



Operación y mantenimiento de equipos electrolizadores de tecnología PEM

TEMA 3:

Mantenimiento de un electrolizador PEM.

Título del Proyecto: “Desarrollo de tecnologías avanzadas de producción, almacenamiento y distribución de Hidrógeno, y su transferencia industrial para la Nueva Era del Hidrógeno en España”.

Órgano concedente: Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades y del CDTI - Centro de Excelencia Cervera:
CER-20211002



“Financiado por la Unión Europea –



NextGenerationEU”

CONTENIDO

3. MANTENIMIENTO ELECTROLIZADORES PEM	3
3.1 ELEMENTOS DEL EQUIPO	5
3.1.1 sistema de tratamiento de agua.	7
3.1.2 deposito de agua principal.	9
3.1.3 deposito de agua secundario.	10
3.1.4 stack.	11
3.1.5 secado y salidas de gases.	11
3.2 FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO	13
3.3 SISTEMA CONTROL Y SISTEMA ELECTRICO	19
3.3.1 Puesta en marcha y operación del sistema	21
3.3.2 Avisos, alarmas y mensajes de error	24
3.3.3 Equipos y ESQUEMAS ELECTRICOS	25
3.4 OPERACIONES DE MANTENIMIENTO	30
3.4.1 Inertización con nitrógeno.....	30
3.4.2 Cambio de filtros sistema de agua.....	32
3.4.3 Búsqueda de fugas de hidrógeno	35
3.4.4 Comprobación estado stack Y operación A CARGAS PARCIALES.....	41
3.4.5 Medida de la curva de polarizacion	43
3.4.6 Medida del rendimiento real.....	43
3.4.7 Cambio stack.....	45

3. MANTENIMIENTO ELECTROLIZADORES PEM

Este tema presenta de forma real el funcionamiento y operaciones de mantenimiento de un equipo electrolizador de tecnología PEM. El equipo elegido para ilustrar los componentes y diferentes procedimientos, ha sido un electrolizador de la marca H2GREEM (<https://h2greem.com/>), equipo empleado durante las pruebas realizadas en el proyecto H2NewAge.



Ilustración 1: Diseño 3D del equipo LPGREEM 1000

En concreto el equipo empleado en el proyecto consta de las siguientes características:

- Modelo: LPGREEM 1000
- Potencia nominal: 6kW
- Presión máxima de producción 6 Bar
- Voltaje de entrada: 400Vac 50hz.
- Producción nominal de hidrógeno: 1000l/h o 1Nm3/h



Ilustración 2: Placa de características equipo LPGREEM 1000

La familia de equipos LPGREEM están especialmente pensados para proyectos demostrativos o pilotos preindustriales, donde el hidrógeno u oxígeno son usados para una primera aproximación en el conocimiento del funcionamiento de los electrolizadores en las diversas aplicaciones que estos puedan tener. Este tipo de construcción favorece el reconocimiento de todas las partes del electrolizador y el funcionamiento de los equipos.



Ilustración 3: fotografía real del equipo LPGREEM 1000

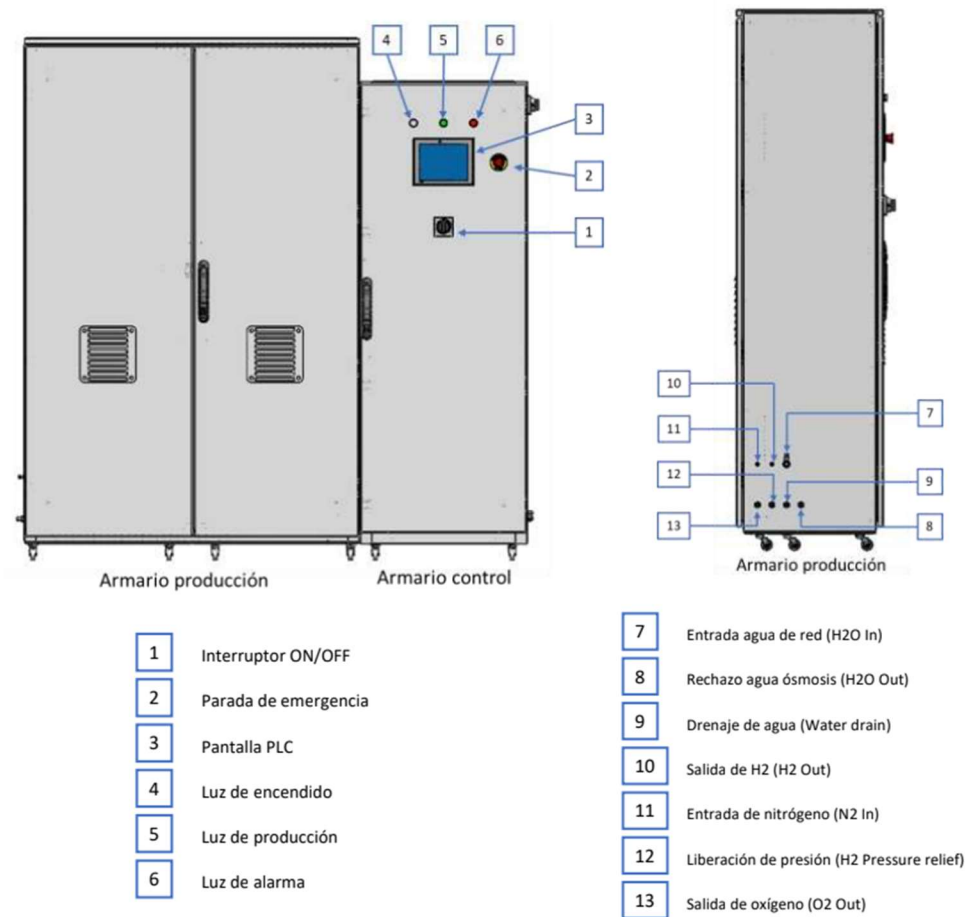


Ilustración 4: Elementos y conexiones del equipo

3.1 ELEMENTOS DEL EQUIPO

A continuación, se muestra el diagrama P&I del equipo:

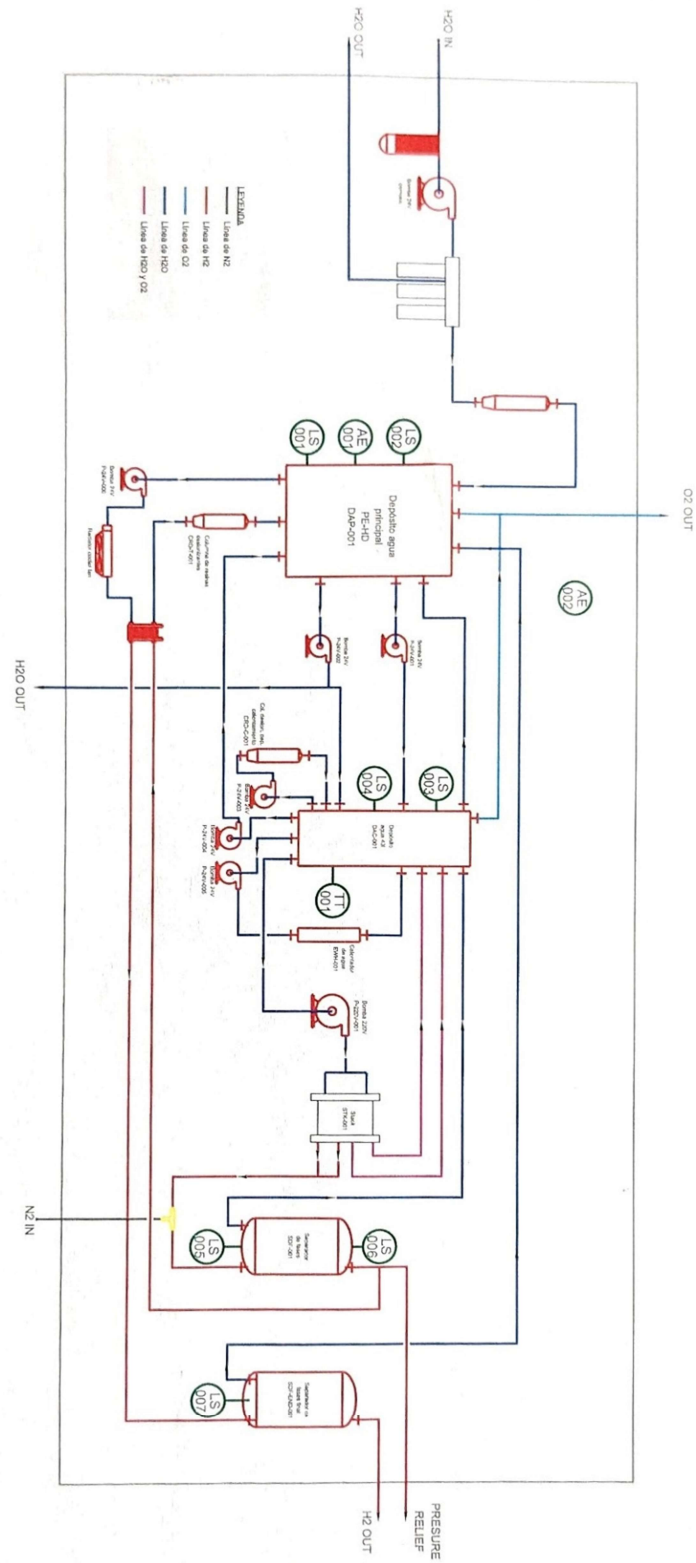


Ilustración 5: Diagrama P&I

Para facilitar su explicación dividiremos el equipo en bloques, señalados sobre el P&I en cuadros de colores.

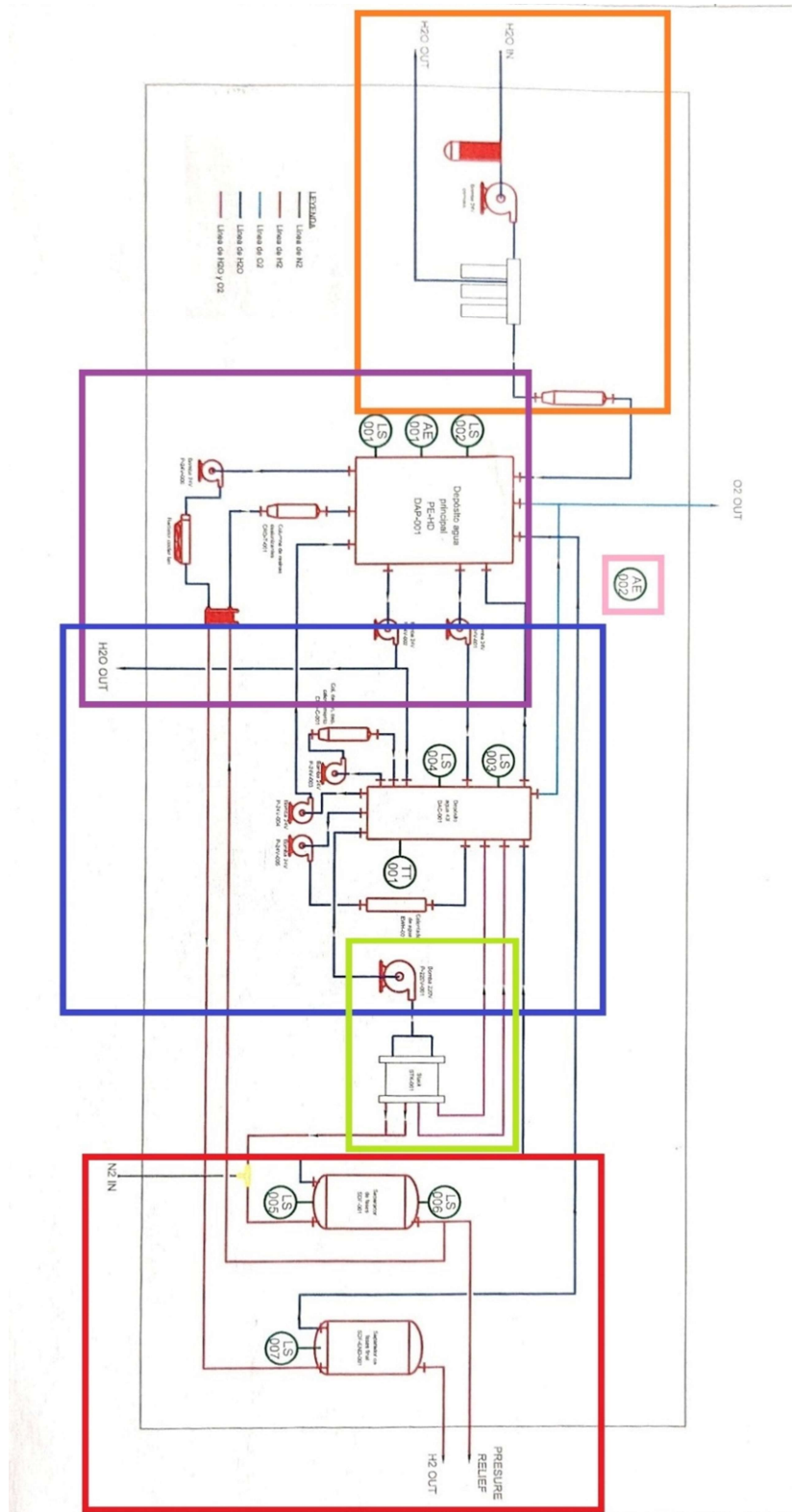


Ilustración 6: Diagrama P&I con indicación de bloques

3.1.1 SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUA.

Un equipo de ósmosis inversa (OI) es un sistema de purificación de agua que utiliza una membrana semipermeable para eliminar impurezas, contaminantes y sales disueltas del agua del grifo. A continuación, se describe el funcionamiento típico de un equipo de ósmosis inversa:

