 460	-3 460
1	0,89286	1 007	899	-2 561
2	0,79719	1 478	1 178	-1 383
3	0,71178	1 478	1 052	-331
4	0,63552	1 478	939	608
5	0,56743	1 478	838	1 446
6	0,50663	1 478	749	2 195
7	0,45235	1 478	668	2 863
8	0,40388	1 478	597	3 460
9	0,36061	1 478	533	3 993
10	0,32197	1 893	609	4 602
<i>Valor presente neto VPN</i>			<i>4 602</i>	<i>-</i>

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa el valor presente neto es positivo y dicho proyecto será aceptable.

9.3.2.2. Tasa interna de retorno TIR.

La misma que puede definirse como aquella que hace nulo el Valor Actual Neto, o sea que es la tasa para lo cual los valores actualizados de los beneficios netos coinciden con el valor actualizado de la inversión.

Un proyecto es aceptable cuando su Tasa Interna de Retorno (TIR) es superior a la tasa referida al costo de capital. A continuación se muestran la gráfica para la obtención de la TIR. (Ver anexo E).

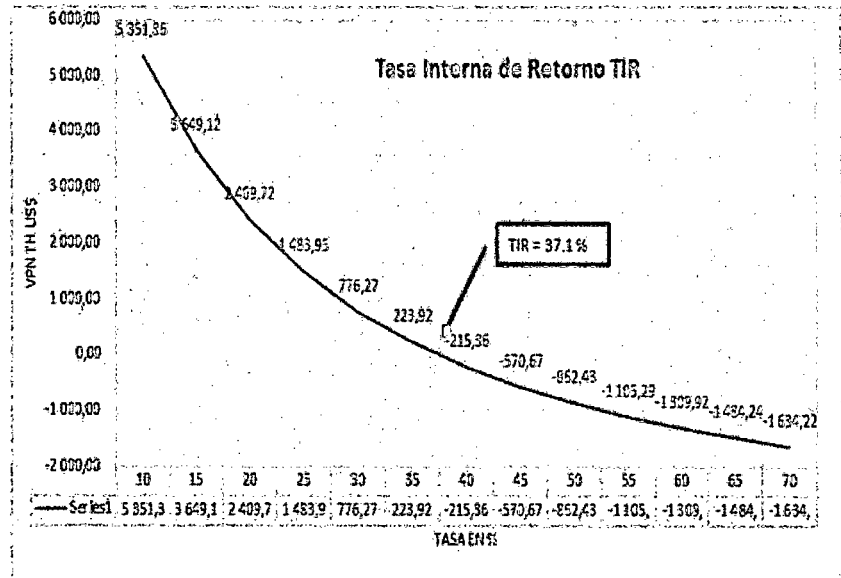


Figura 56. Tasa interna de retorno TIR.

Para la siguiente evaluación se tendrán que considerar lo siguiente:

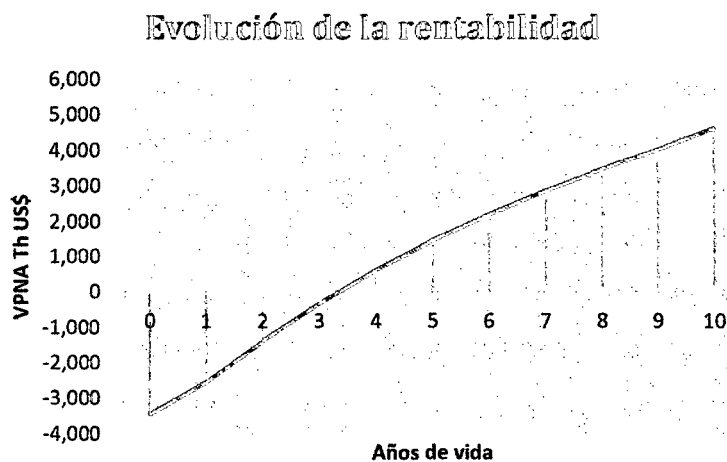
- ✓ $\Sigma VAN = US\$ 4\,602\,000,00$
- ✓ Inversión Inicial = US\$ 3 460 000,00
- ✓ Tasa de rentabilidad mínima = 12,0 % anual.

De la figura 56, se observa que la TIR es 37,1 % siendo una tasa tractiva, resulta ser un proyecto aceptable.

9.3.2.3. Valor Presente Neto Acumulado VPNA.

El Valor Presente Neto Acumulado es el VPN de los n primeros años de vida del proyecto, en otras palabras es el VPN de los flujos comprendidos desde el año 0 hasta el año n inclusive. El VPNA muestra el comportamiento o evolución de la rentabilidad del proyecto con el tiempo.

Graficando los valores de la tabla 32, se obtiene los siguientes resultados.



Grafica 57. Valor presente neto acumulado y periodo de recuperacion

De la tabla 32 y de la figura 57 se aprecia el progreso de la rentabilidad económica VPNA con el transcurso de los años, se observa que el VPNA es negativo hasta el año 3, después es positivo, lo que quiere decir que recién después del año 4 se genera rentabilidad.

9.3.2.4. Punto de equilibrio.

Se entiende por un punto de equilibrio al volumen que es necesario comercializar para no incurrir ni en pérdidas ni en ganancias.

Por definición:

$$\text{UTILIDAD}(U) = \text{INGRESOS}(I) - \text{COSTOS}(C)$$

V_0 : Volumen de ventas mínimos para $I = C$.

En el punto de equilibrio: $I = C$.

Luego:

$$p \times V_0 = CF + CV \tag{Ec. 9.2}$$

$$V_0 = \frac{CF+CV}{p} = \frac{\text{Costos totales}}{p} \quad (\text{Ec. 9.3})$$

A continuación se presentan los respectivos puntos de equilibrio (P.E).

Tabla 33. Cálculo del punto de equilibrio.

AÑO	Costo Total ThUS\$	Punto de equilibrio Th m ³	Cantidad disponible Th m ³	Utilización de C.D
0	-	-	-	-
1	1 385,87	213,21	586,00	36,4%
2	1 413,46	217,46	605,00	35,9%
3	1 413,46	217,46	605,00	35,9%
4	1 413,46	217,46	605,00	35,9%
5	1 413,46	217,46	605,00	35,9%
6	1 413,46	217,46	605,00	35,9%
7	1 413,46	217,46	605,00	35,9%
8	1 413,46	217,46	605,00	35,9%
9	1 413,46	217,46	605,00	35,9%
10	1 413,46	217,46	605,00	35,9%

Fuente: Elaboración propia.

Es útil determinar los puntos de equilibrio por cuanto determina los puntos de nivelación; es decir, aquellos valores para los cuales el proyecto comienza a dar utilidades.

Cuanto más bajo es este nivel, tanto más atractivo será el proyecto en estudio y menor el riesgo que se afronta.

Como se muestra en la tabla 33 los puntos de equilibrio están muy por debajo de las cantidades disponibles, siendo para este análisis un proyecto aceptable.

9.3.2.5. Relación Beneficio/Costo (B/C).

La relación beneficio/costo se calcula de la siguiente manera:

$$B/C_{TD} = \frac{VP \text{ Ing}_{TD,0}}{VP \text{ Egr}_{TD,0}} = \frac{\sum \text{Ing}_j / (1+TD)^j}{\sum \text{Egr}_j / (1+TD)^j}$$

(Ec. 9.4)

$$VP \text{ Ing}_{TD,0} = 21\,089\,000.$$

$$VP \text{ Egr}_{TD,0} = 7\,962\,000.$$

$$\text{Relación } B/C_{TD,0} = 2,64.$$

Al resultar la relación B/C mayor que 1,0; se concluye que el proyecto es rentable.

CAPITULO 10

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

10.1. CONCLUSIONES.

1. La factibilidad técnica de purificación de argón crudo al 95 % haciendo uso de hidrógeno UHP dieron resultados satisfactorios en cuanto a rendimiento de purificación.
2. El estudio de mercado realizado para el consumo de argón en diversas presentaciones dieron como resultado un ambiente alentador para la aceptación de dicho proyecto, siendo así la producción de argón UHP en modo start/stop de 665 919 m³/año y en operación continua de 1 162 332 m³/año.
3. Como consecuencia de la producción de argón UHP en Planta ASU, se genera un ahorro de 0,64 US\$/m³ en comparación con la importación de argón UHP que realizaba la empresa para satisfacer las necesidades de los clientes.
4. Para los cálculos respectivos, el precio se ha fijado en US\$ 6,20 por metro cúbico de argón UHP, con lo cual se destina una ganancia de US\$ 1 000 077,00 anuales.
5. Se ha tomado la decisión de comprar una Planta de producción de hidrógeno UHP por el método de la electrólisis alcalina, con esto se logra obtener un ahorro de 2.08 US\$/m³ frente a la compra de hidrógeno STD del mercado nacional.
6. De acuerdo a la evaluación económica, se concluye que el proyecto es rentable con un VPN de Th US\$ 4 602,00 del periodo cero (presente). La TIR de 37,1 % > 12,0 %; lo cual indica que el rendimiento del proyecto es mayor al costo de capital de los accionistas por lo que el proyecto es viable. La relación B/C = 2,64 > 1,0; lo cual nuevamente indica que el proyecto es

económicamente rentable. El periodo de recuperó se da entre el tercer y cuarto año de operación del proyecto.

10.2. RECOMENDACIONES.

1. Se recomienda realizar un plan de mantenimiento predictivo para los equipos de la planta APU por ser antiguos y programar periódicamente el reemplazo de algunos de estos por equipos más modernos.
2. Debido a la alta peligrosidad que resulta operar la planta de hidrógeno, se recomienda incidir más en cuanto a la seguridad y a los sistemas de protección de los equipos, tales como paradas de emergencia, señales redundantes, etc.
3. Como se muestra en el estudio de mercado, la producción de hidrógeno UHP en modo start/stop ($665\,919\text{ m}^3/\text{año}$) no resultará suficiente para abastecer a los clientes en los años siguientes, por ello se recomienda realizar el estudio de factibilidad para operar la planta en modo continuo ($1\,162\,332\text{ m}^3/\text{año}$).
4. Para la producción de argón UHP en modo start/stop, el consumo de hidrógeno para purificar el argón crudo solo representa el 28 % de la producción de hidrógeno total, por ello es necesario realizar un estudio de mercado para ver la posibilidad de envasar y vender el hidrógeno UHP por ser un gas con muchas aplicaciones y escaso en el mercado nacional.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Bossel, U. & Eliasson, B. (2005). "Energy and the hydrogen economy".
- [2] Botas, J. A., Dufaur, J. & San Miguel, G. (2005). "La economía del hidrógeno. Una visión sobre la revolución energética del siglo XXI. Producción y almacenamiento.
- [3] Cardona, H. I. (2012). "Desarrollo de nuevos materiales de electrodo para la obtención de hidrógeno a partir de la electrólisis alcalina del agua". Tesis Doctoral Universidad politécnica de valencia.
- [4] Cengel, Y. & Boles M. (1995). "Termodinámica". Segunda Edición. México: McGraw-Hill.
- [5] Delvalle, K. (2004). "Análisis de las opciones de almacenamiento y transporte de los líquidos del gas natural". Tesis de grado, Departamento de Tecnología del Gas, IUTA Anzoátegui. Puerto la Cruz.
- [6] Fernando, C. J., Diniz, C. V., Sperling, D. & Moore, R. M. (2000). "Hydrogen production plants: emissions and thermal efficiency analysis". Institute of Transportation Studies, Universtity of California.
- [7] Flynn, T. (1997). "Cryogenic engineering". Estados Unidos: Marcel Dekker Inc.
- [8] Geankoplis, C. (1998). "Procesos de transporte y operaciones unitarias", Tercera edición, México: Continental S.A.
- [9] Laborde, M. A. & Gonzales, R. F. (2010). "La energía del hidrógeno". Madrid: Ediciones Cytel.
- [10] Linares, H. J. & Moratilla, S. B. (2007). "El hidrógeno y la energía". Madrid: Asociación nacional de ingenieros del ICAI.
- [11] Linde. (1978). "Manual de operaciones de la planta separadora de aire PSA IV". Firma: Linde.

- [12] López, J. R. (2003). “Modelo dinámico de un electrolizador alcalino”. Universidad de Sevilla.
- [13] MESSER. (2007). [on line]. Production air separation training manual. <http://www.messergroup.com>.
- [14] Pineda, D. A. (2009). “Evaluación técnica económica de una planta de producción de hidrógeno mediante electrólisis del agua utilizando energía eléctrica producida con celdas fotovoltaicas de alta eficiencia”. Tesis para optar el título de Ingeniero civil químico, Universidad de Chile.
- [15] Rosa, M. F. (2003). “Estudio teórico y experimental sobre la producción de hidrógeno electrolítico a partir de energía solar fotovoltaica: diseño, operación y evaluación de una planta piloto de producción de hidrógeno electrolítico de 1,2 Nm³/h”. Tesis doctoral para optar el grado de Doctor en Ingeniería industrial, Universidad de Sevilla, España.
- [16] Sáenz de Zaitogui, L. Z. (2009). “Desarrollo de nuevos materiales de carbono dopados con níquel para el almacenamiento de hidrógeno”. Tesis Doctoral, Departamento de químico orgánica e inorgánica Universidad de Oviedo, España.
- [17] Teledyne Energy Systems TESI. (2010). “Manual de generador EC-750”. <http://www.teledyneenergysystems.com>.

ANEXOS

ANEXO A

Fichas de seguridad.

- ✓ **Argón.**
- ✓ **Hidrógeno.**

HOJA DE SEGURIDAD DEL MATERIAL

(MSDS) ARGÓN

Nota: Las especificaciones contenidas en esta hoja de seguridad aplican también para argón industrial, argón espectrográfico, argón alta pureza y argón ultra alta pureza.

1. PRODUCTO QUÍMICO E IDENTIFICACIÓN DE LA EMPRESA.

Nombre del producto	: Argón.
Familia química	: Gas inerte.
Nombre químico	: Argón.
Fórmula	: Ar
Sinónimos	: No aplica
Usos	: Gas de protección para soldadura de aluminio y titanio por procesos MIG y TIG; soldadura y corte por arco de plasma; soldadura y corte en ambiente inerte; soldadura eléctrica con protección gaseosa; fabricación de lámparas incandescente Y fluorescentes; pasivador del acero en hornos siderúrgicos. Actúa como gas protector para evitar efectos oxidantes (shield gas) en la fabricación del acero; la adición de argón reduce las pérdidas de cromo sin alterar el contenido final de carbono.
Presentación	: Como gas comprimido en cilindros.
Fabricante	: Messer Gases del Perú S.A

2. COMPOSICIÓN / INFORMACIÓN SOBRE LOS COMPONENTES.

Componente	: Argón.
% Molar	: 99,9995 %.
Límite de exposición	: TLV Gas asfixiante simple.

3. IDENTIFICACIÓN DE PELIGROS.

Resumen de emergencia.

Gas comprimido sin olor, incoloro e insípido. Puede ocasionar asfixia inmediata. El personal de rescate debe emplear equipo autónomo de respiración.

Efectos potenciales para la salud.

Inhalación: Asfixiante simple. El Argón no es tóxico pero puede causar asfixia al desplazar el oxígeno del aire. Exposición a una atmósfera deficiente de oxígeno (< 19,5 %) puede causar mareo, náusea, vómito, salivación excesiva, disminución de agudeza mental, pérdida de conocimiento y muerte. Exposición a atmósferas que contengan el 10 % o menos de oxígeno pueden causar pérdida del conocimiento sin dar aviso, lesiones graves o muerte.

4. MEDIDAS DE PRIMEROS AUXILIOS.

Inhalación: Personas expuestas a altas concentraciones de argón deben ser trasladadas al aire libre. Si no están respirando, administrar respiración artificial como resucitación cardio-pulmonar y/o oxígeno suplementario. Si tiene dificultad al respirar, administrar oxígeno. Prestar asistencia médica inmediatamente.

5. MEDIDAS CONTRA INCENDIO.

Punto de inflamación : No aplica.
 Temperatura de auto ignición : No aplica.
 Límites de inflamabilidad : Inferior (LEL): No aplica.
 (en aire por volumen, %) Superior (UEL): No aplica.
 Sensibilidad de explosión a un impacto mecánico : No aplica.
 Sensibilidad de explosión a una descarga eléctrica : No aplica.

Riesgo general

Cuando los cilindros se exponen a intenso calor o llamas pueden explotar violentamente. Algunos cilindros están diseñados para evacuar el contenido al ser expuestos a altas temperaturas. La presión en el cilindro puede aumentar debido al calentamiento y pueden romperse los dispositivos de presión.

Medios de extinción.

El argón no es inflamable y no acelera la combustión.

Instrucciones para combatir incendios.

El argón es un asfixiante simple. Si es posible, remover los cilindros de argón del incendio o enfriarlos con agua desde un lugar seguro. No rociar agua directamente en la salida de la válvula del cilindro. Evacuar la zona de peligro.

Si un camión que transporta cilindros se ve involucrado en un incendio, aislar un área de 800 metros (1/2 milla) a la redonda.

El equipo de protección personal necesario para la atención de la emergencia se encuentra reseñado en la sección 8.

6. MEDIDAS CONTRA ESCAPE ACCIDENTAL.

En caso de escape evacuar a todo el personal de la zona afectada (hacia un lugar contrario a la dirección del viento). Aislar un área de 25 m a 50 m a la redonda. Si es posible y si no hay riesgo, localizar y sellar la fuente del escape antes de entrar al área. Permitir que el gas se disipe. Monitorear los alrededores para el nivel de oxígeno. La atmósfera debe tener por lo menos 19,5 % de oxígeno antes de permitir el paso de personal al área afectada.

Si la fuga está en el cilindro o en la válvula, ponerse en contacto con MESSER GASES DEL PERÚ S.A.

7. MANEJO Y ALMACENAMIENTO.

Precauciones que deben tomarse durante el manejo de cilindros

Antes del uso: Mover los cilindros utilizando un carro porta cilindros o montacargas. No hacerlos rodar ni arrastrarlos en posición horizontal. Evitar que se caigan o golpeen violentamente uno contra otro o con otras superficies. No se deben transportar en espacios cerrados como por ejemplo, el baúl de un automóvil, camioneta o van. Para descargarlos, usar un rodillo de caucho.

Durante su uso: No calentar el cilindro para acelerar la descarga del producto. Usar una válvula de contención o anti retorno en la línea de descarga para prevenir un contraflujo peligroso al sistema. Usar un regulador para reducir la presión al conectar el cilindro a tuberías o sistemas de baja presión (< 200 bar – 3,000 psig). Jamás descargar el contenido del cilindro hacia las personas, equipos, fuentes de ignición, material incompatible o a la atmósfera.

Después del uso: Cerrar la válvula principal del cilindro. Marcar los cilindros vacíos con una etiqueta que diga “VACIO”. Los cilindros deben ser devueltos al proveedor con el protector de válvula o la tapa. No deben reutilizarse cilindros que presenten fugas, daños por corrosión o que hayan sido expuestos

al fuego o a un arco eléctrico. En estos casos notificar al proveedor para recibir instrucciones.

Precauciones que deben tomarse para el almacenamiento de cilindros.

Almacenar los cilindros en posición vertical. Separar los cilindros vacíos de los llenos. Para esto usar el sistema de inventario “primero en llegar, primero en salir” con el fin de prevenir que los cilindros llenos sean almacenados por un largo período de tiempo.

El área de almacenamiento debe encontrarse delimitada para evitar el paso de personal no autorizado que pueda manipular de forma incorrecta el producto. Los cilindros deben ser almacenados en áreas secas, frescas y bien ventiladas, lejos de áreas congestionadas o salidas de emergencia.

El área debe ser protegida con el fin de prevenir ataques químicos o daños mecánicos como cortes o abrasión sobre la superficie del cilindro. No permitir que la temperatura en el área de almacenamiento exceda los 54° C ni tampoco que entre en contacto con un sistema energizado eléctricamente. Señalizar el área con letreros que indiquen “PROHIBIDO EL PASO A PERSONAL NO AUTORIZADO”, “NO FUMAR” y con avisos donde se muestre el tipo de peligro representado por el producto. El almacén debe contar con un sistema extintor de fuego apropiado (por ejemplo, sistema de riego, extinguidores portátiles, etc.). Los cilindros no deben colocarse en sitios donde hagan parte de un circuito eléctrico. Cuando los cilindros de gas se utilicen en conjunto con soldadura eléctrica, no deben estar puestos a tierra ni tampoco se deben utilizar para conexiones a tierra; esto evita que el cilindro sea quemado por un arco eléctrico, afectando sus propiedades físicas o mecánicas.

8. CONTROLES DE EXPOSICIÓN / PROTECCIÓN PERSONAL.

Controles de ingeniería.

Ventilación: Proporcionar ventilación natural o mecánica.

Equipos de detección: Utilizar sistemas de detección de gases diseñados de acuerdo con las necesidades. Se sugiere seleccionar una escala que permita mantener el nivel de oxígeno por encima de 19,5 %. Solicitar asesoría técnica al respecto en MESSER GASES DEL PERÚ S.A

Protección respiratoria.

Utilizar equipo autónomo de respiración (SCBA) o máscaras con mangueras de aire o de presión directa si los niveles de oxígeno están por debajo del 19,5 % o durante emergencias de un escape del gas. Los purificadores de aire no proveen suficiente protección.

Vestuario protector.

Para el manejo de cilindros es recomendable usar guantes industriales, verificando que éstos estén libres de aceite y grasa; gafas de seguridad y botas con puntera de acero.

Equipo contra incendios.

Los socorristas o personal de rescate deben contar como mínimo, con un aparato de respiración autosuficiente y protección personal completa a prueba de fuego.

9. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS.

Densidad del gas a 21,1 °C, 1 atm	: 1,650 kg/m ³ .
Punto de ebullición a 1 atm	: - 185,9 °C.
Punto de congelación / fusión a 1 atm	: - 185,9 °C.
Peso específico del líquido a -80 °C	: 1,39.
Peso específico (aire = 1) a 0 °C	: 1,38.
Peso molecular	: 39,95 g/mol.
Solubilidad en agua vol/vol a 0 °C y 1 atm	: 0,056.
Volumen específico del gas 21,1 °C y 1 atm	: 0,606 m ³ /kg.
Presión de vapor a 21,1 °C	: No aplica.
Coefficiente de distribución agua/aceite	: No aplica.
Apariencia y color	: Gas incoloro inodoro e insaboro.

10. REACTIVIDAD Y ESTABILIDAD.**Estabilidad**

El argón es un gas inerte.

Incompatibilidad

Ninguno; gas inerte.

Condiciones a evitar

Cilindros expuestos a temperaturas altas o llamas directas pueden romperse o estallar.

Reactividad

Gas inerte.

11. INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA.

El argón es un asfixiante simple. En humanos se presentan los siguientes síntomas:

Concentración	Síntomas de exposición
12-16% oxígeno	:Respiración y grados del pulso aumenta, coordinación muscular es ligeramente alterada.
10-14% oxígeno	:Efectos emocionales, fatiga anormal, respiración perturbada.
6-10% oxígeno conciencia.	:Nausea y vómito, colapso o pérdida de la
Abajo 6%	:Movimientos convulsivos, colapso respiratorio y posible muerte.

Efectos por inhalación a corto plazo.

Ratas machos fueron expuestas por 6 días a 20 % de oxígeno y 80% de argón a 1 atm y temperatura ambiental. No hubo ningún cambio significativo en el conteo de células rojas o médula espinal.

12. INFORMACIÓN ECOLÓGICA.

No se espera ningún efecto ecológico. El argón no contiene ningún químico Clase I o Clase II que reduzca el ozono. No se anticipa ningún efecto en la vida de las plantas, a excepción de la escarcha producida en la presencia de gases expandiéndose velozmente. El argón no causa daño a la vida acuática.

El argón no ha sido identificado como contaminante marino por el DOT.

13. CONSIDERACIONES DE DISPOSICIÓN.

Regresar los cilindros vacíos al fabricante para que éste se encargue de su disposición final, de acuerdo a lo establecido por la normatividad ambiental.

14. INFORMACIÓN SOBRE TRANSPORTE.

Número de Naciones Unidas : UN 1006
 Clase de peligro D.O.T : 2.2
 Rotulo y etiqueta D.O.T : GAS NO INFLAMABLE NO TOXICO.



El argón se transporta en cilindros color marrón, de acuerdo a lo establecido por la Norma Técnica Peruana.

Información especial de embarque: Los cilindros se deben transportar en una posición segura en un vehículo bien ventilado. El transporte de cilindros de gas comprimido en automóviles o en vehículos cerrados presenta serios riesgos de seguridad y debe ser descartado.

15. INFORMACIÓN ADICIONAL.

En las zonas de almacenamiento de cilindros se debe contar con la siguiente información de riesgos:

Código NFPA

Salud : 0 "ligeramente peligroso"
Inflamabilidad : 0 "no arde"
Reactividad : 0 "Estable"
Salida de válvula : CGA 580

Recomendaciones de material: Se puede usar materiales comunes.

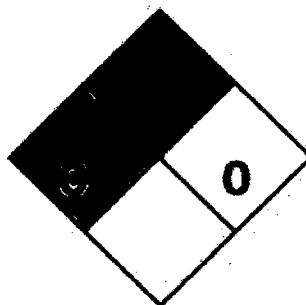


Figura A1. Rombo de argón.

HOJA DE SEGURIDAD DEL MATERIAL

(MSDS) HIDRÓGENO

Nota: Las instrucciones contenidas en esta hoja de seguridad aplican también para el hidrógeno purificado, hidrógeno alta pureza e hidrógeno ultra alta pureza.

1. PRODUCTO QUÍMICO E IDENTIFICACIÓN DE LA EMPRESA.

Nombre del producto : Hidrógeno

Familia química : Gas inflamable

Nombre químico : Hidrógeno

Fórmula : H₂

Sinónimos : No aplica

Usos : Hidrogenación de aceites; procesos especiales de soldadura y corte; laboratorios; hornos de tratamientos térmicos; formación de atmósferas reductoras (industria del vidrio); hornos para reducción de ciertos metales (eliminación de oxígeno); fabricación de semiconductores.

"NO SE USE EN NINGUN TIPO DE GLOBO; PELIGRO INMINENTE DE INCENDIO"

Presentación : Como gas comprimido en cilindros.

Fabricante : Messer Gases del Perú S.A

2. COMPOSICIÓN / INFORMACIÓN SOBRE LOS COMPONENTES.

Componente : Hidrógeno.

% Molar : 99,9 – 99,999 %.

Límite de exposición : Gas asfixiante simple.

3. IDENTIFICACIÓN DE PELIGROS.

Resumen de emergencia.

El hidrógeno es un gas incoloro, inodoro, insípido, altamente inflamable y no es tóxico. El hidrógeno se quema en el aire formando una llama azul pálida casi invisible. Este gas es particularmente propenso a fugas debido a su baja viscosidad y a su bajo peso molecular. El principal peligro para la salud

asociado con escapes de este gas es la asfixia producida por el desplazamiento de oxígeno en personas expuestas a altas concentraciones. Las mezclas de gas/aire son explosivas.