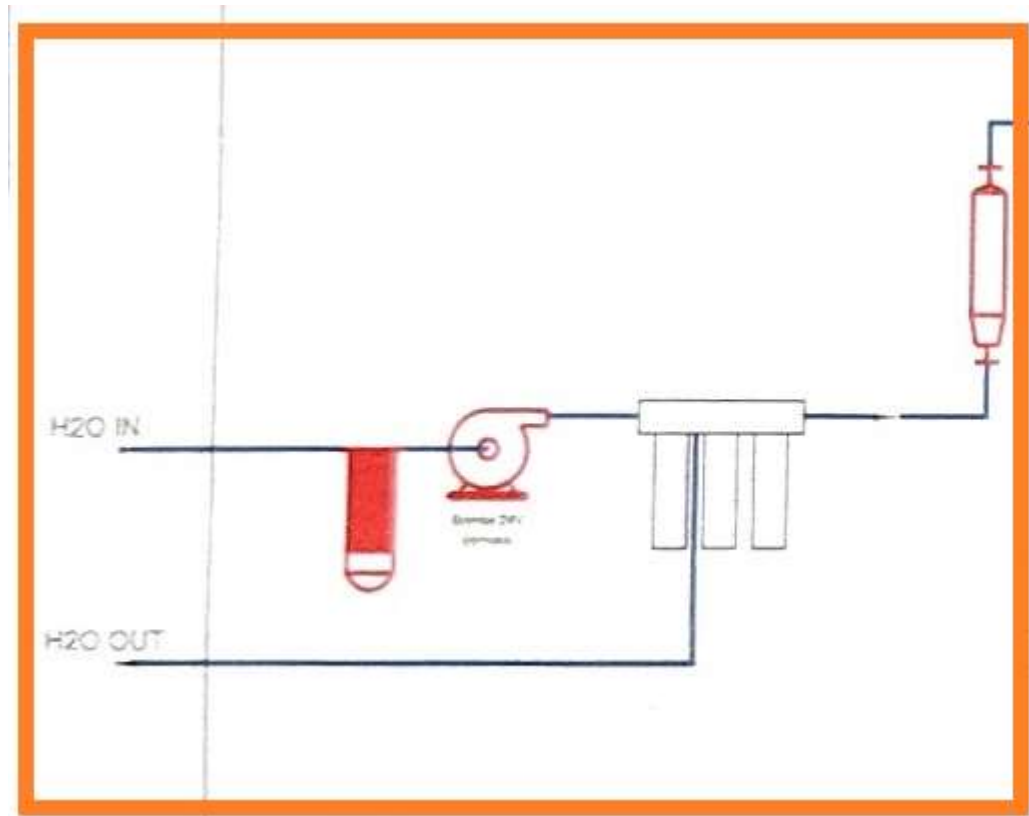


Ilustración 7: Sistema de tratamiento de agua

1. Pre tratamiento del Agua

Antes de que el agua del grifo llegue a la membrana de ósmosis inversa, pasa por unas etapas de pretratamiento para eliminar partículas grandes y proteger la membrana. Estas etapas suelen incluir:

Filtro de Sedimentos: Remueve partículas grandes como arena, polvo y óxido.

Filtro de Carbón Activado: Elimina cloro, compuestos orgánicos y otros contaminantes que podrían dañar la membrana de OI o afectar el sabor del agua.

En el caso del equipo de estudio el sistema de pre tratamiento incluye un filtro y una bomba de circulación de agua, para facilitar el paso de la corriente por el sistema de tratamiento.

2. Membrana de Ósmosis Inversa

El corazón del sistema es la membrana de ósmosis inversa. Esta membrana semipermeable tiene poros extremadamente pequeños que permiten el paso de moléculas de agua pero bloquean las impurezas y solutos más grandes, como sales, metales pesados y microorganismos.

Proceso de Presión: El agua del grifo se presuriza y se fuerza a través de la membrana. La presión es esencial para superar la presión osmótica natural y lograr que el agua pase de una solución más concentrada (con contaminantes) a una menos concentrada (purificada).

3. Postratamiento del Agua Purificada

Después de pasar por la membrana de ósmosis inversa, el agua purificada puede someterse a etapas adicionales de filtración para mejorar aún más su calidad. En el caso del sistema AEG del que dispone el equipo, el agua pasa por un filtro de post tratamiento.

4. Sistema de Almacenamiento y Distribución

El agua purificada se almacena en un tanque de almacenamiento hasta que esté lista para su uso. Cuando se abre el grifo, el agua del tanque pasa por un filtro final y se distribuye para el consumo.

5. Rechazo de Agua Residual

Durante el proceso de ósmosis inversa, una parte del agua que contiene las impurezas concentradas se descarga como agua residual. Este agua de rechazo se elimina del sistema y se lleva al desagüe.

Como el equipo tiene que ser alimentado con agua desionizada, el agua pasa por una columna desionizante.

Una columna de desionización de agua es un dispositivo utilizado para eliminar los iones disueltos en el agua, produciendo agua desionizada o deionizada (DI). El proceso se basa en el uso de resinas de intercambio iónico que retienen los iones disueltos y liberan a cambio iones de hidrógeno (H^+) y iones de hidroxilo (OH^-), que se combinan para formar agua pura (H_2O). A continuación, se explica el funcionamiento y los materiales involucrados:

Funcionamiento de una Columna de Desionización de Agua

Entrada de Agua Bruta El agua bruta (normalmente agua del grifo o agua pretratada) entra en la columna de desionización.

Intercambio Iónico. La columna contiene resinas de intercambio iónico, que son pequeñas perlas de material sintético (generalmente polímeros orgánicos). Estas resinas están cargadas con iones que se intercambian con los iones presentes en el agua.

Resinas de Intercambio Catiónico: Estas resinas están cargadas con iones de hidrógeno (H^+). Cuando el agua pasa a través de estas resinas, los cationes (iones positivos) presentes en el agua (como Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+) son intercambiados por iones de hidrógeno.

Resinas de Intercambio Aniónico: Estas resinas están cargadas con iones de hidroxilo (OH^-). Los aniones (iones negativos) presentes en el agua (como Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^-) son intercambiados por iones de hidroxilo.

Combinación de H^+ y OH^- Los iones de hidrógeno (H^+) y los iones de hidroxilo (OH^-) liberados por las resinas se combinan para formar moléculas de agua (H_2O), resultando en agua desionizada.

Materiales Utilizados en una Columna de Desionización

Resinas Catiónicas: Estas resinas están compuestas típicamente de poliestireno sulfonado. Son resinas ácidas fuertes que intercambian cationes con los iones de hidrógeno.

Resinas Aniónicas: Estas resinas están hechas de poliestireno cuaternizado. Son resinas básicas fuertes que intercambian aniones con los iones de hidroxilo.

Contenedor de la Columna

Material del Contenedor: La columna suele estar hecha de materiales resistentes a la corrosión y a la presión, como polietileno de alta densidad (HDPE), polipropileno o fibra de vidrio.

Ventajas y Aplicaciones de la Desionización

Alta Pureza del Agua: La desionización puede eliminar prácticamente todos los iones disueltos, produciendo agua con una conductividad muy baja.

Ciclo de Vida y Regeneración

Saturación de Resinas: Con el tiempo, las resinas se saturan con los iones intercambiados y pierden su capacidad de desionización.

Regeneración: Las resinas pueden regenerarse mediante el uso de soluciones de ácido (para resinas catiónicas) y base (para resinas aniónicas), restaurando sus capacidades de intercambio iónico. Alternativamente, las resinas pueden ser reemplazadas por nuevas

3.1.2 DEPOSITO DE AGUA PRINCIPAL.

El agua desionizada es almacenada en un depósito principal (150L). De dicho depósito cuelgan los siguientes elementos.

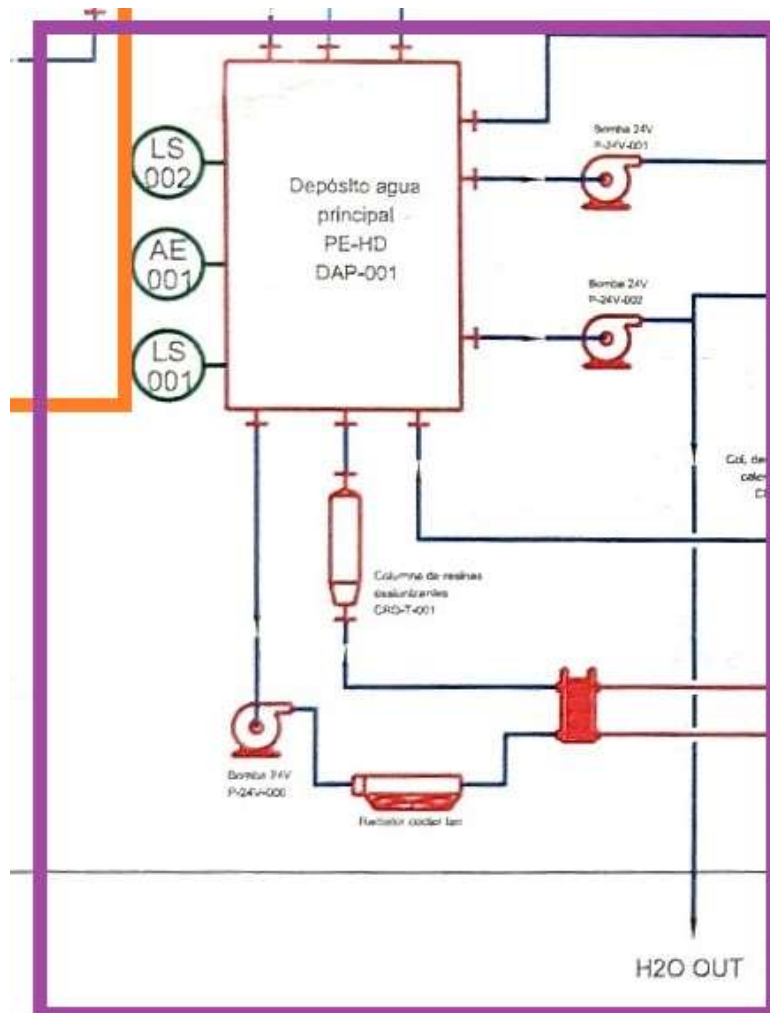


Ilustración 8: Depósito de agua principal y sus auxiliares

- 2 bombas de agua que alimentan el depósito de agua de trabajo del equipo
- Sensores de nivel (LS001 & LS002)

- Sensor de calidad de agua (AE001)
- 1 bomba de recirculación de agua de agua en circuito de refrigeración, el cual incluye una columna desionizante para mantener la calidad del agua en todo momento.