Efectos potenciales para la salud.

Inhalación: Asfixiante simple. Altas concentraciones de este gas pueden causar una atmósfera deficiente en oxígeno causando en individuos dolor de cabeza, zumbido en los oídos, mareos, somnolencia, inconsciencia, náusea, vómitos y depresión de todos los sentidos. La piel de la víctima puede adquirir una coloración azulada. En concentraciones inferiores de O₂ (< 10 %), puede causar pérdida de la conciencia, movimientos convulsivos, colapso respiratorio y muerte.

Carcinogenicidad: El hidrógeno no está listado por la NTP, OSHA o IARC como una sustancia carcinogénica o con potencial carcinogénico.

4. MEDIDAS DE PRIMEROS AUXILIOS.

Inhalación: Trasladar la víctima al aire libre lo antes posible. Solamente personal profesionalmente entrenado debe suministrar oxígeno suplementario y/o resucitación cardiopulmonar de ser necesario. Proveer asistencia médica inmediatamente.

5. MEDIDAS CONTRA INCENDIO.

Punto de inflamación	: No aplica.
Temperatura de auto ignición	: 572°C (1060°F)
Límites de inflamabilidad (en aire por volumen, %)	: Inferior (LEL): 4% Superior (UEL): 75%
Sensibilidad de explosión a un impacto mecánico	: No aplica.
Sensibilidad de explosión a una descarga eléctrica	: Ignición por descargas electrostáticas

Riesgo general

El gas hidrógeno quema con una llama celeste, casi invisible. También se enciende fácilmente con poca fuerza de ignición. El hidrógeno es más ligero que el aire y se puede acumular en las partes altas de lugares encerrados. La

presión en el cilindro puede aumentar debido al calentamiento y romperse si los dispositivos de descarga de presión llegaran a fallar.

Medios de extinción.

CO₂, polvo químico seco, rocío de agua o agua pulverizada.

Instrucciones para combatir incendios.

Evacuar a todo el personal de la zona en peligro. No extinguir hasta que el suministro de hidrógeno esté cerrado y controlado. Inmediatamente enfriar los cilindros rociándolos con agua desde lo más lejos posible. Cuidado al extinguir las llamas. Si las llamas se extinguen sin cortar la fuente de suministro de hidrógeno puede ocurrir una explosión. El fuego y la explosión resultante podrían causar graves daños al equipo y al personal o muerte alrededor de una gran área. Si es posible y si no hay peligro, cerrar el suministro del gas hidrógeno mientras se continúa rociando los cilindros con agua.

Si un camión que transporte cilindros se ve involucrado en el incendio, aislar un área 1600 metros (1 milla) a la redonda. Combatir el incendio desde una distancia segura, utilizando soportes fijos para las mangueras.

Equipo contra incendios.

Los socorristas o personal de rescate deben contar como mínimo, con un aparato de respiración auto-contenido y protección personal completa a prueba de fuego (equipo para línea de fuego).

6. MEDIDAS CONTRA ESCAPE ACCIDENTAL.

En caso de un escape despejar el área afectada. Considerar la evacuación hacia un lugar contrario a la dirección del viento, por lo menos 800 metros (1/2 milla) a la redonda. Eliminar toda fuente de ignición. La presencia de una llama de hidrógeno se puede detectar acercándose cautelosamente y extendiendo una escoba de paja para hacer la llama visible. Si es posible y no hay peligro, cerrar el suministro de hidrógeno. Nunca entrar al área si la concentración de hidrógeno en el aire es mayor del 10 % del límite inferior de explosividad (0.4 %).

Si el escape se originó por problemas en un equipo o tubería de proceso, inertizarlos haciendo circular gas inerte (nitrógeno) a través de ellos por lo menos durante una hora antes de iniciar la correspondiente reparación. Mientras tanto el área se debe ventilar y permanecer aislada hasta que el gas se haya dispersado.

7. MANEJO Y ALMACENAMIENTO.

Precauciones que deben tomarse durante el manejo de cilindros

Antes del uso: Mover los cilindros utilizando un carro porta cilindros o montacargas. No hacerlos rodar ni arrastrarlos en posición horizontal. Evitar que se caigan o golpeen violentamente uno contra otro o con otras superficies. No se deben transportar en espacios cerrados como por ejemplo, el baúl de un automóvil, camioneta o van. Para descargarlos usar un rodillo de caucho.

Durante su uso: No calentar el cilindro para acelerar la descarga del producto. Usar una válvula de contención o anti retorno en la línea de descarga para prevenir un contraflujo peligroso al sistema. Usar un regulador para reducir la presión al conectar el cilindro a tuberías o sistemas de baja presión (< 200 bar – 3,000 psig). Jamás descargar el contenido del cilindro hacia las personas, equipos, fuentes de ignición, material incompatible o a la atmósfera.

Después del uso: Cerrar la válvula principal del cilindro. Marcar los cilindros vacíos con una etiqueta que diga “VACIO”. Los cilindros deben ser devueltos al proveedor con el protector de válvula o la tapa. No deben reutilizarse cilindros que presenten fugas, daños por corrosión o que hayan sido expuestos al fuego o a un arco eléctrico. En estos casos notificar al proveedor para recibir instrucciones.

Precauciones que deben tomarse para el almacenamiento de cilindros.

Almacenar los cilindros en posición vertical. Separar los cilindros vacíos de los llenos. Para esto usar el sistema de inventario “primero en llegar, primero en salir” con el fin de prevenir que los cilindros llenos sean almacenados por un largo período de tiempo.

El área de almacenamiento debe encontrarse delimitada para evitar el paso de personal no autorizado que pueda manipular de forma incorrecta el producto. Los cilindros deben ser almacenados en áreas secas, frescas y bien ventiladas, lejos de áreas congestionadas o salidas de emergencia. Así mismo, deben estar separados de materiales oxidantes o comburentes por una distancia mínima de 6 m o con una barrera de material incombustible por lo menos de 1,5 m de altura que tenga un grado de resistencia a incendios de 0,5 h.

El área debe ser protegida con el fin de prevenir ataques químicos o daños mecánicos como cortes o abrasión sobre la superficie del cilindro. No permitir que la temperatura en el área de almacenamiento exceda los 54° C ni tampoco que entre en contacto con un sistema energizado eléctricamente. Señalizar el área con letreros que indiquen “PROHIBIDO EL PASO A PERSONAL NO AUTORIZADO”, “NO FUMAR” y con avisos donde se muestre el tipo de peligro representado por el producto. El almacén debe contar con un sistema extintor de fuego apropiado (por ejemplo, sistema de riego, extinguidores portátiles, etc.). Los cilindros no deben colocarse en sitios donde hagan parte de un circuito eléctrico. Cuando los cilindros de gas se utilicen en conjunto con soldadura eléctrica, no deben estar puestos a tierra ni tampoco se deben utilizar para conexiones a tierra; esto evita que el cilindro sea quemado por un arco eléctrico, afectando sus propiedades físicas o mecánicas.

8. CONTROLES DE EXPOSICIÓN / PROTECCIÓN PERSONAL.

Controles de ingeniería.

Ventilación: Proporcionar ventilación natural o mecánica, para asegurarse de prevenir atmósferas deficientes en oxígeno por debajo del 19,5 % de oxígeno.

Equipos de detección: Utilizar sistemas de detección de gases diseñados de acuerdo con las necesidades. Rango recomendado del instrumento 0 – 100 % LEL.

Protección respiratoria.

Utilizar equipo autónomo de respiración (SCBA) o máscaras con mangueras de aire o de presión directa si los niveles de oxígeno están por debajo del 19,5

% o durante emergencias de un escape del gas. Los purificadores de aire no proveen suficiente protección.

Vestuario protector.

Para el manejo de cilindros es recomendable usar guantes industriales, verificando que éstos estén libres de aceite y grasa; gafas de seguridad y botas con puntera de acero.

Equipo contra incendios.

Los socorristas o personal de rescate deben contar como mínimo, con un aparato de respiración auto-contenido y protección personal completa a prueba de fuego (equipo para línea de fuego).

9. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS.

Densidad del gas a 21,1 °C, 1 atm	: 0,08342 kg/m ³ .
Punto de ebullición a 1 atm	: - 252,8 °C.
Punto de congelación / fusión a 1 atm	: -259,2°C.
Peso específico (aire = 1) a 21,1 °C	: 0,06960
Peso molecular	: 2,106 g/mol.
Solubilidad en agua vol/vol a 15,6 °C y 1 atm	: 0,019
Volumen específico del gas 21,1 °C	: 11,99 m ³ /kg.
Presión de vapor	: No aplica.
Coefficiente de distribución agua/aceite	: No aplica.
Apariencia y color	: Gas incoloro y sin olor.

10. REACTIVIDAD Y ESTABILIDAD.

Estabilidad

El hidrógeno es un gas estable

Incompatibilidad

Oxidantes fuertes (cloro, bromuro, pentafluoruro, oxígeno, oxígeno difluoruro, y nitrógeno trifluoruro. Mezclas de oxígeno/hidrógeno pueden explotar al hacer contacto con un catalizador como el platino. Algunos aceros son susceptibles al hidrógeno, haciéndolos quebradizos a altas presiones y temperaturas.

Condiciones a evitar

Evitar el contacto con materiales incompatibles y exponer a calor, chispas u otras fuentes de ignición. Cilindros expuestos a temperaturas altas o llamas directas pueden explotar violentamente.

Reactividad

- ✓ Productos de descomposición: Se produce agua cuando el hidrógeno arde en presencia de aire.
- ✓ Polimerización peligrosa: Ninguna.

11. INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA.

El hidrógeno es un asfixiante simple. En humanos se presentan los siguientes síntomas:

Concentración	Síntomas de exposición
12-16% Oxígeno	:Respiración y grados del pulso aumenta, coordinación muscular es ligeramente alterada.
10-14% Oxígeno	:Efectos emocionales, fatiga anormal, respiración perturbada.
6-10% Oxígeno	:Nausea y vómito, colapso o pérdida de la conciencia.
Abajo 6%	:Movimientos convulsivos, colapso respiratorio y posible muerte.

12. INFORMACIÓN ECOLÓGICA.

El hidrógeno es un gas que se encuentra naturalmente en la atmósfera. El gas se disipa rápidamente en áreas con buena ventilación. Cualquier efecto adverso en animales o en la vida de las plantas estará relacionado con ambientes deficientes en oxígeno. No hay efectos adversos anticipados a las plantas.

El hidrógeno no está identificado como contaminante marino por el DOT.

13. CONSIDERACIONES DE DISPOSICIÓN.

Regresar los cilindros vacíos al fabricante para que éste se encargue de su disposición final, de acuerdo a lo establecido por la normatividad ambiental.

14. INFORMACIÓN SOBRE TRANSPORTE.

Número de Naciones Unidas : UN 1049
 Clase de peligro D.O.T : 2.1
 Rotulo y etiqueta D.O.T : GAS INFLAMABLE



El hidrógeno se transporta en cilindros color rojo vivo, de acuerdo a lo establecido por la Norma Técnica Peruana.

Información especial de embarque: Los cilindros se deben transportar en una posición segura en un vehículo bien ventilado. El transporte de cilindros de gas comprimido en automóviles o en vehículos cerrados presenta serios riesgos de seguridad y debe ser descartado.

15. INFORMACIÓN ADICIONAL.

En las zonas de almacenamiento de cilindros se debe contar con la siguiente información de riesgos:

Código NFPA

Salud : 0 “No ofrece riesgo”
Inflamabilidad : 4 “Extremadamente inflamable, por debajo de 23°C”
Reactividad : 0 “Estable”
Salida de válvula : CGA 350

Recomendaciones de material: Se puede usar la mayoría de los materiales más comunes.

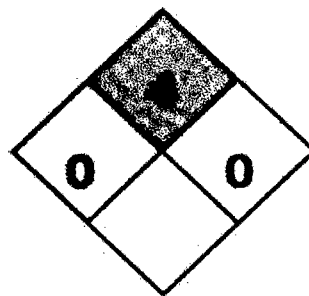


Figura A2. Rombo de Hidrógeno.

ANEXO B

Pantalla de control en Planta ASU Messer Gases del Perú.

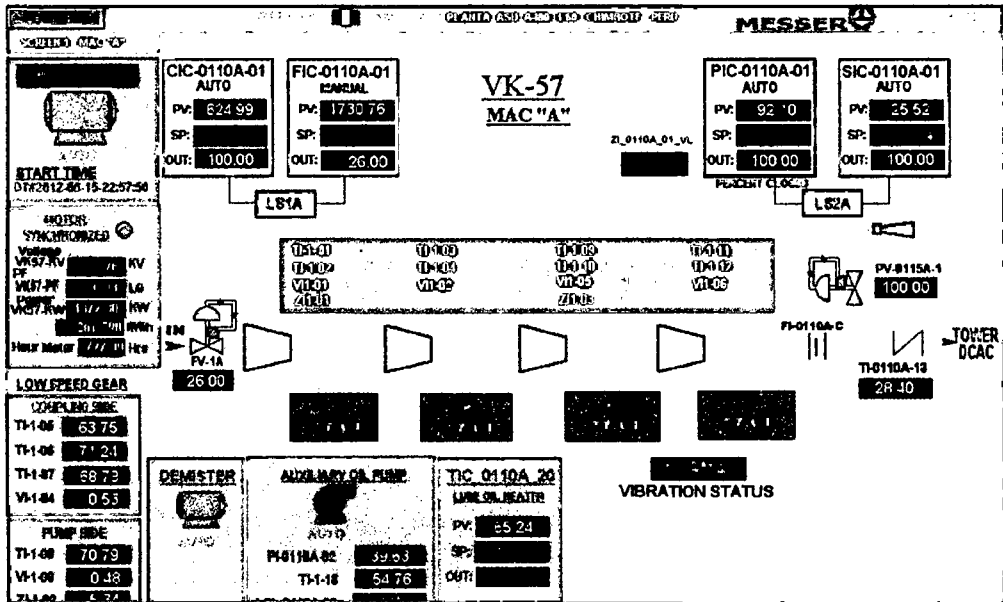


Figura B1. Pantalla de compresor de aire VK-57.

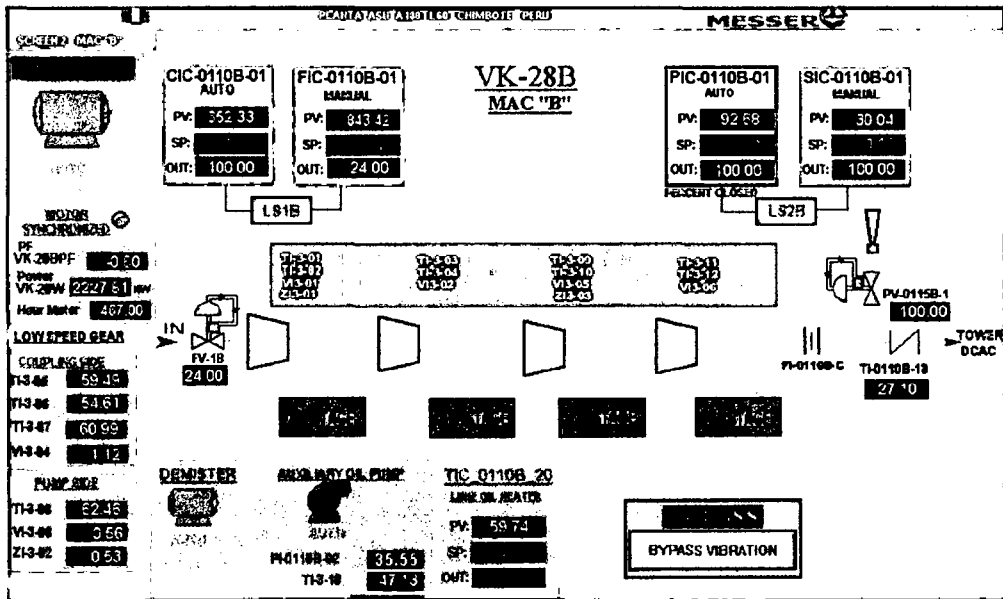


Figura B2. Pantalla de compresor de aire VK-28.

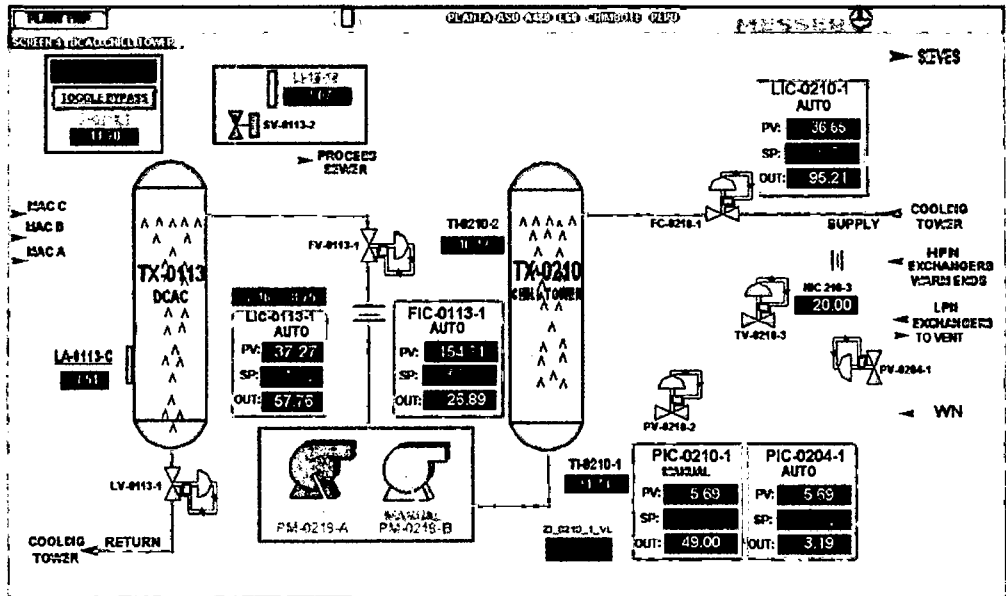


Figura B3. Pantalla de DCAC y Chill Tower.

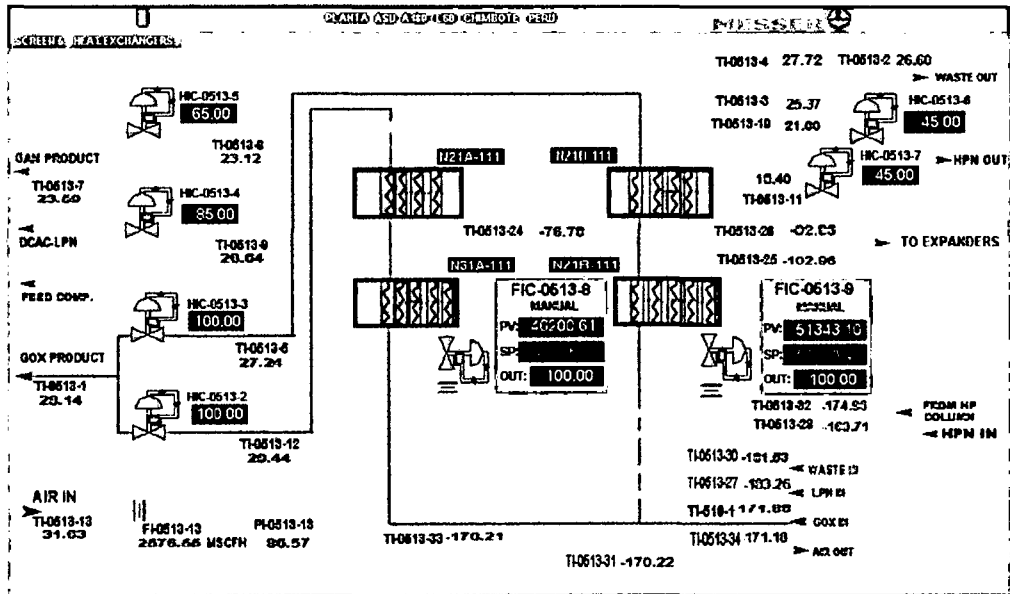


Figura B4. Pantalla de Intercambiadores Principales.

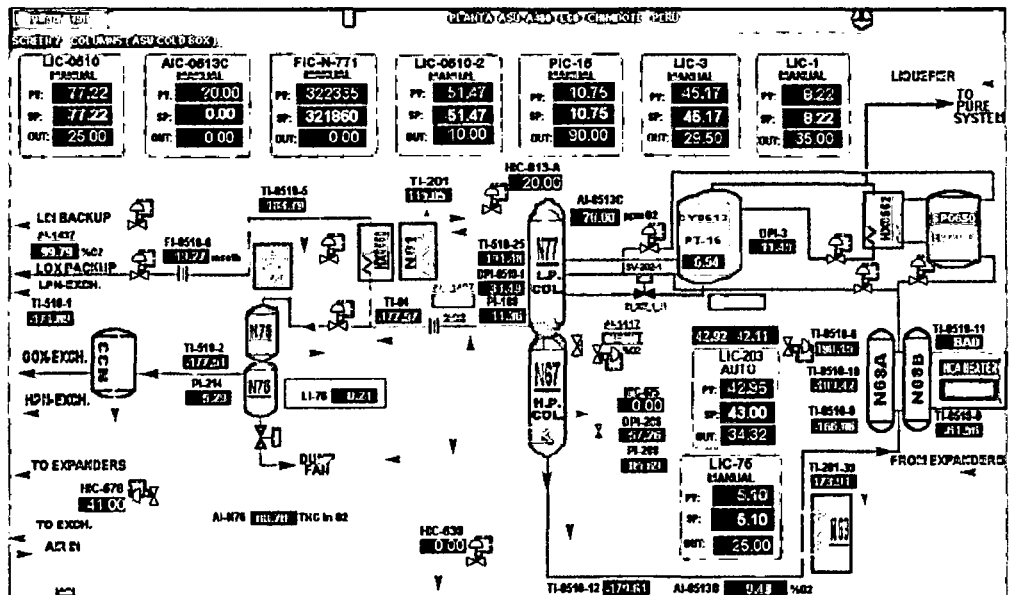


Figura B5. Pantalla de columna de destilación.

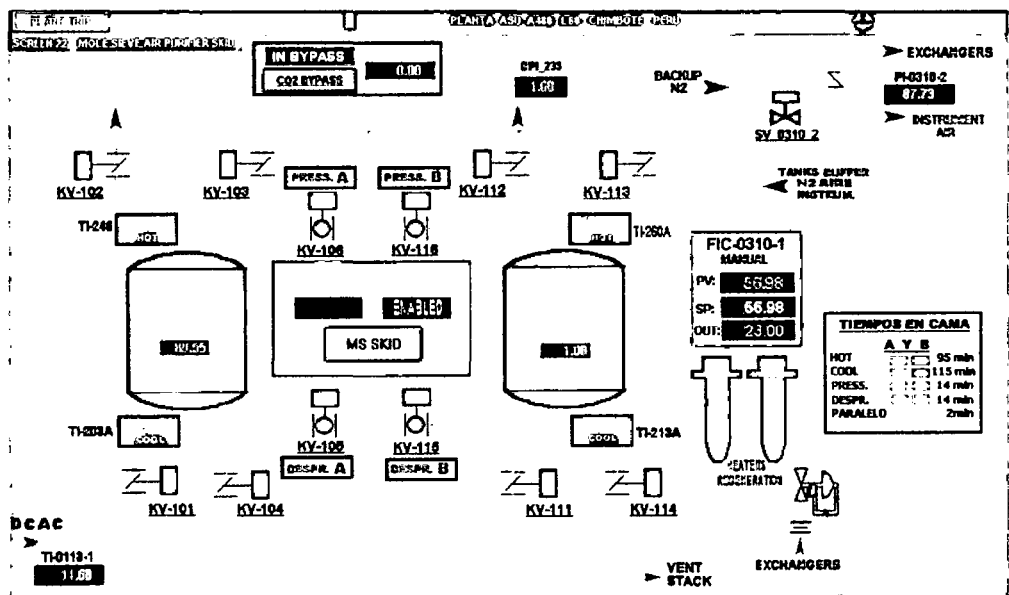


Figura B6. Pantalla de adsorbedores.

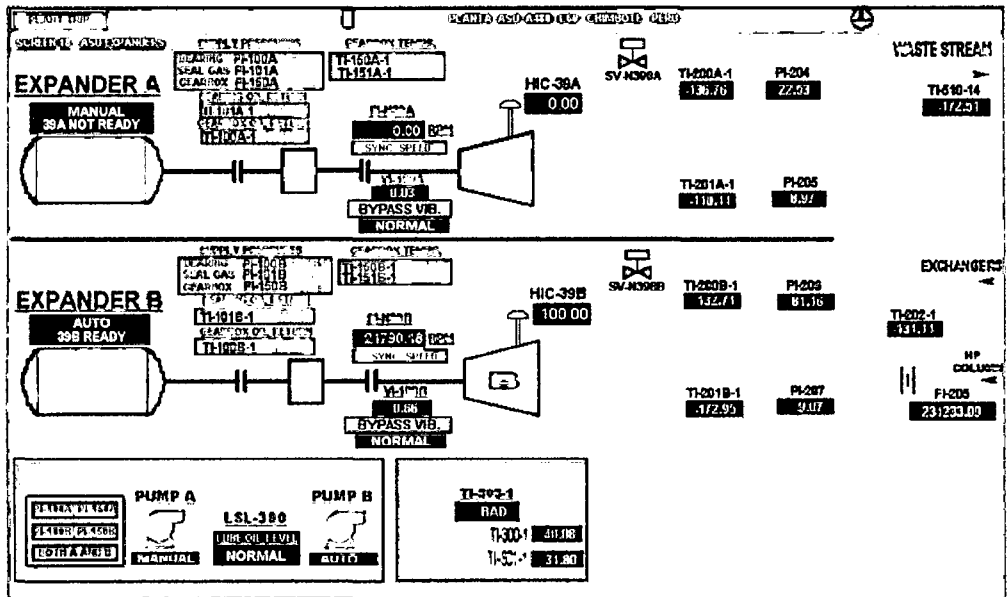


Figura B7. Pantalla de expansores.