3.1.3 DEPOSITO DE AGUA SECUNDARIO.

El agua es bombeada a un depósito secundario de menos tamaño (43L). De este depósito cuelgan los siguientes elementos:

- 1 bomba de recirculación para un circuito calentador.
- 1 bomba de recirculación para una columna desionizante para mantener la calidad del agua en todo momento.
- 1 bomba de recirculación de agua al depósito principal.
- 1 bomba de alimentación de agua al stack electrolizador
- Sensores de nivel (LS003 & LS004)
- Sensor de temperatura de agua (T001)

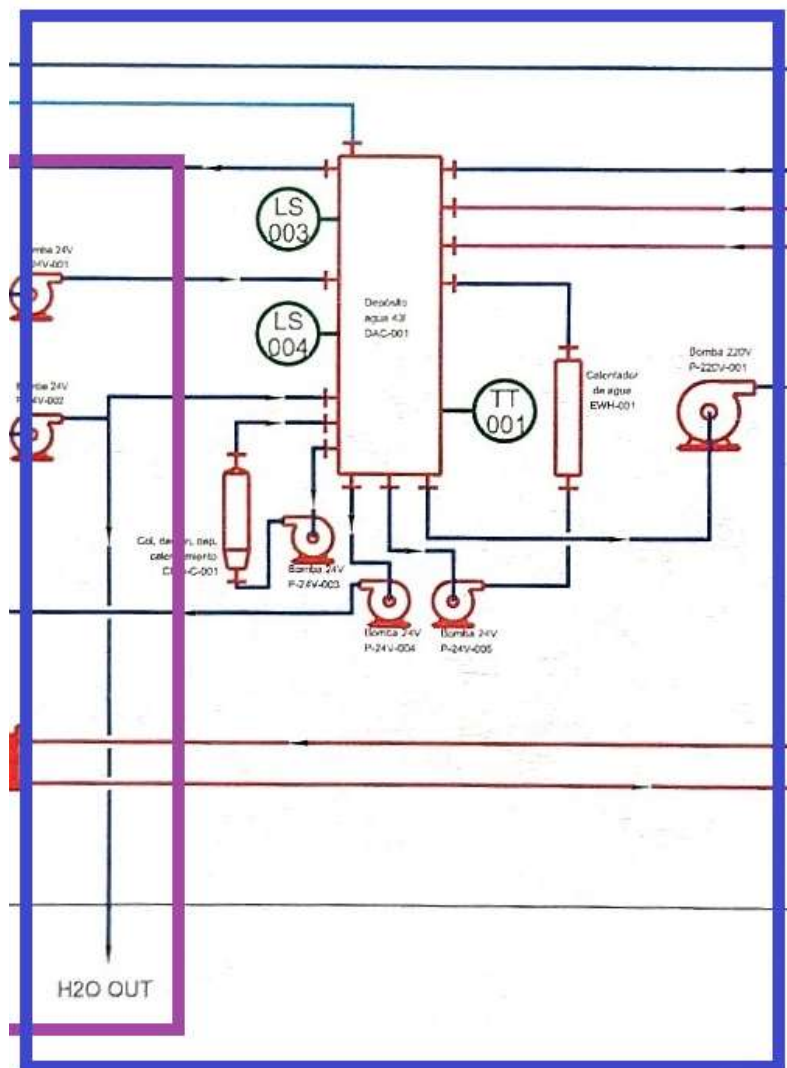


Ilustración 9: depósito de agua de trabajo y sus auxiliares

3.1.4 STACK.

El stack es el corazón del equipo electrolizador PEM, en él, se produce la reacción electroquímica por la cual se produce la separación del agua en oxígeno e hidrógeno, como se ha explicado en el tema 2 de este curso.

El stack es alimentado por agua mediante la bomba P-220V-001 desde el depósito de trabajo y por electricidad. Los cables de alimentación no se encuentran incluidos en este diagrama P&I enfocado en los fluidos.

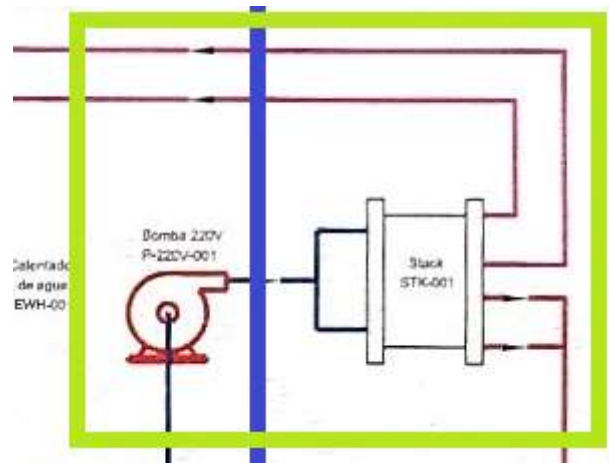


Ilustración 10: stack y su bomba de agua de alimentación

El stack es alimentado por dos corrientes de agua, para el lado de hidrógeno y oxígeno, una vez producida la electrolisis obtenemos dos salidas o líneas, una de línea de hidrógeno húmedo y una línea de oxígeno y agua que es recirculada al depósito de trabajo.

3.1.5 SECADO Y SALIDAS DE GASES.

Por último, el equipo dispone de una última etapa de secado del hidrógeno antes de su salida del equipo, pasando por dos unidades separadoras de fases.

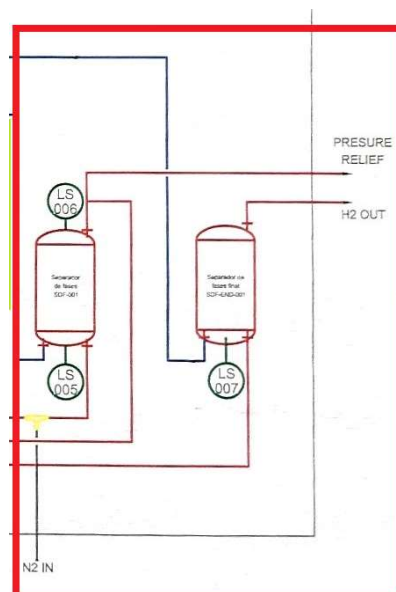


Ilustración 11: sistema de secado de hidrógeno

El separador de fases se basa en las diferencias en las propiedades físicas entre el hidrógeno y el agua, principalmente su densidad, solubilidad y comportamiento de flujo. Aquí hay una descripción general de cómo funciona el proceso:

Entrada de la Mezcla: La mezcla de hidrógeno y agua ingresa al separador de fases a través de una entrada común. Esta mezcla puede estar en forma de gas (hidrógeno y vapor) y líquido (gotas de agua).

Decantación: Debido a la diferencia significativa en la densidad entre el hidrógeno (gas muy ligero) y el agua (líquido mucho más denso), las fases tienden a separarse naturalmente cuando la mezcla se desacelera en un recipiente adecuado.

Zona de Separación: El recipiente está diseñado para proporcionar un área donde la velocidad de la mezcla se reduce considerablemente, permitiendo que el agua líquida, que es más pesada, se asiente en el fondo del recipiente.

Una vez atraviesa el primer separador de gases el hidrógeno es enfriado mediante un intercambiador de calor, refrigerado por el agua del depósito principal e ingresa en un segundo separador de fases.

Coalescencia: En el segundo separador, se utilizan elementos coalescentes (materiales con alta superficie específica) para ayudar a agrupar pequeñas gotas de agua en gotas más grandes, facilitando su separación.

Remoción de Agua: El agua separada se acumula en el fondo del separador y se extrae a través de una salida específica.

Salida de Hidrógeno: El hidrógeno gaseoso, que es mucho menos denso, sube a la parte superior del separador. Desde allí, el hidrógeno purificado se extrae a través de una salida ubicada en la parte superior del dispositivo. En este momento hemos obtenido una pureza de hidrógeno superior al 99,99%

El oxígeno que ha sido recirculado al depósito de trabajo, es venteado por una línea dedicada al exterior, siendo posible su aprovechamiento si fuera necesario, mediante un secado y almacenamiento del mismo.

Así mismo se dispone de una entrada de nitrógeno, utilizada para el inertizado de la tubería y equipos de hidrógeno en caso de que sea necesaria una operación de mantenimiento en esta área. Este procedimiento será explicado en el apartado 1.4 de este tema.

Por último, el sensor AE002 es un sensor de hidrógeno en aire que verifica en todo momento la estanqueidad del equipo y funciona como elemento de seguridad ante posibles fugas.



Ilustración 12: símbolo sensor hidrógeno en aire

3.2 FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO

En este apartado, se realizará una explicación del funcionamiento del equipo apoyándose en fotos reales y en los conocimientos adquiridos en el apartado anterior.

PASO 1: desonización del agua, para ello como hemos visto, se produce un tratamiento del agua corriente de entrada.



Ilustración 13: prefiltro y bomba de alimentación



Ilustración 14: sistema AEG de desionización

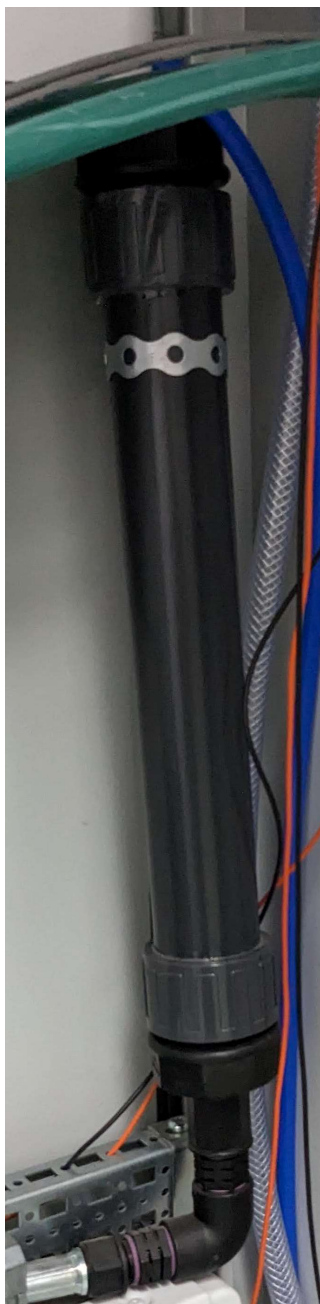


Ilustración 15: Columna desionizadora

PASO 2: almacenamiento del agua en el depósito principal:

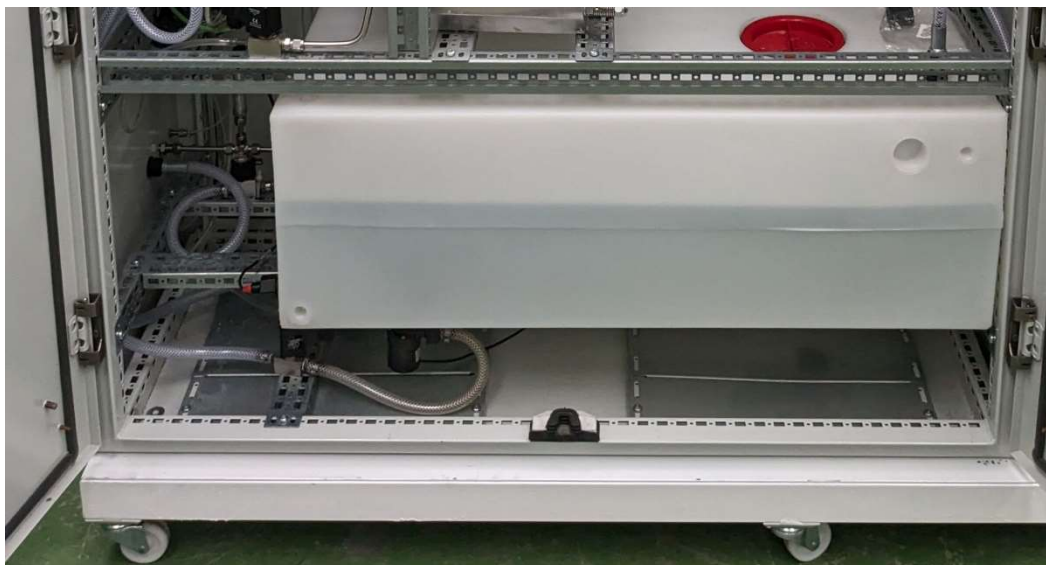


Ilustración 16: depósito de agua principal

PASO 3: almacenamiento del agua en el depósito de trabajo:



Ilustración 17: depósito de agua trabajo

PASO 4: calentador del agua de trabajo:



Ilustración 18: elemento calentador eléctrico del agua de trabajo

PASO 5: stack:

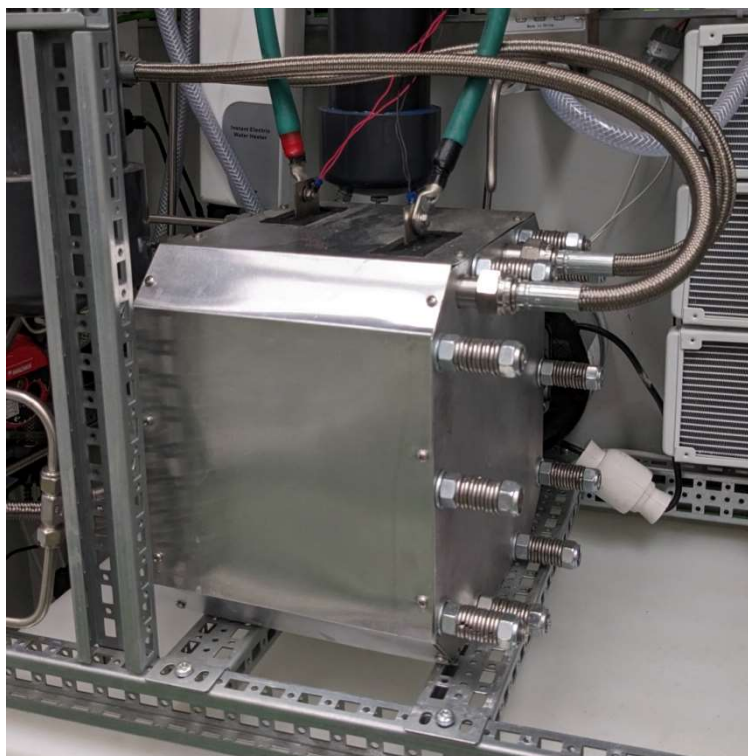


Ilustración 19: stack electrolizador

PASO 5: secado hidrógeno:



Ilustración 20: Columna 1 secado de hidrógeno

PASO 6: condensación agua en hidrógeno:

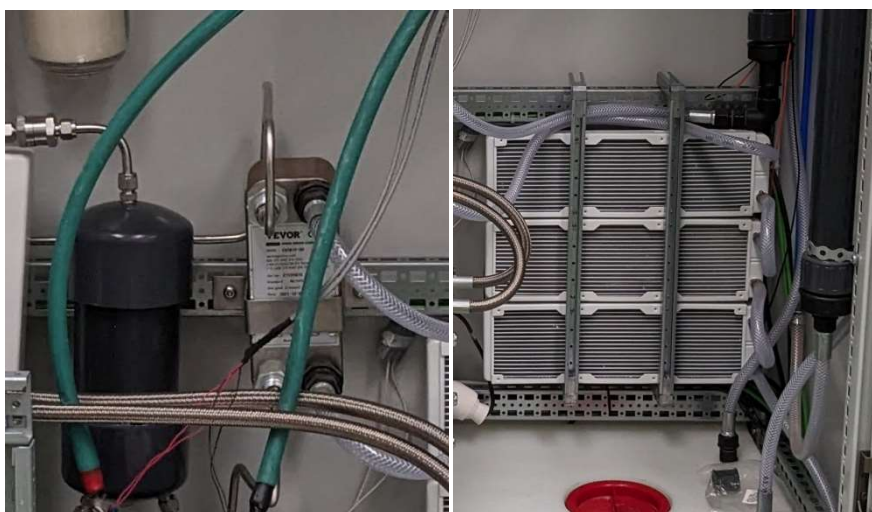


Ilustración 21: intercambiador de calor y radiador sistema de refrigeración hidrógeno

Paso 7: salida / entrada de gases y agua del equipo



Ilustración 22: conexiones de entrada y salida del equipo

- Conexión salida H2 Racor para tubo 8 mm
- Conexión salidas oxígeno Racor conexión rápida para tubo 8 mm
- Conexión liberación de presión Racor conexión rápida para tubo 8 mm
- Conexión para nitrógeno Racor para tubo 1/8"
- Conexión para drenaje de agua Racor conexión rápida para tubo 8 mm
- Otros requerimientos: onexión para purga de nitrógeno. Línea 1.5 bar.

3.3 SISTEMA CONTROL Y SISTEMA ELECTRICO

Una vez conocido el funcionamiento equipo desde el punto de vista de gases y fluidos, el siguiente apartado se centra en el sistema de control y eléctrico y el modo de operar el equipo.



Ilustración 23: cuadro eléctrico y de control del equipo

El electrolizador LPGREEM basa su sistema de control en un sistema integrado PLC + HMI de la marca UNITRONICS modelo UniStream® 7", que puede verse en la siguiente imagen.



Ilustración 24: pantalla / PLC del equipo

EL PLC dispone de las siguientes características técnicas.

- Ethernet TCP/IP
- USB host
- Mini USB
- RS485
- RS232
- Add-on ports: CANbus, RS485, RS232
- Soporta los siguientes protocolos:
 - MQTT Client
 - EtherNet/IP
 - MODBUS TCP
 - CANopen, CANlayer2, UniCAN
 - SNMP
 - BACnet, KNX and M-Bus via gateway
 - General Features: SQL Client*, Web Server*, E-mail & SMS, Remote access via VNC, FTP server & client, 3G Modem support

En concreto el electrolizador LPGREEM dispone del modelo X5-B7 con las entradas y salidas distribuidas en módulos externos

UniStream 7" Built-in I/Os										
		Inputs ¹				Outputs				
Article ³	Summary	Digital (Isolated)	HSC/Shaft-encoder *1	Analog	Temperature inputs, RTD/TC	Transistor *2 (Isolated)	PWM *2	Relay	Analog	Operating Voltage
US7-x5-B1 US7-x10-B1	No built-in I/Os	None	None	None	None	None	None	None	None	12/24VDC

Ilustración 25: características UNitronics U7 x5 B1

En la ilustración 26, podemos ver los módulos de entradas y salidas uno de cuyos modelos mostramos a continuación.



Ilustración 26: módulo de entradas digitales Unitronics UID-1600

3.3.1 PUESTA EN MARCHA Y OPERACIÓN DEL SISTEMA

El equipo dispone de un interruptor general en el lateral del armario de control. Para arrancar el PLC accione el interruptor situado en la parte frontal del equipo, en el armario de control, hasta la posición 1. Esto encenderá el sistema en modo de reposo, es decir, el sistema se enciende, pero no comienza la producción de hidrógeno. La luz de encendido, de color blanco (Ilustración 24), se iluminará.

La Ilustración 27 muestra la pantalla de inicio del PLC tras el encendido del sistema.

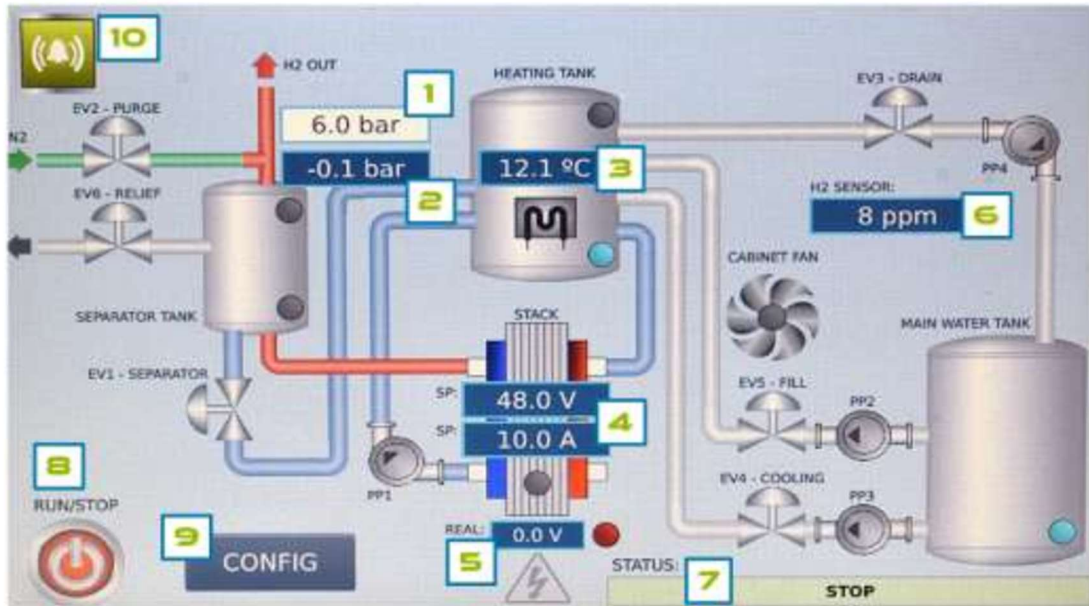


Ilustración 27: pantalla principal de control

La pantalla de inicio (Ilustración 27) muestra la siguiente información:

- Presión de operación (marca 1)
- Presión real (marca 2)
- Temperatura del agua del depósito de calentamiento (marca 3)
- Tensión y corriente configuradas para el stack (marca 4)
- Tensión real del stack (marca 5)
- H2 en la cabina medido por el sensor de hidrógeno (Figura 4, marca 6)
- Estado del sistema (marca 7)

Además, la pantalla de inicio muestra los siguientes botones:

- Botón RUN/STOP (marca 8)
- Botón CONFIG (marca 9)
- Botón ALARMAS, con el icono de una campana (marca 10)

PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO

En la pantalla táctil del PLC presione el botón RUN/STOP (Ilustración 27, marca 8), situado en la esquina inferior izquierda. Una vez alcanzada la temperatura de proceso, el equipo empezará a producir hidrógeno y se regulará automáticamente para mantener la presión seleccionada por el usuario. Para parar la producción de hidrógeno momentáneamente pulse el botón RUN/STOP una vez, y el sistema pasará a estado de reposo. Para reanudar la producción de hidrógeno hay que pulsar de nuevo el botón RUN/STOP. Para apagar el sistema accione el interruptor general situado en la parte frontal del equipo, en el armario de control hasta la posición 0.

Para configurar los diferentes parámetros de producción pulsar el botón CONFIG de la pantalla de inicio (Ilustración 27, marca 9). El PLC mostrará la pantalla de configuración inicial (Ilustración 28).

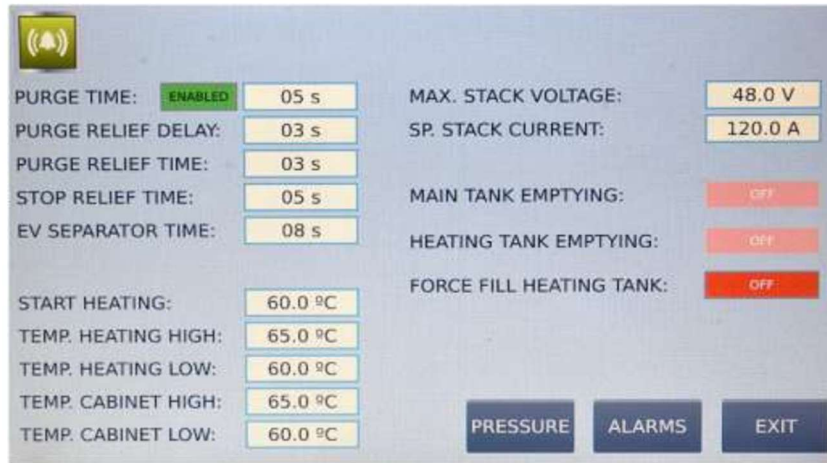


Ilustración 28: pantalla de configuración

Pulsando en el botón PRESSURE de la pantalla de configuración inicial, se accede a la pantalla de configuración de parámetros relativos a la presión (Ilustración 29).

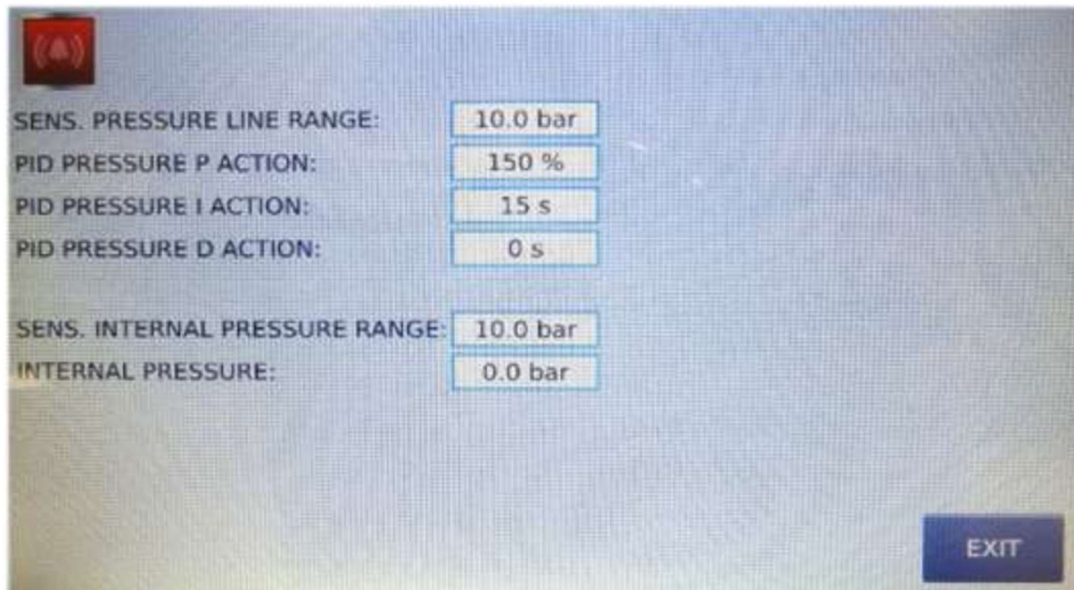


Ilustración 29: pantalla presiones del equipo

Pulsando en el botón ALARMS de la pantalla de configuración inicial, se accede a la pantalla de configuración de parámetros relativos a las alarmas (Ilustración 30).