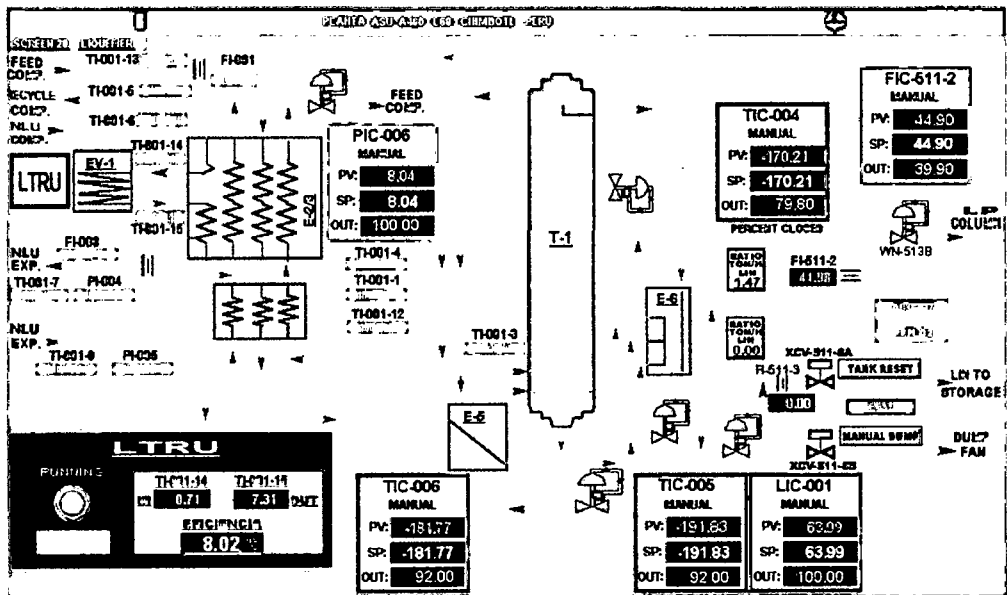


Figura B8. Pantalla de unidad de licuación.

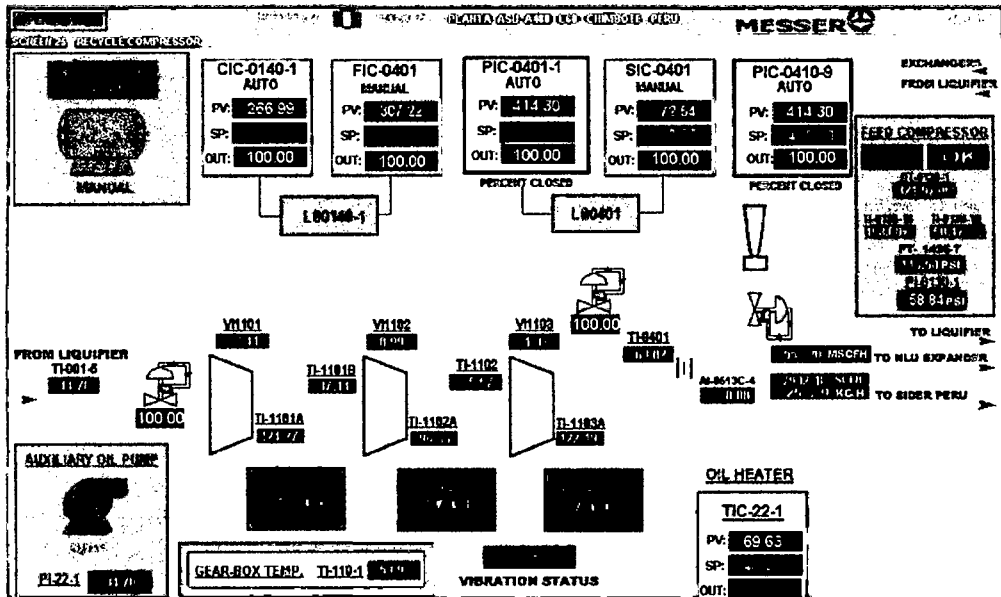


Figura B9. Pantalla de compresor de nitrógeno.

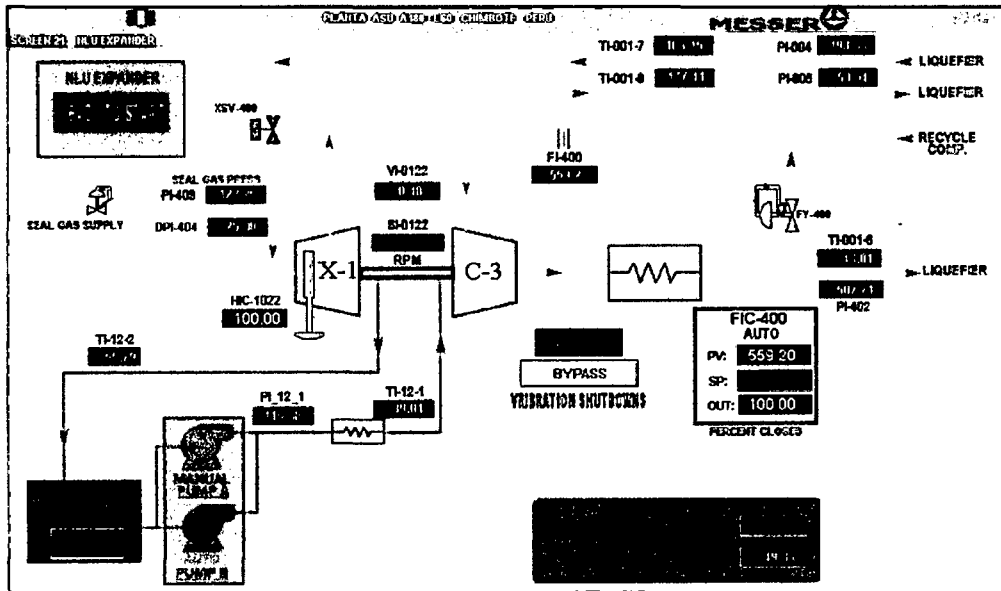


Figura B10. Pantalla de NLU compresor/expander.

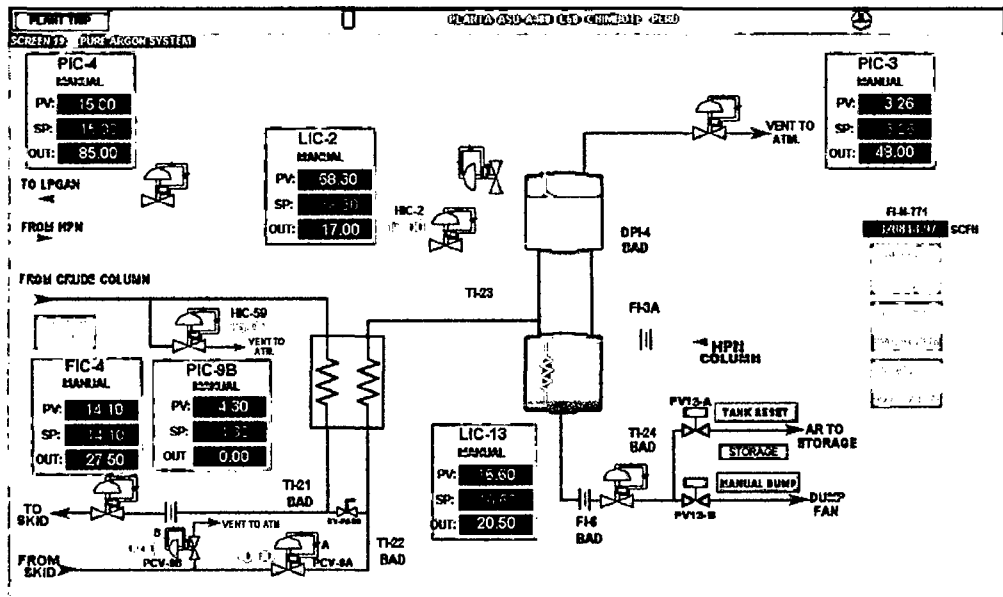


Figura B11. Pantalla de Columna de argón Puro.

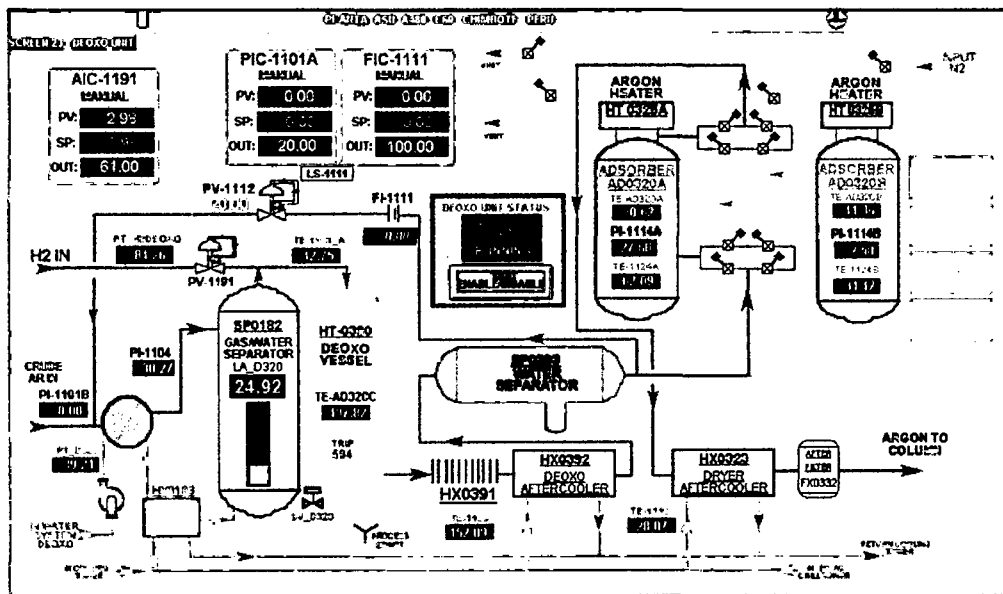


Figura B12. Pantalla de unidad DEOXO.

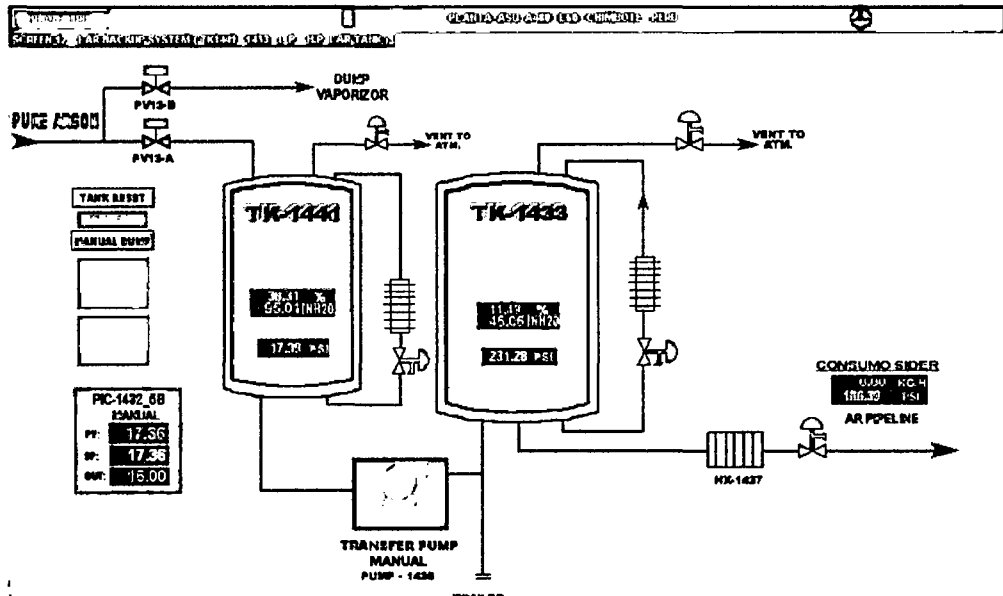


Figura B13. Pantalla de tanque de almacenamiento de argón líquido.

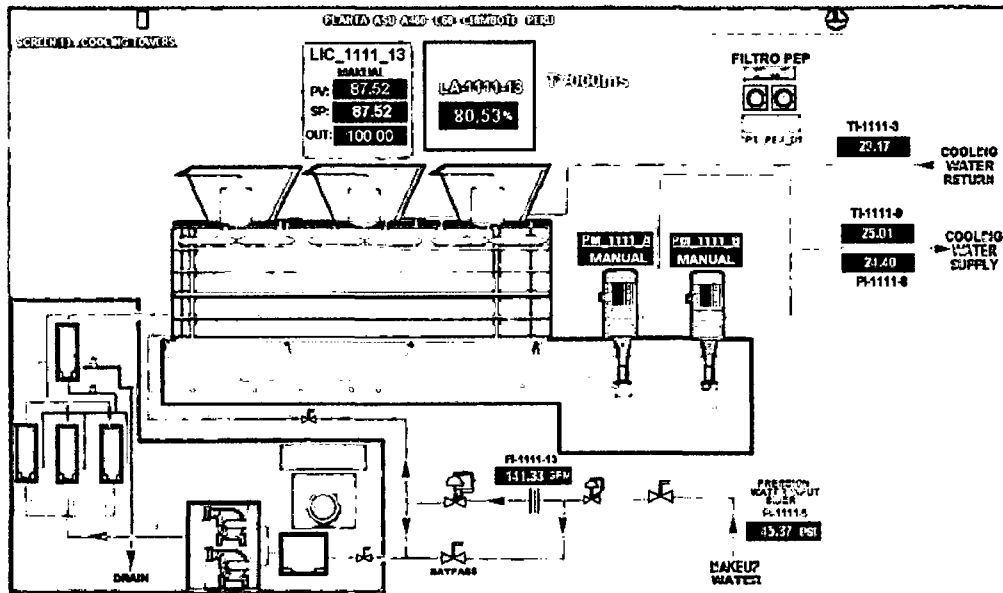


Figura B14. Pantalla de torre de enfriamiento.

ANEXO C

Fotos de Equipos de Planta de Purificación de argón crudo APU.