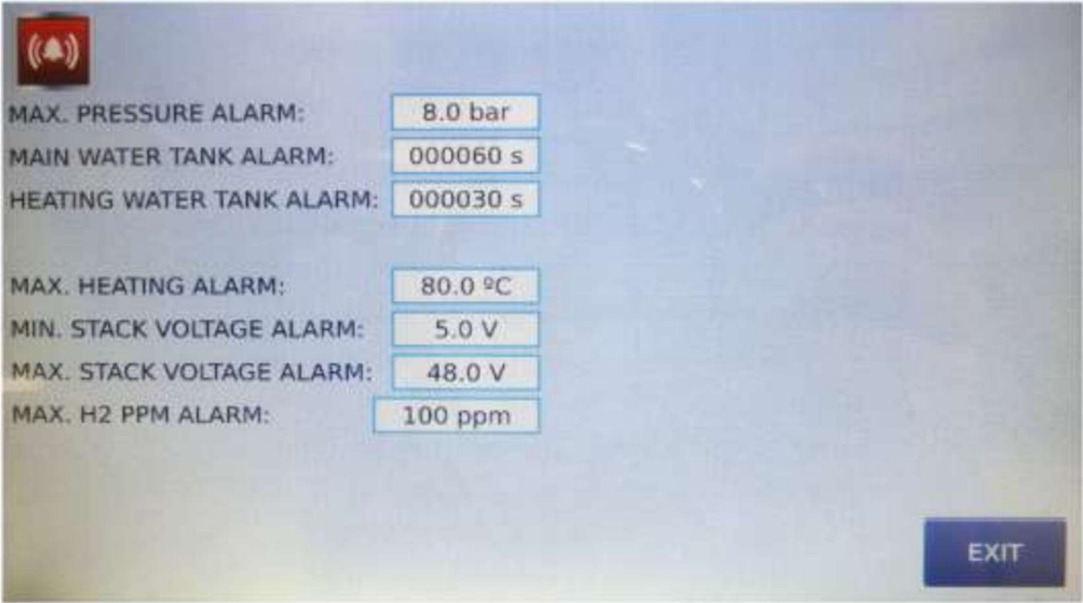


Ilustración 30: pantalla configuración de alarmas

3.3.2 AVISOS, ALARMAS Y MENSAJES DE ERROR

En el caso de producirse alguna situación de alarma durante el proceso de producción de hidrógeno, la pantalla muestra un mensaje. Se puede acceder a las alarmas pulsando sobre el botón ALARMAS, situado en la esquina superior izquierda de la pantalla de inicio (Ilustración 27, marca 10). Se muestra la siguiente pantalla (Ilustración 31) de resumen de alarmas.



Ilustración 31: pantalla resumen de alarmas

A continuación se describen algunas de las alarmas que puede indicar el equipo:

Nivel de agua bajo: el equipo puede seguir funcionando, pero se recomienda proceder al rellenado del depósito. Atención: No es necesario detener la producción de hidrógeno para proceder al rellenado. Atención: Rellenando el depósito y reseteando el mensaje, desaparecerá el aviso.

Nivel de agua crítico: aparece en pantalla señal de alarma, el sistema emite un pitido. El sistema no puede seguir funcionando y detiene su funcionamiento automáticamente hasta que se solucione la causa del mensaje de error. Rellene de agua el depósito. Después vaya a la pantalla AlarmSummary, marque el recuadro de la última columna y a continuación pulse el botón ACK&CLR. Una vez hecho esto el equipo ya está listo para volver a funcionar. Atención: Para detener la señal sonora pulsar el botón "Reset".

Sobrepresión: aparece en pantalla señal de alarma, el sistema emite un pitido. El sistema no puede seguir funcionando, se detiene automáticamente y se libera la presión del circuito.

Una vez liberada la presión, vaya a la pantalla AlarmSummary, marque el recuadro de la última columna y a continuación pulse el botón ACK&CLR. El equipo pasará a modo de espera

Sobrevoltaje: aparece en pantalla señal de alarma, el sistema emite un pitido. El sistema no puede seguir funcionando, se detiene automáticamente y se libera la presión del circuito. Una vez liberada la presión, vaya a la pantalla AlarmSummary, marque el recuadro de la última columna y a continuación pulse el botón ACK&CLR. El equipo pasará a modo de espera. Puede suceder que esté operando el sistema en un entorno de muy baja temperatura. Si acaba de instalar el equipo, permita que se atempera durante 24 horas.

Sobreintensidad Aparece en pantalla señal de alarma, el sistema emite un pitido. El sistema no puede seguir funcionando, se detiene automáticamente y se libera la presión del circuito. Una vez liberada la presión, vaya a la pantalla AlarmSummary, marque el recuadro de la última columna y a continuación pulse el botón ACK&CLR. El equipo pasará a modo de espera. Avise al servicio técnico. Atención: Para detener la señal sonora pulsar el botón "Reset"

3.3.3 EQUIPOS Y ESQUEMAS ELECTRICOS

Como ya se ha visto, el electrolizador LPGREEM dispone de un cuadro de control, similar a otras máquinas eléctricas, compuesto de protecciones, relés, autómatas y otra aparamenta eléctrica habitual. Sin embargo la mayor diferencia, respecto a otros equipos industriales, es la necesidad de un rectificador para proporcionar la alimentación al stack PEM.

Un rectificador AC/DC es un dispositivo electrónico que convierte corriente alterna (AC) en corriente continua (DC). En el caso de los electrolizadores en general, los rectificadores actúan como fuente de corriente. Una fuente de corriente es un dispositivo que suministra una corriente constante independientemente de la resistencia de la carga conectada. La cantidad de corriente que proporciona se mantiene constante aunque el voltaje pueda variar para ajustarse a la resistencia de la carga.

En un electrolizador PEM, con el stack como carga, la respuesta en tensión del mismo, dependerá de su resistencia y procesos internos, siendo mayor cuanto más degradación tengan las celdas.

Dadas las grandes intensidades necesarias en los equipos de electrónica de potencia, empleados en electrolizadores PEM, son grandes y pesados. En el caso del equipo del equipo LPGREEM, necesitamos una fuente de corriente capaz de suministrar hasta 120A y 48V. Siendo el utilizado un modelo custom.

Por motivos de confidencialidad no se dispone del modelo exacto, utilizado, pero a continuación se muestra la hoja de características de sistema comercial, que cumple con las condiciones exigidas por el equipo.

TECHNICAL SPECIFICATIONS

PART NUMBER	381060.100
Capacity	6000W
AC INPUT	
Voltage Range	250Vac to 475Vac (Nominal @ 323Vac to 456Vac)
Frequency	45Hz to 66Hz
Maximum Input Current	12A / Phase
Power Factor	≥0.99
Input Protection	Varistors for transient protection, Mains Fuse for both input lines Shutdown @ > 475Vac with hysteresis
DC OUTPUT	
Output Voltage	53.5Vdc adjustable
Output Power (Maximum)	6000W @ nominal input
Output Current (Maximum)	125A @ 48Vdc with nominal input
Peak Efficiency	up to 96%
Current Sharing	≤ ±5% of max current from 20% to 100% load
Static Voltage Regulation	±0.5% from 5% to 100% load
Dynamic Voltage Regulation	±5% for 10%-90% or 90%-10% load variation, regulation time <50ms
Hold Up Time	>10ms; output voltage >43.5Vdc @ 3000W
Ripple and Noise	<200mVp-p, 20MHz bandwidth <2mVrms psophometric
Output Protection	Overvoltage shutdown; hot plug-in, inrush current limiting; high temperature protection; short circuit proof
CONTROL and MONITORING	
Rectifier Alarm and Signaling	High & low mains shutdown, high temperature shutdown, rectifier failure, overvoltage shutdown, fan failure, communication failure
Visual Indications	Alarms - RED Warning - YELLOW Normal operation - GREEN
OTHER SPECIFICATIONS	
Isolation	Input to Output: 3.0kVac, Input to Earth: 1.5kVac, Output to Earth: 0.5kVdc
Cooling	Fan-cooled, front to back airflow
Fan Speed	Regulated by temperature and output power
MTBF	> 300,000 hrs @ 25 °C
ENVIRONMENTAL	
Operating Temperature Range	-10°C to +65°C (de-rates above 50°C)
Storage Temperature Range	-40°C to +70°C
Relative Humidity	Operating: 5% to 98% RH non-condensing Storage: 0% to 98% RH non-condensing
Acoustic Noise	<58dB @ full load, 40°C
PHYSICAL	
Dimensions WxDxH (mm)	210 x 345 x 86 (2U)
Net Weight (kg)	6.2
DESIGN STANDARDS	
Electrical Safety	EN/IEC62368-1
EMC	EN ETSI 300 386 V2.1.1, EN61000-4-2/-3/-4/-5/-11
Others	CE, RoHS compliant

Ilustración 32: ejemplo especificaciones fuente de corriente (en la bibliografía este equipo suele llamarse de forma genérica como rectificador).



Ilustración 33: rectificador. La foto es una representación solamente.

A continuación se incluyen a modo de ejemplo algunos de los esquemas eléctricos incluidos en el manual de mantenimiento, que son necesarios para la reparación de averías en el sistema eléctrico o de control.

En la siguiente imagen, se muestra un esquema típico de borneros.

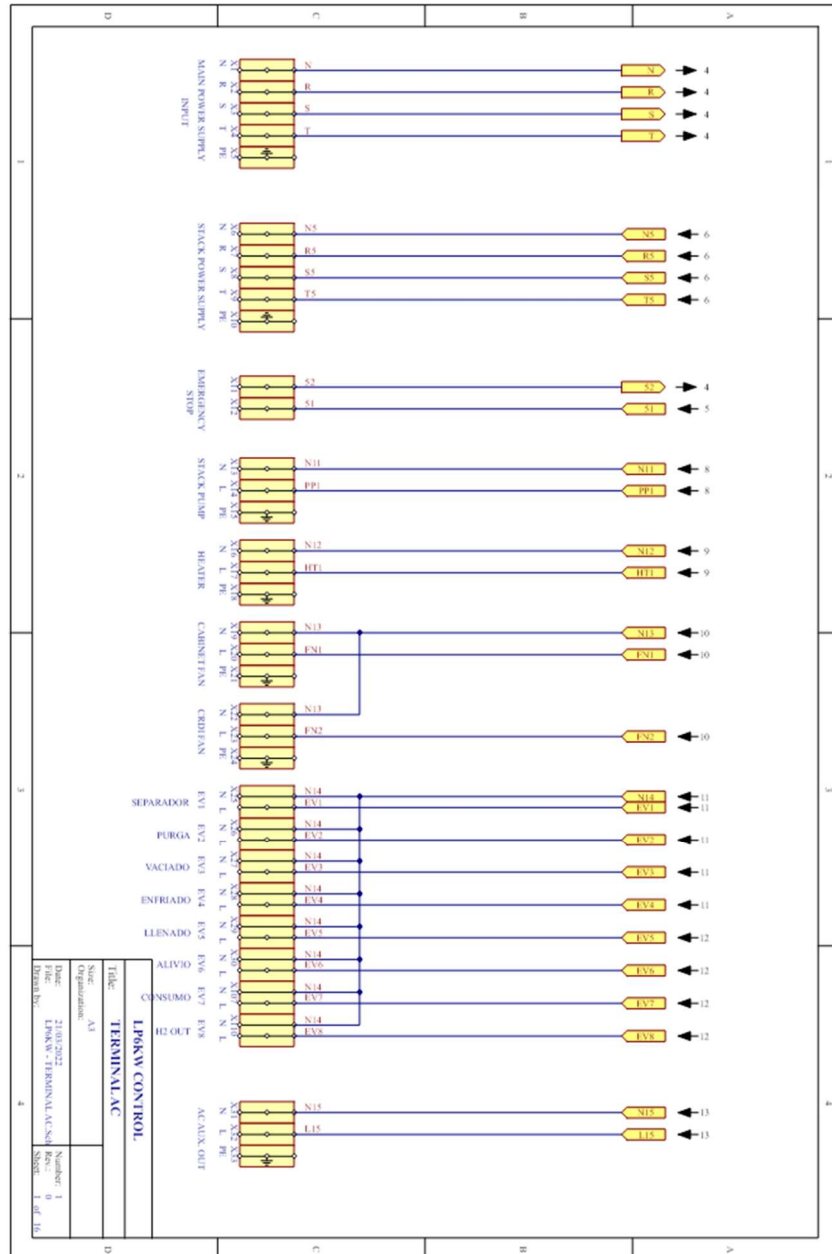


Ilustración 34: Bornero ejemplo

En la siguiente imagen, se muestra la conexión eléctrica del sistema de control del equipo de rectificado