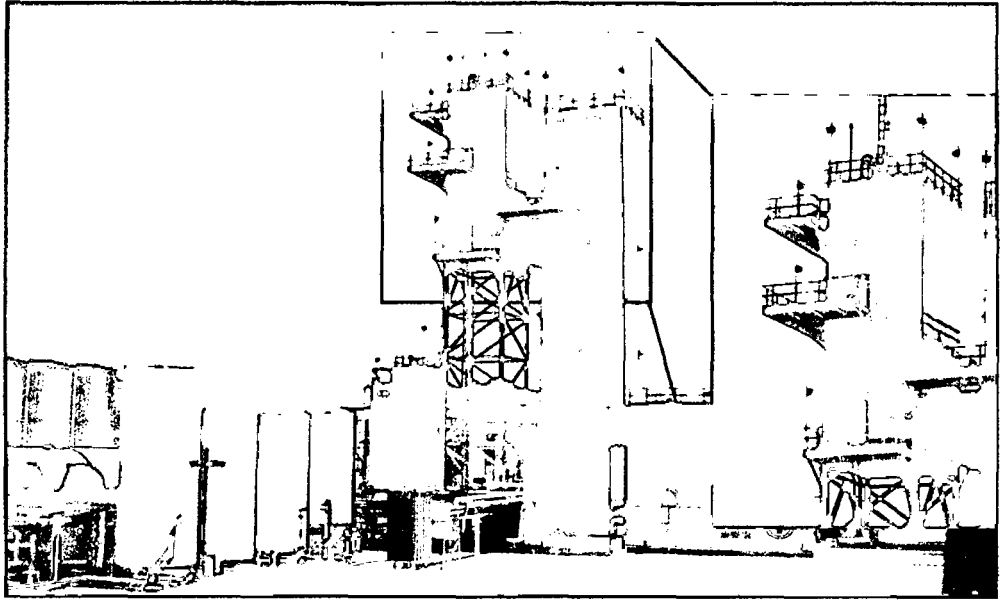


Figura C1. Columna de argón crudo.

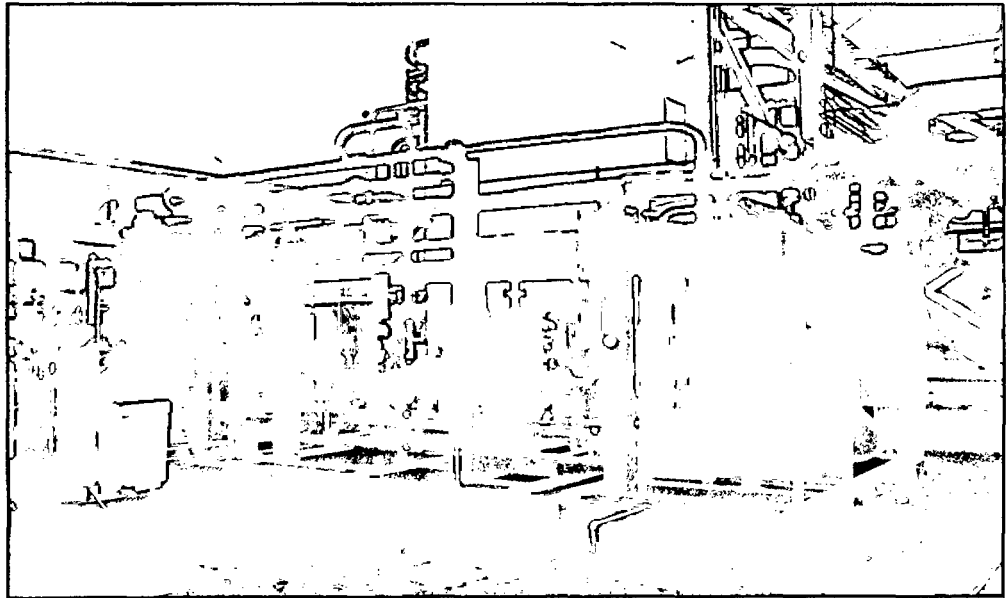


Figura C2. Unidad DEOXO.

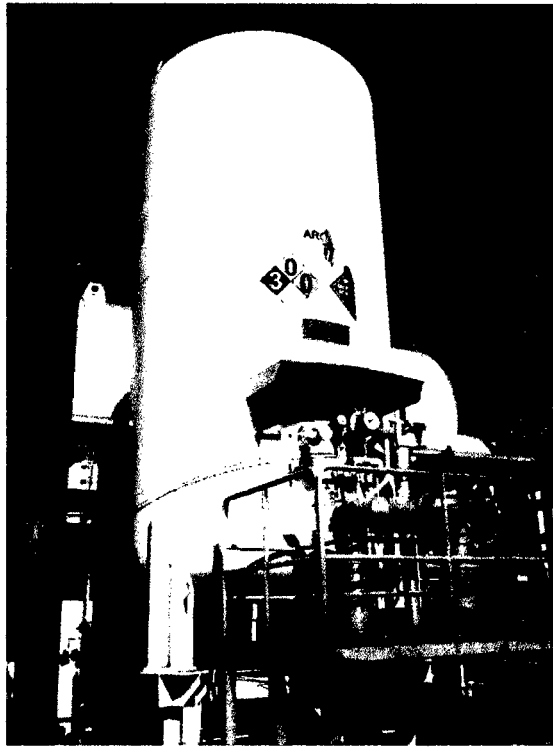


Figura C3. Tanque de almacenamiento de argón líquido.

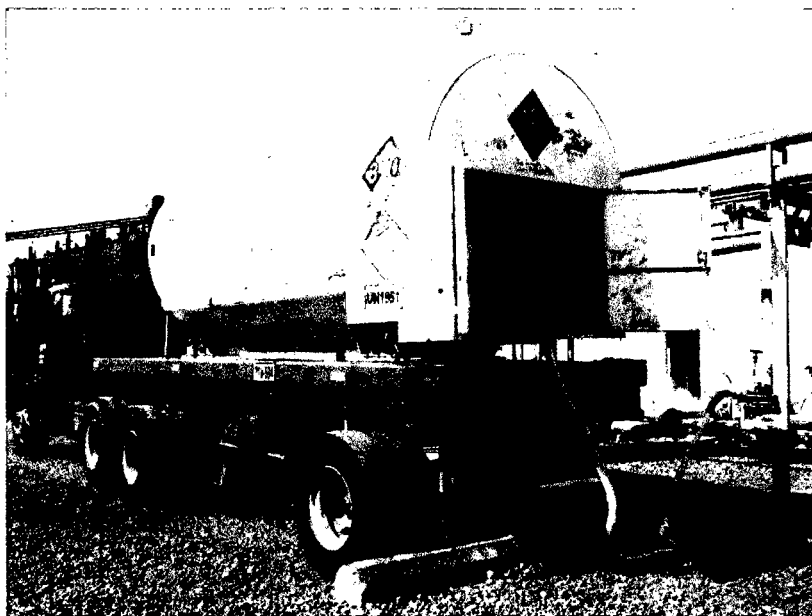


Figura C4. Tanque transportable de argón líquido.

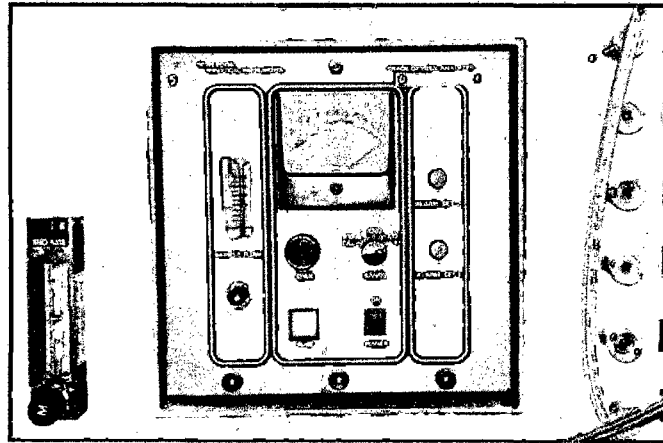


Figura C5. Analizador de trazas de oxígeno en argón.

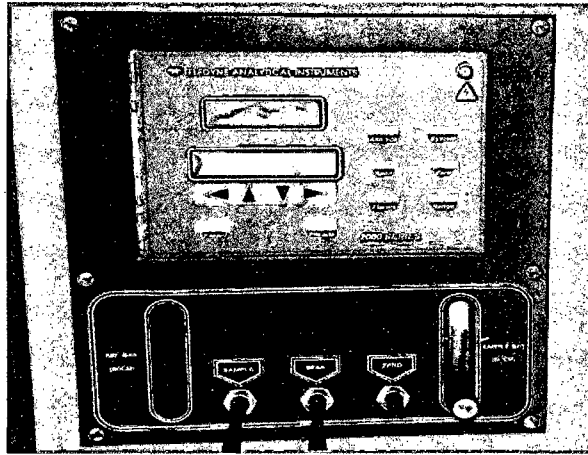


Figura C6. Analizador de exceso de hidrógeno.



Figura C7. Analizador de trazas de nitrógeno en argón.

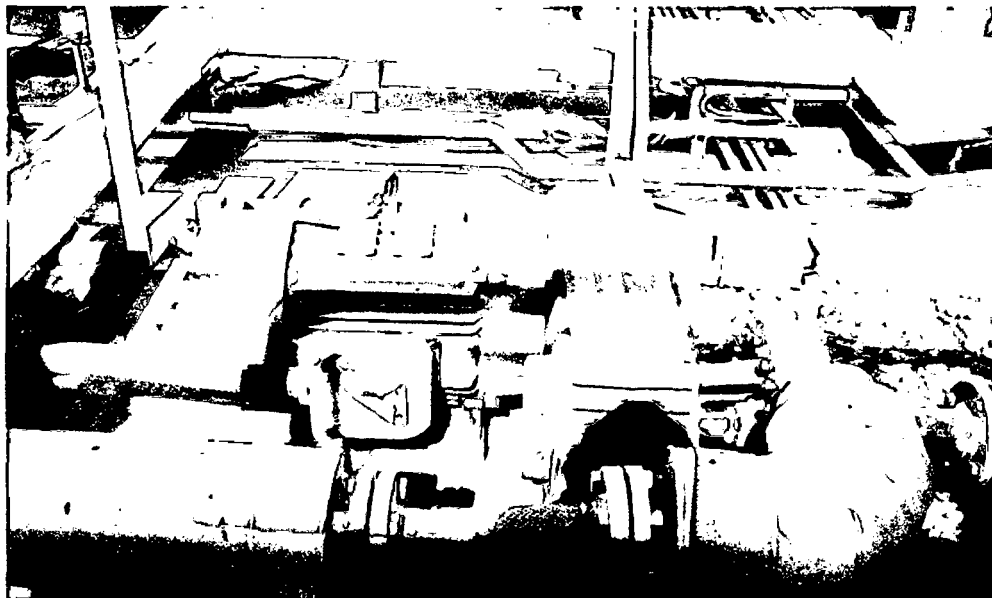


Figura C8. Bomba de trasiego de argón líquido.

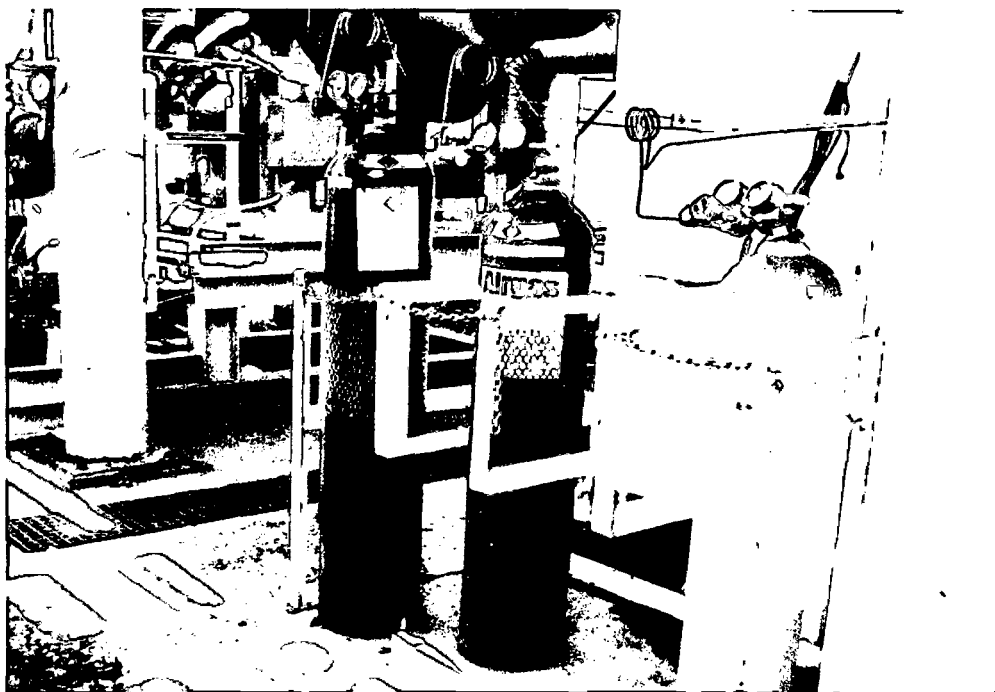


Figura C9. Gases de calibración para analizadores.

ANEXO D

**Fotos de Instalación Montaje y Puesta en funcionamiento de Planta de
Hidrógeno.**

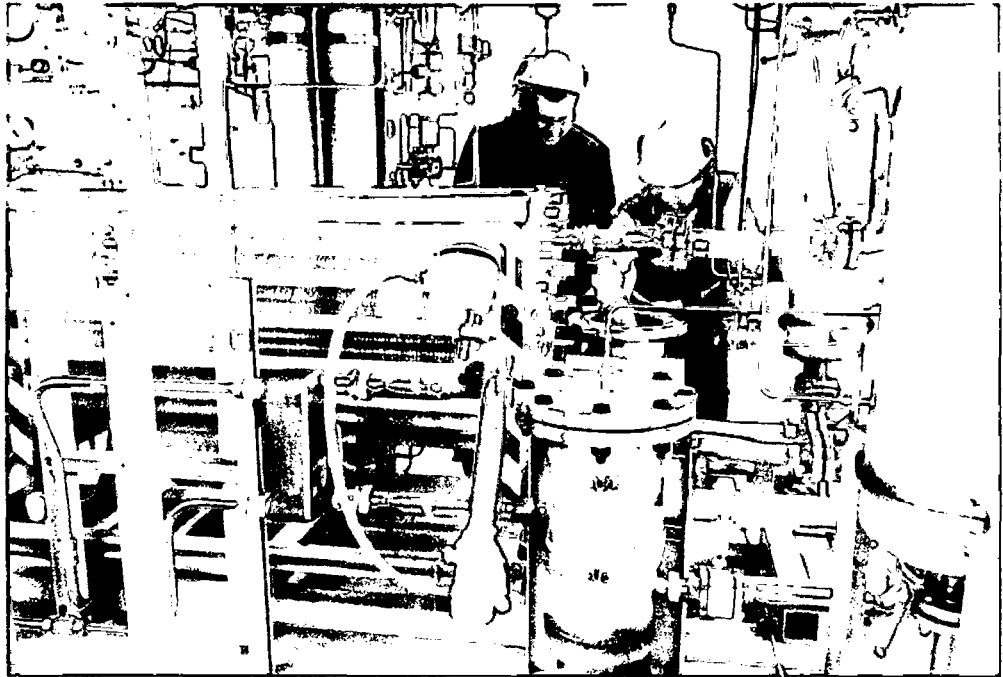


Figura D1. Montaje de generador EC-750.



Figura D2. Equipo encargado de montaje de generador EC-750.

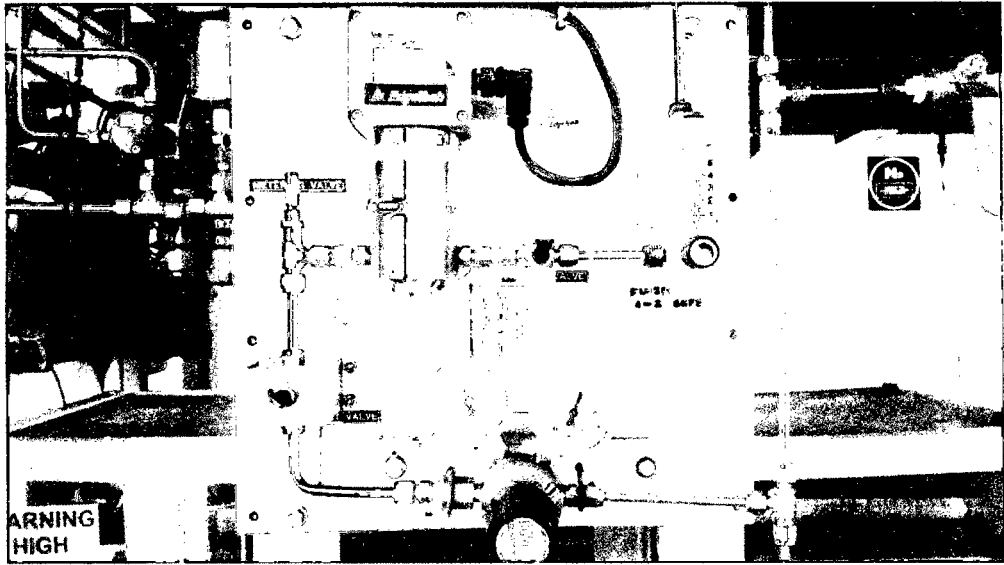


Figura D3. Analizador de trazas de oxígeno en hidrógeno.

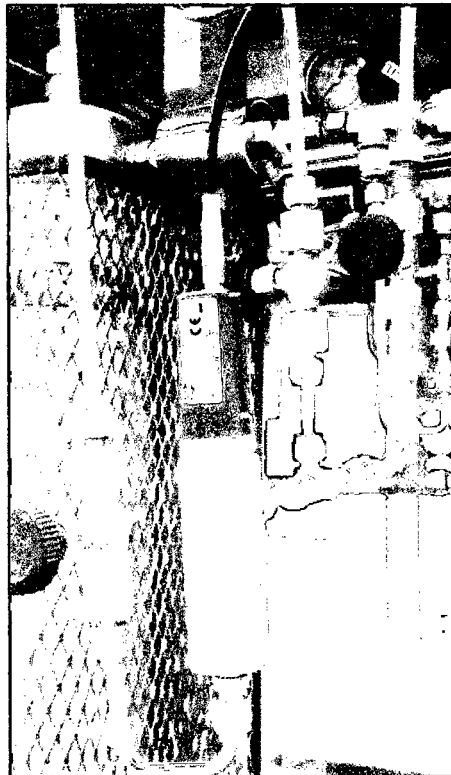


Figura D4. Analizador de trazas de humedad en hidrógeno.

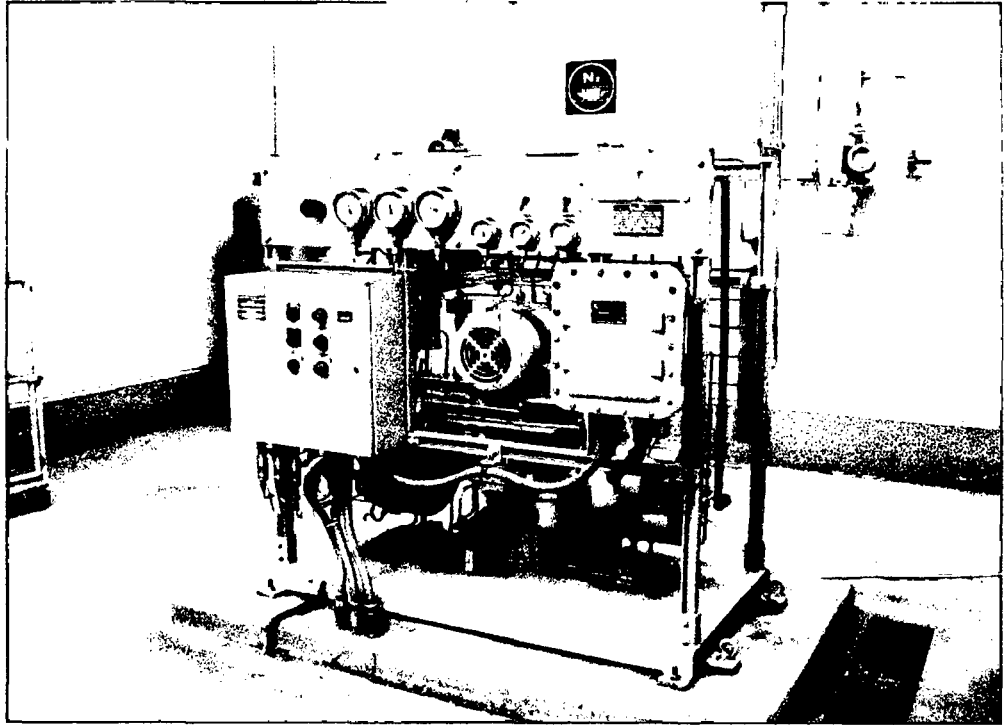


Figura D5. Compresor de hidrógeno.

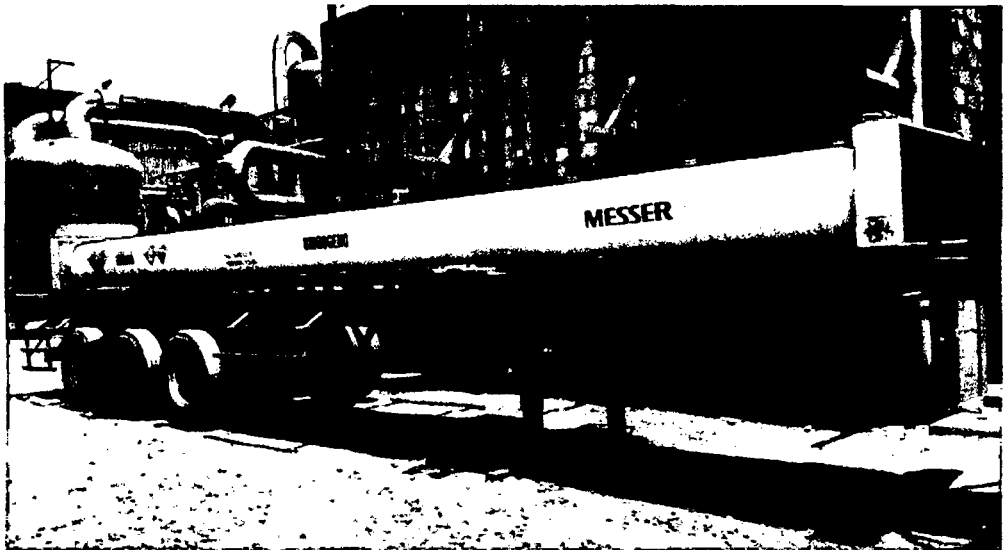


Figura D6. Buffer para almacenamiento de hidrógeno UHP.

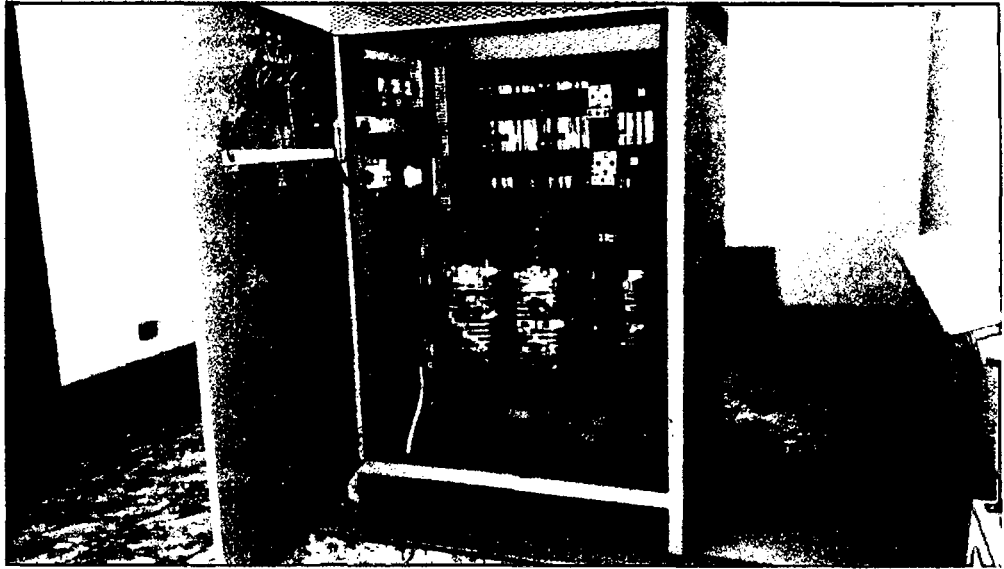


Figura D7. Suministro de energía – Power Supply.

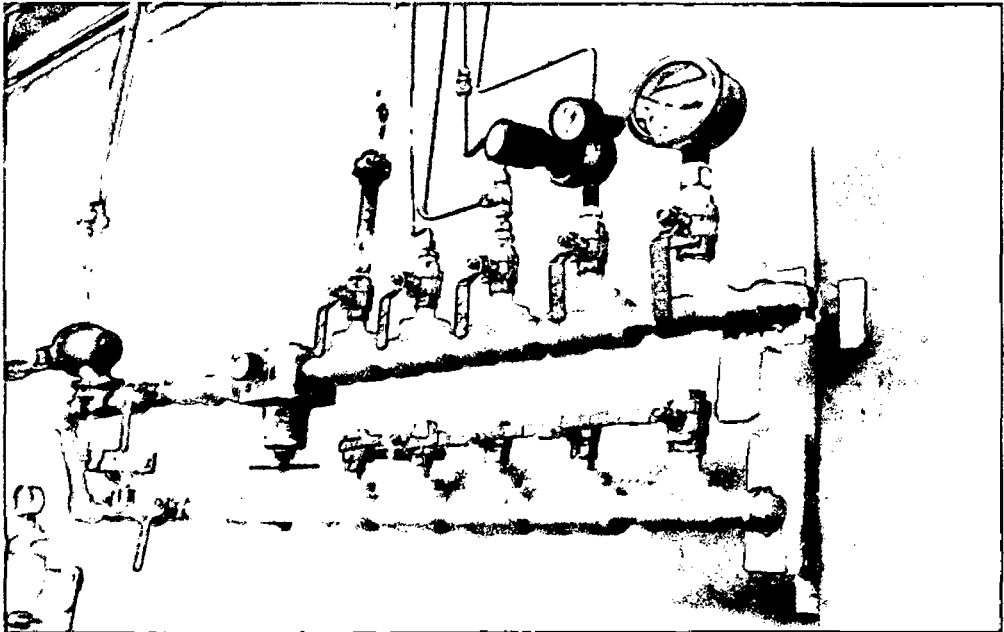


Figura D8. Manifold de suministro de gas inerte.