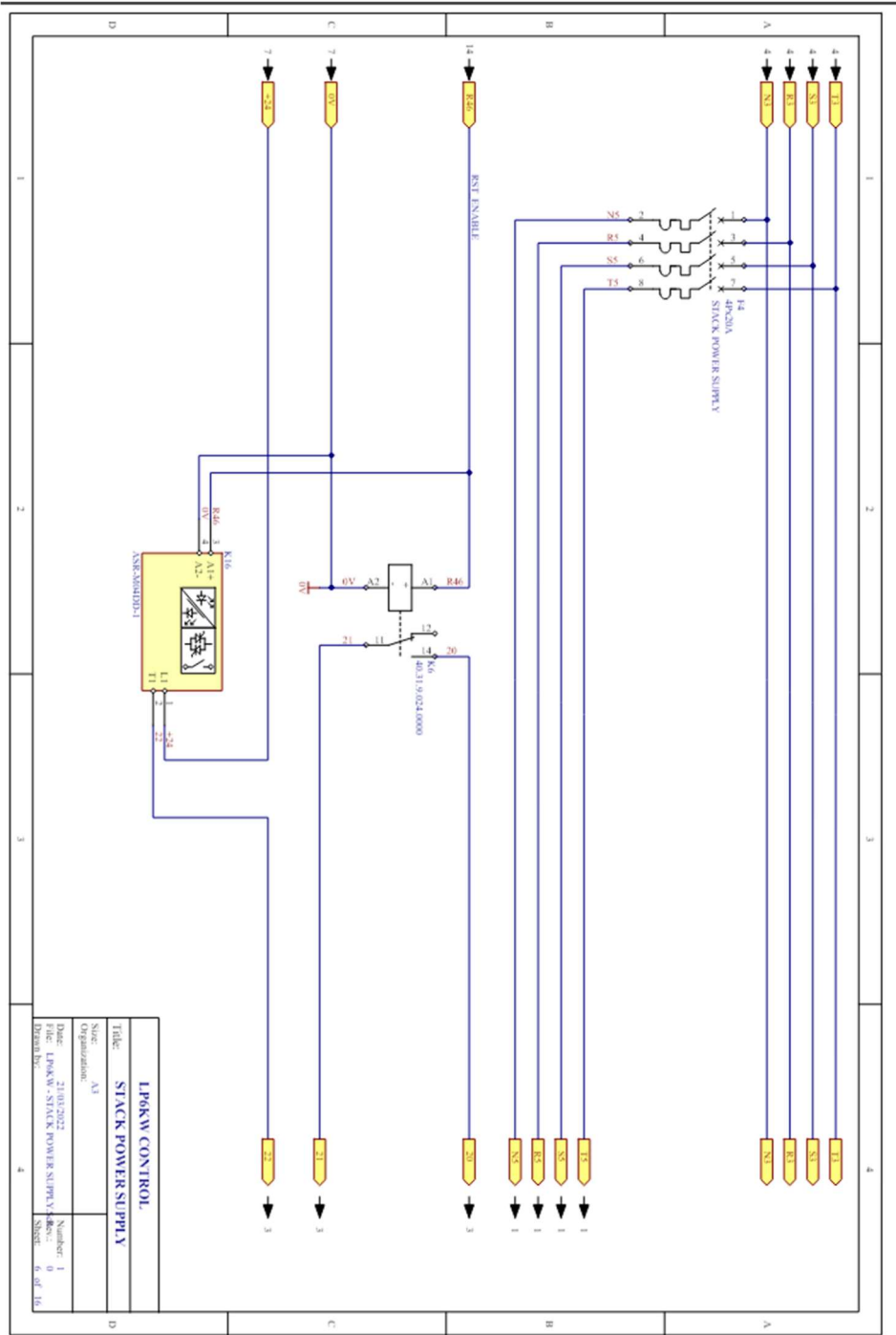


Ilustración 35: esquema eléctrico control rectificador de alimentación stack

Para el control de los equipos, se ha optado en la mayor parte de las veces por un relé de estado sólido modular modelo ASR-M04DD-1, con las siguientes características

GENERAL DATA :

Type	DC→AC	DC→AC(H)	AC→AC	DC→DC	AC→DC
Must Turn Off Voltage	MAX 1.0VDC	MAX 1.0VDC	MAX 10VAC	MAX 1.0VDC	MAX 10VAC
Input Impedance	1.5K Ω	1.5K Ω	1.5K Ω	1.5K Ω	1.5K Ω
Min Blocking Voltage	600VAC peak	1200VAC peak	600VAC peak	80VDC	80VDC
Max Off-State Leakage	LESS 5mA	LESS 5mA	LESS 5mA	LESS 1mA	LESS 1mA
Frequency Range	47~70Hz	47~70Hz	47~70Hz	47~70Hz	47~70Hz
Max Off-State dv/dt	2~4A:100V/ μ Sec 5~6A:200V/ μ Sec	500V/ μ Sec	2A, 4A:100V/ μ Sec 6A:200V/ μ Sec	200V/ μ Sec	200V/ μ Sec
Max On-State Voltage Drop	2~3A:1.5VACrms 4~6A:2.0VACrms	2.0VACrms	2A:1.5VACrms 4A, 6A:2.0VACrms	1.2Vrms	1.2Vrms
Isolate Impedance	$10^9 \Omega$	$10^9 \Omega$	$10^9 \Omega$	$10^9 \Omega$	$10^9 \Omega$
Dielectric Strength Input -Output	2500VACrms	2500VACrms	4000VACrms	2500Vrms	2500Vrms
Dielectric Strength Input, Output-Case	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Turn On Time	LESS 2mSec	LESS 2mSec	LESS 2mSec	LESS 2mSec	LESS 2mSec
Turn Off Time	LESS 1/2 AC CYCLE	LESS 1/2 AC CYCLE	LESS 1/2 AC CYCLE	LESS 1/2 CYCLE	LESS 1/2 CYCLE
Capacitance In-Out	LESS 15 pF	LESS 15 pF	LESS 15 pF	LESS 15 pF	LESS 15 pF
Max 1-Cycle Peak Surge	ASR-M02DA:30A ASR-M03DA:40A ASR-M04DA:50A ASR-M05DA:55A ASR-M06DA:60A	ASR-M02DA-H:20A ASR-M03DA-H:30A ASR-M04DA-H:40A ASR-M05DA-H:50A ASR-M06DA-H:60A	ASR-M02AA:30A ASR-M04AA:50A ASR-M06AA:60A	ASR-M02DD:3A ASR-M04DD:8.5A	ASR-M02AD:3A ASR-M04AD:8.5A

OUTLINE DIMENSIONS : mm

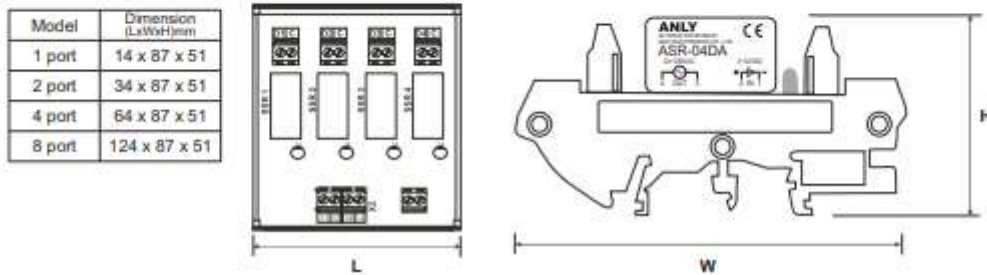


Ilustración 36: hoja de características relé de estado solido ASR-M04DD-1

3.4 OPERACIONES DE MANTENIMIENTO

A continuación se detallan algunas de las operaciones principales de mantenimiento del equipo. Estas operaciones se describen en base al electrolizador LPGREEM empleado como ejemplo, sin embargo se puede aplicar la mayoría de ellas al mantenimiento de cualquier electrolizador PEM

3.4.1 INERTIZACIÓN CON NITRÓGENO

La operación de inertizado de un equipo, es una de las operaciones más importantes a realizar en el mantenimiento de equipos electrolizadores y en equipos con hidrógeno en general. Este proceso busca reducir, o incluso eliminar, el hidrógeno contenido en el equipo para evitar el riesgo de explosión.

Si recordamos los límites de inflamabilidad presentado en el tema 1, esto son de hidrógeno en aire seco a una presión de 101.3 kPa (1,013 Bar) y a una temperatura de 298K (24,85°) son de 4.1% y 74.8%, para los límites inferior y superior respectivamente. Para el caso de la mezcla hidrógeno-oxígeno son de 4.1% y 94%. Una reducción en la presión por debajo de 101.3 kPa tiende a estrechar el rango de inflamabilidad, aumentando el límite inferior y disminuyendo el superior.

El blanketing con nitrógeno es el proceso por el que reemplazamos un gas por otro, en este caso, al aplicar nitrógeno en un depósito o tubería logramos expulsar el oxígeno. De esta forma generamos una atmósfera inerte y por tanto protegida. Los peligros que evita el nitrógeno para farmacia son la rápida oxidación, la corrosión y sobre todo el riesgo de fuego. Esto se consigue gracias a la eliminación de oxígeno el cual sin él no se podría materializar una llama e incluso la explosión.

Si un equipo contiene una tubería con hidrógeno en su interior y al acceder al mismo para una reparación, se introduce aire, se producirá con facilidad una mezcla aire/hidrógeno que puede cumplir con gran facilidad los límites de inflamabilidad. Es por ello que la solución más empleada en la industria es el inertizado mediante gas nitrógeno.

Como norma general se tendrá en cuenta los siguientes puntos:

- Tuberías abiertas con posibilidad de arrastre del hidrogeno, se realizara un una inertización mediante venteo,
- Depósitos, se realizara al menos 3 lavados, con llenado a presión de trabajo, para asegurar el total desalojo del hidrógeno contenido en la mismo.
- En tuberías de gran longitud, se realizará una medición en el punto más alejado de la entrada de nitrógeno.

En el caso que nos ocupa, nuestro electrolizador LPGREEM presenta una tubería de corto recorrido y con posibilidad de inertización mediante venteo.

Para ello, realizaremos las siguientes operaciones:

1. Comprobación del buen estado de la línea de venteo conectada al equipo.
2. Comprobación del nivel de nitrógeno en la botella o almacenamiento del mismo
3. Regulación de la presión de salida de nitrógeno a una presión de 3 Bar
4. Apertura de la válvula de alimentación de nitrógeno.
5. Barrido o blanketing durante al menos 60 segundos.
6. Cierre de la válvula de nitrógeno
7. Operación de inertización completada.

En la siguiente figura se ha indica sobre el P&I del equipo, el recorrido que realiza el nitrógeno en las tuberías de hidrogeno del equipo.

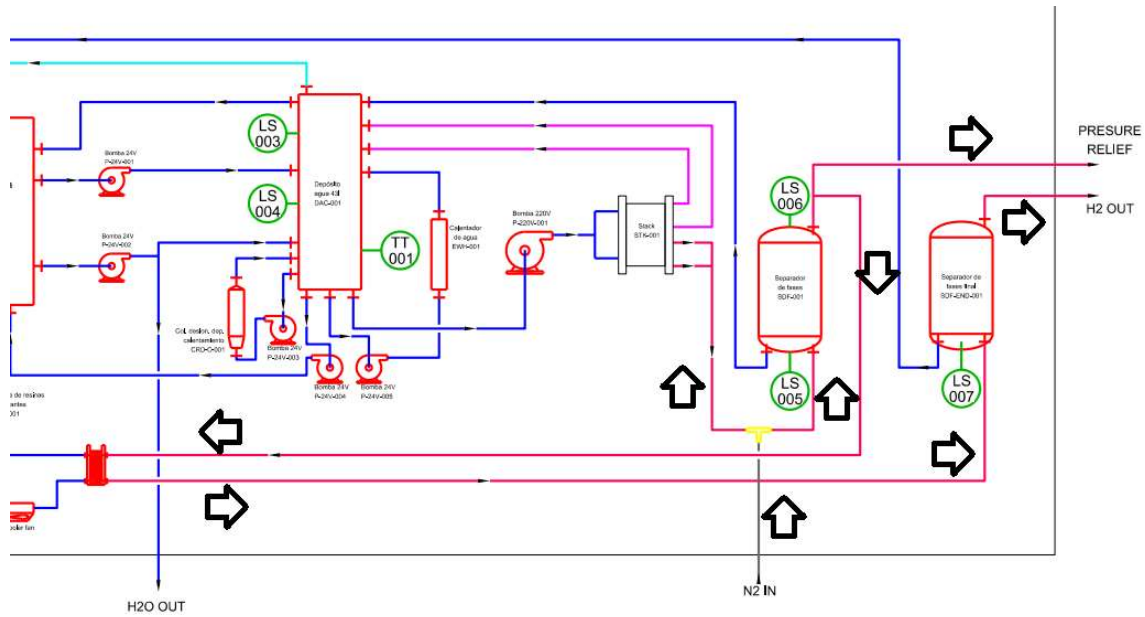


Ilustración 37: Inertización del equipo con nitrógeno

En estos equipos de pequeño tamaño, lo más habitual es disponer del gas de inertizado mediante el alquiler de una botella de nitrógeno industrial de 200 bar.