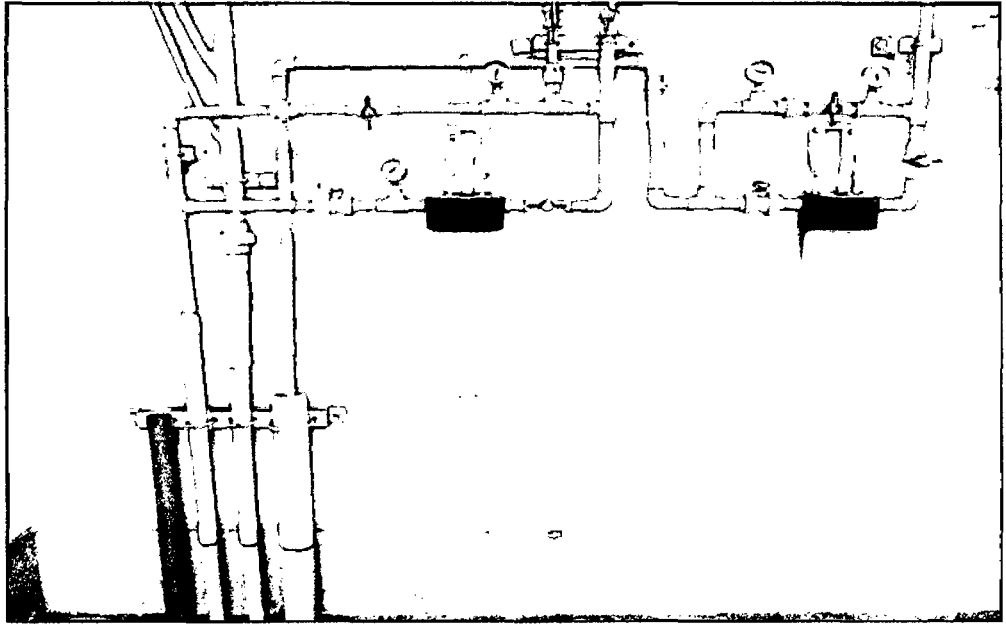


Figura D9. Manifold de suministro agua de enfriamiento.

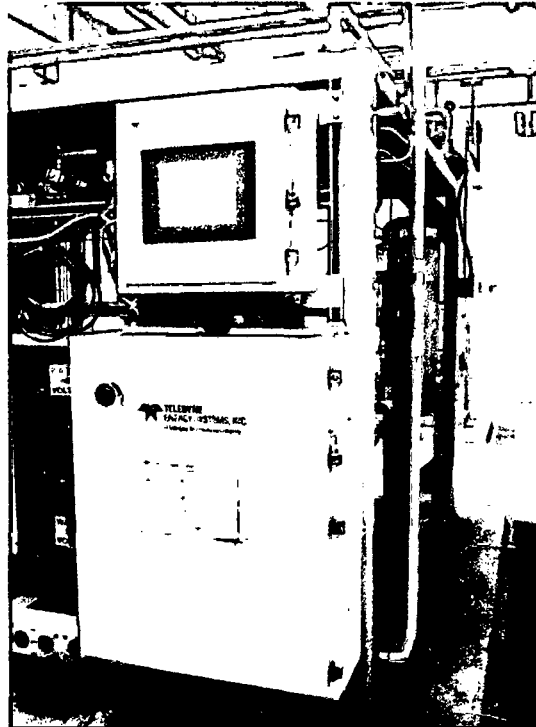


Figura D10. Pantalla Táctil y PLC.

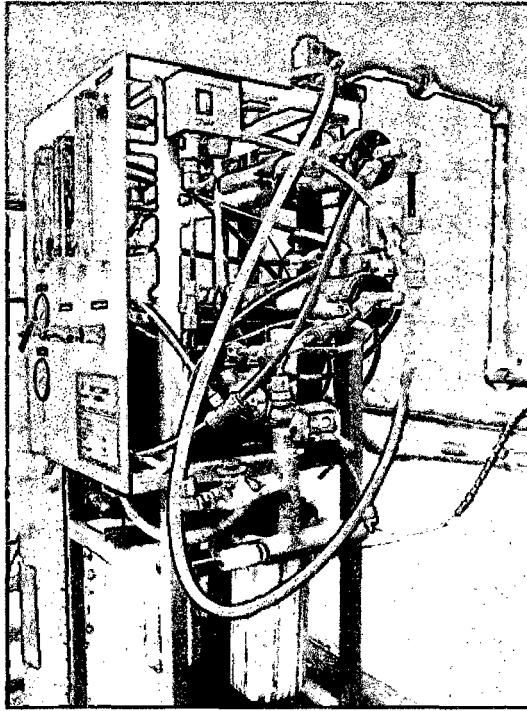


Figura D11. Planta de tratamiento de agua desionizada.

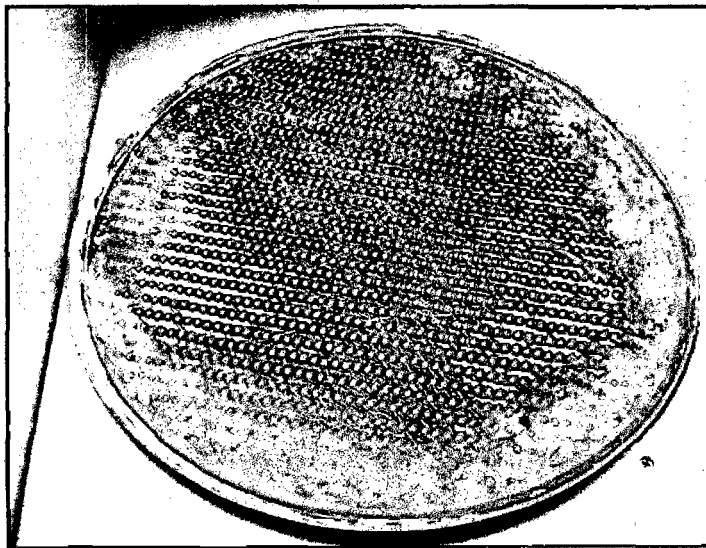


Figura D12. Muestra de cátodo de generador EC-750.

ANEXO E

Cálculos para evaluación económica.

- ✓ **Tabla de análisis de mercado de argón.**
- ✓ **Costos de producción unitaria de insumos en Planta APU.**
- ✓ **Tabla para el cálculo de la TIR.**

Tabla E1. Análisis de mercado de argón

PERU - 2012

			2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
AÑOS		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
VENTAS DE EMPRESA												
Argón UHP	Th m3	-	155	170	190	210	220	240	255	280	300	330
Argón estándar	Th m3	-	140	160	180	200	230	250	270	280	300	310
Mezcla clásica Ferroline (80% Ar/20%CO2)	Th m3	-	260	280	300	310	320	340	355	375	390	400
Otras mezclas	Th m3	-	20	20	20	20	20	20	20	20	25	25
Vol venta de empresa	Th m3	-	575	630	690	740	790	850	900	955	1015	1065
Precio promedio	US\$/m3	-	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5
Total ventas de empresa	Th US\$	-	3 163	3 465	3 795	4 070	4 345	4 675	4 950	5 253	5 583	5 858
VENTAS DE COMPETENCIA												
Argón estándar + UHP	Th m3	-	590	600	620	630	640	660	670	680	690	700
Mezcla clásica	Th m3	-	330	340	350	360	370	380	400	410	420	430
Otras mezclas	Th m3	-	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Volumen venta de competencia	Th m3	-	950	970	1 000	1 020	1 040	1 070	1 100	1 120	950	1 160
Precio promedio	US\$/m3	-	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Total ventas de competencia	Th US\$	-	5 700	5 820	6 000	6 120	6 240	6 420	6 600	6 720	5 700	6 960
TOTAL DE MERCADO	Th m3	-	1 525	1 600	1 690	1 760	1 830	1 920	2 000	2 075	1 965	2 225
VENTAS TOTALES	Th US\$	-	8 863	9 285	9 795	10 190	10 585	11 095	11 550	11 973	11 283	12 818
Total Mercado de Empresa	Th m3	-	586	640	694	748	802	856	910	965	1 019	1 073
Venta de Empresa	Th US\$	-	3 163	3 465	3 795	4 070	4 345	4 675	4 950	5 253	5 583	5 858
Venta de Competencia (*)	Th US\$	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total Venta de Empresa	Th US\$	-	3 223	3 520	3 817	4 114	4 411	4 708	5 005	5 308	5 605	5 902

Nota: Th = 1000

Fuente: Elaboración propia.

Tabla E2 . Costos de producción unitaria de insumos en Planta APU.

COSTO DE OPERACIÓN EN PLANTA DE PRODUCCIÓN				
Componente	Requerimiento por m ³ Ar	Requerimiento anual	Costos Unitario	Costo Total anual US\$
Materia prima	0,097 m ³	643 333 m ³	0,30 US\$/m3	193 000,00
Agua de enfriamiento.	0,50 m ³	322 581 m ³	0,062 US\$/m3	20 000,00
Hidrógeno UHP para purificación	0,155 m ³	100 000 m ³	1,92 US\$/m3	192 000,00
Aire de instrumentación	0,310 m ³	200 000 m ³	0,01 US\$/m3	2 000,00
Nitrógeno UHP para regeneración	0,155 kg	100 000 kg	0,04 US\$/kg	4 000,00
Consumo de energía	19,59 kWh	12 634 615 kWh	0,052 US\$/kWh	657 000,00
Grasa para compresor	-	50 kg	20 US\$/kg	1 000,00
Combustible para unidad móvil	-	7533 gal	5,31 US\$/gal	40 000,00
Mano de obra (2 supervisores mas 1 mecanico mas 1 conductor)	-	-	-	57 000,00
Fungibles y mantenimiento (5% inversión inicial)	-	-	-	173 000,00
Consumo de gases de calibración y celdas para analizadores	-	-	-	4 000,00
Seguros y documentación (0,5 % inversion inicial)	-	-	-	15 000,00
Costo total de operación				1 358 000,00
COSTO DE OPERACIÓN EN PLANTA DE ENVASADO				
DESCRIPCIÓN				COSTO TOTAL US\$
Mano de obra (1 envasador mas 1 vendedor)	-	-	-	27 000,00
Gastos administrativos y de ventas (10 % ventas)	-	-	-	363 000,00
Costo total envasado				390 000,00
Costo total (Operación + envasado)				1 748 000,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla E3. Tabla de cálculos de TIR

AÑO	TASAS												
	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
1	0,909	0,870	0,833	0,800	0,769	0,741	0,714	0,690	0,667	0,645	0,625	0,606	0,588
2	0,826	0,756	0,694	0,640	0,592	0,549	0,510	0,476	0,444	0,416	0,391	0,367	0,346
3	0,751	0,658	0,579	0,512	0,455	0,406	0,364	0,328	0,296	0,269	0,244	0,223	0,204
4	0,683	0,572	0,482	0,410	0,350	0,301	0,260	0,226	0,198	0,173	0,153	0,135	0,120
5	0,621	0,497	0,402	0,328	0,269	0,223	0,186	0,156	0,132	0,112	0,095	0,082	0,070
6	0,564	0,432	0,335	0,262	0,207	0,165	0,133	0,108	0,088	0,072	0,060	0,050	0,041
7	0,513	0,376	0,279	0,210	0,159	0,122	0,095	0,074	0,059	0,047	0,037	0,030	0,024
8	0,467	0,327	0,233	0,168	0,123	0,091	0,068	0,051	0,039	0,030	0,023	0,018	0,014
9	0,424	0,284	0,194	0,134	0,094	0,067	0,048	0,035	0,026	0,019	0,015	0,011	0,008
10	0,386	0,247	0,162	0,107	0,073	0,050	0,035	0,024	0,017	0,012	0,009	0,007	0,005

AÑO	UTILIDAD ThUS\$	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
0	-3 460	-3 460,0	-3 460,0	-3 460,0	-3 460,0	-3 460,0	-3 460,0	-3 460,0	-3 460,0	-3 460,0	-3 460,0	-3 460,0	-3 460,0	-3 460,0
1	1 007	915,8	876,0	839,5	805,9	774,9	746,2	719,6	694,8	671,6	649,9	629,6	610,5	592,6
2	1 478	1 221,1	1 117,2	1 026,0	945,6	874,3	810,7	753,8	702,7	656,7	615,0	577,2	542,7	511,2
3	1 478	1 110,1	971,5	855,0	756,5	672,5	600,5	538,5	484,6	437,8	396,8	360,7	328,9	300,7
4	1 478	1 009,2	844,8	712,5	605,2	517,3	444,8	384,6	334,2	291,9	256,0	225,4	199,3	176,9
5	1 478	917,4	734,6	593,8	484,1	397,9	329,5	274,7	230,5	194,6	165,1	140,9	120,8	104,1
6	1 478	834,0	638,8	494,8	387,3	306,1	244,1	196,2	159,0	129,7	106,5	88,1	73,2	61,2
7	1 478	758,2	555,4	412,3	309,9	235,5	180,8	140,2	109,6	86,5	68,7	55,0	44,4	36,0
8	1 478	689,3	483,0	343,6	247,9	181,1	133,9	100,1	75,6	57,7	44,3	34,4	26,9	21,2
9	1 478	626,6	420,0	286,4	198,3	139,3	99,2	71,5	52,1	38,4	28,6	21,5	16,3	12,5
10	1 893	729,7	467,8	305,7	203,2	137,3	94,1	65,4	46,1	32,8	23,6	17,2	12,7	9,4

TOTALES VPN ThUS\$	5 351,36	3 649,12	2 409,72	1 483,95	776,27	223,92	-215,36	-570,67	-862,43	-1 105,29	-1 309,92	-1 484,24	-1 634,22
---------------------------	----------	----------	----------	----------	--------	--------	---------	---------	---------	-----------	-----------	-----------	-----------

Nota: Th = 1000

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO F

**Planos de equipos, eléctricos y mecánicos para montaje de Planta de
Hidrógeno.**