Ilustración 38: botella tipo I 200 bar

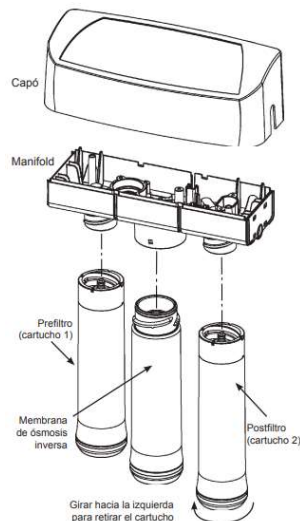
Esta botella estará siempre acompañada de un regulador de presión de salida y una válvula de corte.



Ilustración 39: regulador de presión de salida y una válvula de corte.

3.4.2 CAMBIO DE FILTROS SISTEMA DE AGUA

Como ya se ha comentado en el tema, el equipo dispone de un sistema de osmosis, el cual puede observarse a continuación.



El prefiltro y el postfiltro son cartuchos antisedimentos con carbón activo en su composición. Es necesario reemplazar estos cartuchos periódicamente. Esto protegerá la membrana de los perjuicios del cloro, permitiendo igualmente a los filtros evitar el atasco debido a los sedimentos. Puede que el caudal de agua se reduzca si los cartuchos de prefiltro y de postfiltro están saturados por los sedimentos. Cuando esto se produzca, reemplazar los cartuchos.

El cartucho de ósmosis inversa es una membrana específica enrollada estrechamente. La membrana reduce las materias disueltas y las materias orgánicas. La vida útil de la membrana de ósmosis inversa depende principalmente del pH y de la dureza del agua de la red. La vida útil del cartucho es más corta si el pH es elevado. Por ejemplo, si el agua de la red tiene un pH situado entre 6,8 y 7,7, el cartucho puede durar más de un año. Sin embargo, la vida útil del cartucho puede ser inferior a 6 meses si el pH se sitúa entre 8,5 y 10. Los pH más elevados debilitarán la membrana y pueden causar pequeñas fugas. Es necesario reemplazar la membrana de ósmosis inversa si la actividad y/o la calidad del agua producida disminuyen.

REEMPLAZO DEL CARTUCHO DE ÓSMOSIS INVERSA

Ejecutar las siguientes etapas para reemplazar los cartuchos

1. Retirar el cartucho de prefiltración (girar hacia la izquierda) del colector (manifold) para detener el caudal hacia el cartucho de ósmosis inversa.
2. Retirar el cartucho de ósmosis inversa.
3. Retirar el cartucho de postfiltración.
4. Desechar el cartucho en el lugar apropiado.
5. Instalar los nuevos cartuchos en orden inverso (postfiltro, membrana y, seguidamente, el prefiltro). Girar los cartuchos hacia la derecha para fijarlos a las cabezas de filtro. No apretar excesivamente.
6. Purgar el sistema de ósmosis inversa.

REEMPLAZO DE LOS CARTUCHOS DE PREFILTRACION Y DE POSTFILTRACIÓN

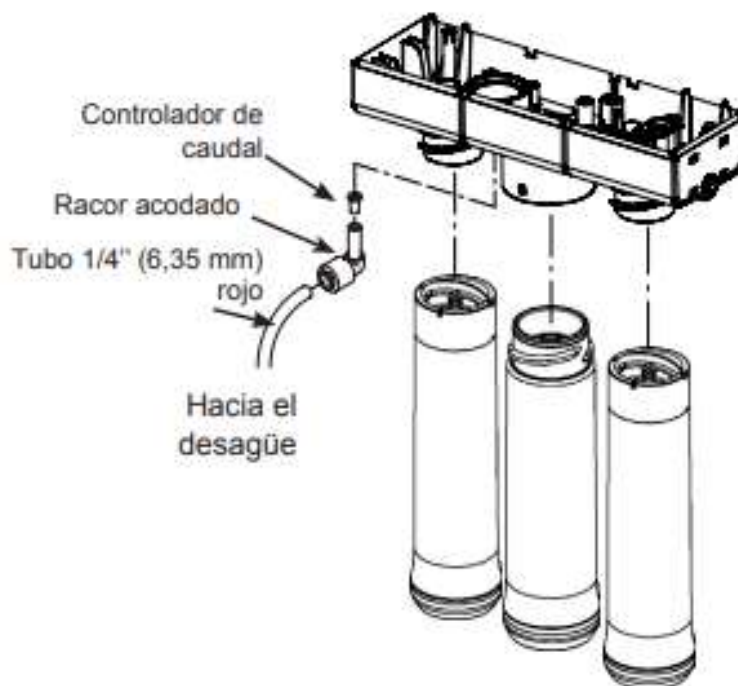
Para reemplazar los cartuchos ejecutar las siguientes etapas.

NOTA: No desmontar el colector de su soporte. Flexionar o torcer la unidad puede dañarlo.

1. Retirar el cartucho de prefiltración (girar hacia la izquierda) del colector. Seguidamente, retirar el cartucho de postfiltración.
2. Desechar los cartuchos en el lugar apropiado.
3. Instalar los nuevos cartuchos en orden inverso (postfiltro, prefiltro). Girar los cartuchos hacia la derecha para fijarlos a las cabezas de filtro. No apretar excesivamente.
4. Purgar el sistema de ósmosis inversa

CONTROLADOR DE CAUDAL

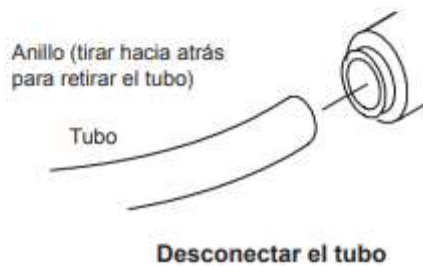
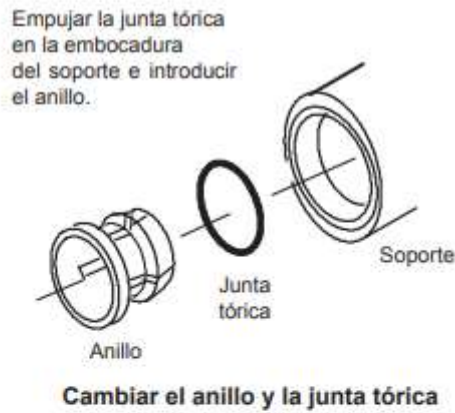
El controlador de caudal es necesario para una correcta instalación del sistema de ósmosis inversa.



El controlador de caudal situado en el interior del racor acodado de la conexión con el desagüe, que se encuentra bajo el colector, permite al agua circular correctamente hacia la membrana con el caudal necesario. Esto asegura la producción de un agua de alta calidad. Verificar cada cierto tiempo el controlador de caudal y asegurarse de que el pequeño orificio esté limpio y no obstruido.

Ensamblar y desensamblar como se indica en la figura anterior. Si el controlador de caudal permanece en el interior del colector al retirar el racor acodado, será necesario retirar el anillo y la junta tórica del orificio de evacuación, como se indica a continuación, para poder recuperarlo.

CAMBIAR EL ANILLO Y LA JUNTA TÓRICA



1. Retirar el anillo y la junta tórica del soporte con ayuda de un pequeño destornillador.
2. No raspar las paredes internas del soporte
3. Limpiar el soporte del anillo, lubricar con ayuda de una silicona a base de lubricante e introducir la junta tórica en la embocadura del soporte.
4. Introducir el anillo en el interior del soporte hasta que quede instalado firmemente en su lugar.

PURGAR EL SISTEMA

Para purgar el sistema, ejecutar las siguientes etapas:

1. Abrir el grifo de ósmosis inversa y dejar salir el agua durante 24h. El caudal de agua será un ligero chorrito en ese momento.
2. Cerrar el grifo de ósmosis inversa una vez transcurridas las 24h.
3. Una vez finalizada la purga, el sistema de ósmosis inversa está listo para ser utilizado

3.4.3 BÚSQUEDA DE FUGAS DE HIDRÓGENO

Como ya hemos visto, el hidrógeno tiene unos límites de inflamabilidad en el aire relativamente amplios. Estos límites indican la concentración de hidrógeno en el aire que puede resultar en una mezcla inflamable. Los límites de inflamabilidad del hidrógeno en el aire son los siguientes:

- Límite Inferior de Inflamabilidad (LII): Aproximadamente 4% en volumen.
- Límite Superior de Inflamabilidad (LSI): Aproximadamente 75% en volumen.

Esto significa que cualquier mezcla de hidrógeno en el aire que tenga una concentración de hidrógeno entre el 4% y el 75% puede ser inflamable si se encuentra una fuente de ignición. Por debajo del 4% y por encima del 75%, la mezcla no es inflamable bajo condiciones normales.

Por ello el equipo dispone de un sensor de hidrógeno en aire capaz de monitorizar la concentración de hidrógeno en el interior del equipo.

Existen varios tipos de sensores basados en diferentes principios de funcionamiento:

Sensores Catalíticos:

Principio de funcionamiento: Basados en la oxidación catalítica del hidrógeno en la superficie de un sensor. La reacción libera calor, que cambia la resistencia del sensor.

Ventajas: Económicos y de respuesta rápida.

Desventajas: Pueden ser afectados por la presencia de otros gases combustibles y requieren oxígeno para funcionar.

Sensores Electroquímicos:

Principio de funcionamiento: Utilizan una celda electroquímica donde el hidrógeno se oxida en el ánodo, generando una corriente eléctrica proporcional a la concentración de hidrógeno.

Ventajas: Alta selectividad y precisión.

Desventajas: Tienen una vida útil limitada y pueden ser sensibles a la temperatura y la humedad.

Sensores de Semiconductores:

Principio de funcionamiento: Basados en cambios en la conductividad eléctrica de un material semiconductor en presencia de hidrógeno.

Ventajas: Alta sensibilidad y capacidad de detectar bajas concentraciones de hidrógeno.

Desventajas: Pueden ser influenciados por otros gases y la temperatura ambiente.

Sensores Ópticos:

Principio de funcionamiento: Utilizan técnicas ópticas, como la espectroscopía de absorción o la interferometría, para detectar cambios en las propiedades ópticas causados por la presencia de hidrógeno.

Ventajas: Alta selectividad y no son afectados por interferencias electromagnéticas.

Desventajas: Generalmente más costosos y complejos de implementar..

Sensores de Fibras Ópticas:

Principio de funcionamiento: Basados en la modificación de las propiedades de transmisión de luz en una fibra óptica en presencia de hidrógeno.

Ventajas: Alta sensibilidad, inmunidad a interferencias eléctricas y pueden usarse en entornos peligrosos.

Desventajas: Pueden ser costosos y requieren de equipos adicionales para procesar las señales ópticas.

Cada tipo de sensor tiene sus propias ventajas y desventajas, por lo que la elección del sensor adecuado depende de la aplicación específica, las condiciones ambientales y los requisitos de precisión y sensibilidad.

En concreto el sensor del que dispone el equipo LPGREEN es un sensepoint xCL de HoneyWell.

Sensepoint XCL Technical Specifications

PHYSICAL PROPERTIES	
DIMENSIONS	113 x 113 x 59 mm (4.4 x 4.4 x 2.3 in)
WEIGHT	500 g (1.1 lb)
CASING MATERIAL	Polycarbonate (charcoal or white)
INGRESS PROTECTION RATING	IP65, Type 4 (in accordance with NEMA 250)
LIFETIME	10 years (excludes sensor)
AVAILABLE SENSORS	
FLAMMABLE, TOXIC GASES AND OXYGEN RANGES	<ul style="list-style-type: none"> Combustible: 0 to 100 % LEL (factory calibrated to Methane) O₂: 0 to 25% vol CO: 300 ppm (adjustable between 50 and 1000 ppm) H₂: 1000 ppm HaS Low Range: 50 ppm (adjustable between 10 and 50 ppm) HaS High Range: 100 ppm (adjustable between 50 and 200 ppm) NO_x: 20 ppm (adjustable between 5 and 50 ppm) NH₃: 200 ppm (adjustable between 50 and 200 ppm) CO₂ (ppm range): 5,000 ppm (adjustable between 1,000 and 5,000 ppm) CO₂ (% vol range): 5.0% vol (adjustable between 1.0 and 5.0% vol)
POWER SUPPLY	
NOMINAL DC INPUT VOLTAGE	24 V DC [†]
NOMINAL AC INPUT VOLTAGE	24 V AC [‡] , 50/60 Hz
MAXIMUM INRUSH CURRENT	850 mA
OUTPUT	
ANALOG OUTPUT	0 to 22 mA
DIGITAL OUTPUT	Modbus RTU
RELAY OUTPUT	2 relays rated at 24 V DC / 240 V AC, 5 A
MAXIMUM POWER CONSUMPTION	
mA VERSIONS	< 1.2 W (toxic), < 1.7 W (flammable and CO ₂)
MODBUS VERSIONS	< 0.7 W (toxic), < 1.2 W (flammable and CO ₂)
RELAY VERSIONS	Additional 0.6 W total
CONNECTION	
TYPE	Pluggable rising clamp style, 0.5 to 1.5 mm ² , 20 to 16 AWG.
USER INTERFACE	
VISUAL INDICATOR	Multi-colour LED light ring <ul style="list-style-type: none"> Green: normal[‡] Flashing red: Alarm Flashing green and yellow: Warning Flashing yellow: Fault Solid yellow: Inhibited Flashing blue: Bluetooth pairing in progress Solid blue: Bluetooth connection established
WIRELESS INTERFACE	Bluetooth 4.0 (Bluetooth Low Energy). Dedicated mobile app, enabling wireless configuration and maintenance. Connect up to 10 m away (mobile device dependent). Use a compatible smartphone or other mobile device running Android 4.3 or above.
OPERATING ENVIRONMENT	
OPERATING TEMPERATURE	-20 to 50°C (-4 to 122 °F) 0 to 30°C
STORAGE TEMPERATURE	(32 to 86 °F)
HUMIDITY	15 to 90% RH (non-condensing)
ATMOSPHERIC PRESSURE	90 to 110 kPa
APPROVALS	
ELECTRICAL SAFETY	EN/UL/IEC61010-1 CSA-C22.2 No. 61010-1-12
EMC	EN 50270
RADIO	RED, FCC
OTHER	UL2075 (CO and CH ₄), AS 1668.2

[†] mA versions: 11 to 32 VDC, Modbus versions: 9 to 32 VDC

[‡] All versions: 20 to 27 VAC

[‡] LED behavior in normal condition can be changed by the user: solid green, green confidence flash or off.

Ilustración 40: hoja de características sensor hidrógeno



Ilustración 41: sensepoint xCL de HoneyWell.

Como ya hemos explicado el equipo dispone de una pantalla de configuración de parámetros relativos a las alarmas (ver Figura 7). En ella podemos configurar el nivel al que el equipo activa la alarma y realizar una parada de emergencia.

Para convertir ppm a porcentaje, se puede utilizar la siguiente relación:

100/10.000

Esto se debe a que 1% representa 1 parte en 100, mientras que 1 ppm representa 1 parte en 1,000,000.

Por lo tanto:

$$100 \text{ ppm} = \frac{100}{10,000} = 0.01\%$$

Así que 100 ppm es igual a 0.01%, lo que es muy alejado del límite de inflamabilidad del 4%.

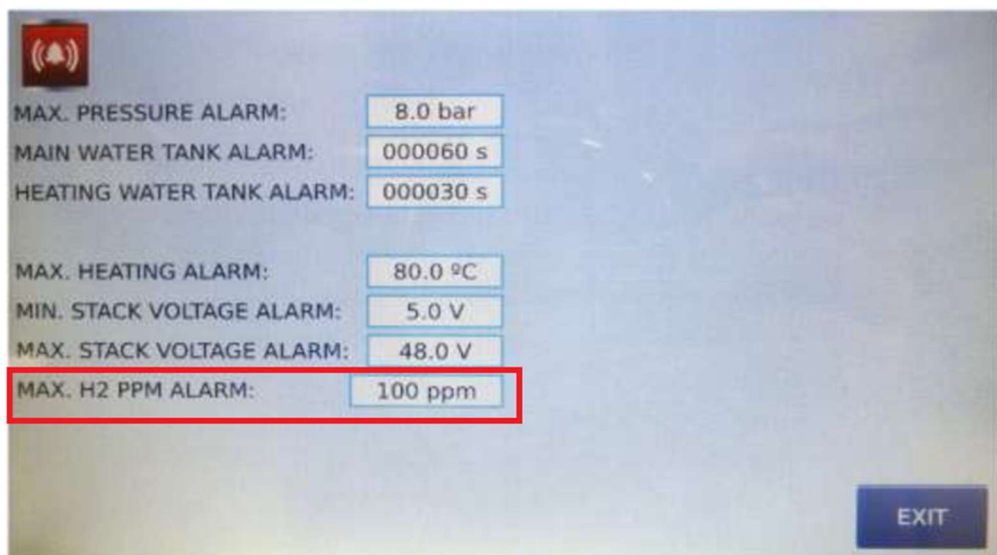


Ilustración 42: alarma niveles de H2 en el equipo

Si se alcanza el nivel de alarma, se ha producido una fuga de hidrógeno en el equipo, para su reparación deberemos de encontrar la fuga en el circuito de H₂ y proceder a su reparación.

Para ello podemos usar alguno de los siguientes métodos.

DETECTOR FUGAS PORTATIL

El detector de hidrógeno es un Instrumentos de medición para detectar fugas, por ejemplo, en tanques de hidrógeno o en tuberías. En cuanto detecte la presencia de hidrógeno, el detector indicará la intensidad de forma visual mediante un gráfico de barras tricolor. Adicionalmente el detector de hidrogeno generará una señal acústica. Puede ajustar la sensibilidad del detector de hidrógeno en 3 niveles. Esto permite limitar la búsqueda de la fuga.



Ilustración 43: detector portátil de hidrógeno

El uso de un detector portátil de fugas de hidrógeno implica una serie de pasos para asegurar una detección precisa y segura.

Lectura del Manual:

Antes de usar el detector, lee el manual del usuario para comprender su funcionamiento, las características específicas y las precauciones de seguridad.

Encendido:

Enciende el detector y espera a que realice su autoevaluación inicial. La mayoría de los detectores portátiles tienen una secuencia de inicio que verifica el funcionamiento del sensor y otros componentes.

Calibración:

Realiza una calibración si es necesario. Algunos detectores requieren una calibración periódica con una mezcla de gas de referencia para garantizar lecturas precisas.

Modo de Operación:

Selecciona el modo de operación adecuado en el dispositivo, si tiene opciones para diferentes tipos de detección o niveles de sensibilidad.

Monitoreo del Entorno:

Sostén el detector cerca del área sospechosa de la fuga. Muévelo lentamente alrededor de conexiones, válvulas, juntas y cualquier punto donde pueda haber una fuga.

Interpretación de las Lecturas:

Observa las lecturas en la pantalla del detector. Muchos detectores proporcionan una señal visual y/o audible cuando detectan hidrógeno.

Las lecturas pueden ser en ppm (partes por millón) o en porcentaje del LEL (Límite Inferior de Explosividad).

Detección de Fugas:

Si el detector indica la presencia de hidrógeno, sigue moviéndolo alrededor del área para localizar la fuente exacta de la fuga. Una vez detectado el punto de fuga procederemos a su reparación.

METODO AGUA CON JABON

Usar una solución de agua con jabón en spray es un método sencillo y efectivo para detectar fugas de hidrógeno.

Materiales Necesarios

- Botella de spray con solución de agua y jabón (una mezcla común es una parte de jabón líquido para platos y diez partes de agua)
- Equipo de protección personal (guantes y gafas de seguridad)
- Luz adecuada para observar las burbujas

Para detectar la fuga seguiremos los siguientes pasos.

Preparación de la Solución

Mezcla jabón líquido con agua en una botella de spray. Una proporción común es 1 parte de jabón por 10 partes de agua. Agita suavemente la botella para mezclar bien.

Inspección Visual

Antes de aplicar la solución, realiza una inspección visual de las conexiones, juntas, válvulas y cualquier otra área donde pueda haber una fuga.

Aplicación de la Solución

Rocía generosamente la solución de agua con jabón sobre las áreas sospechosas de tener una fuga. Asegúrate de cubrir completamente las posibles fuentes de la fuga.

Observación

Observa las áreas donde aplicaste la solución. Busca la formación de burbujas, que indican la presencia de una fuga de hidrógeno. Las burbujas se forman cuando el gas escapa y se encuentra con la solución jabonosa.

Localización de la Fuga

Si ves burbujas, identifica la fuente exacta de la fuga. Puede ser útil aplicar más solución en áreas específicas para precisar mejor la ubicación.

Acción Correctiva

Una vez localizada la fuga, procede a repararla. Esto puede implicar apretar conexiones, reemplazar juntas, o tomar otras medidas según la naturaleza del sistema y la fuga detectada.

RACORES DE COMPRESIÓN

La mayoría de las uniones en los equipos de producción de hidrógeno de pequeño tamaño, están realizadas mediante racores de compresión.

Un racor de compresión es un tipo de conexión utilizada en sistemas de tuberías y conductos para unir dos secciones de tubo o un tubo a un componente, como una válvula. Este tipo de conexión es especialmente útil porque no requiere soldadura y puede ser montada y desmontada fácilmente. A continuación, se describen sus componentes y funcionamiento:

Cuerpo del Racor:

La parte principal del racor, que aloja los demás componentes y proporciona una conexión sólida entre las tuberías.

Tuerca de Compresión:

Una tuerca que se enrosca en el cuerpo del racor. Al apretarse, presiona el anillo de compresión contra la tubería.

Anillo de Compresión (Férula):

Un anillo metálico o plástico que se deforma ligeramente al apretar la tuerca de compresión, creando un sellado hermético alrededor de la tubería.



Ilustración 44: racores de compresión

Los racores utilizados en la instalación del equipo LPGREEM son racores de la marca Swagelok. Este fabricante nos da las siguientes instrucciones para su montaje:

Paso 1: Introduzca el tubo en el racor. Asegúrese que el tubo se asienta firmemente en el fondo del cuerpo del racor y de que la tuerca está apretada a mano.

Paso 2: Haga una marca en la tuerca, en la posición de las seis en punto.

Paso 3: Mientras sujeta firmemente el cuerpo del racor, apriete la tuerca una vuelta y cuarto.

Una vez completada la instalación inicial, los técnicos deben utilizar la galga de inspección de montaje para confirmar que el racor está suficientemente apretado. Sitúe la galga de inspección frente al espacio que hay entre la tuerca y los hexágonos del cuerpo e intente introducirla suavemente. Si la galga no pasa, el racor ha sido suficientemente apretado. Si la galga entra en el espacio, se requiere un apriete adicional.

Es importante señalar que las férulas son de un solo uso, siendo recomendable su cambio cada vez que la unión es desmontada.

3.4.4 COMPROBACIÓN ESTADO STACK Y OPERACIÓN A CARGAS PARCIALES

Los stacks PEM rara vez fallan de manera catastrófica, más bien tienden a "morir" lentamente. La vida útil de los stacks generalmente se mide en términos de una degradación aceptable de la eficiencia, la cual se expresa en $\mu\text{V/h}$, aunque es poco común encontrar esta información en las hojas técnicas de los fabricantes. Por ejemplo, una degradación lineal de $1 \mu\text{V/h}$ se traduce en un consumo eléctrico adicional de aproximadamente 2 kWh/kg de H_2 producido después de 60,000 horas de operación continua.

La literatura sobre el tema indica una amplia gama ($0.4 - 15 \mu\text{V/h}$) para la tasa de degradación, que depende de numerosos factores como el delta T al que se somete el stack, el tipo de operación, la densidad de corriente, entre otros.

Una degradación lineal de $1 \mu\text{V/h}$ puede traducirse en un consumo eléctrico adicional de aproximadamente 2 kWh por kg de hidrógeno producido después de 60,000 horas de operación continua. Este incremento en el consumo de energía puede impactar significativamente los costos operativos a largo plazo.

Para prolongar la vida útil de los stacks PEM, es fundamental seguir prácticas de mantenimiento adecuadas y monitorear constantemente los parámetros operativos. Mantener las temperaturas de operación dentro de los rangos recomendados y asegurar la pureza del agua utilizada son estrategias clave para minimizar la degradación.

En el caso del electrolizador de estudio está compuesto de 20 celdas, con una superficie activa de 400 cm^2 y una potencia nominal del stack de 5 kW .

De una forma rápida, podemos hacer los siguientes cálculos., partiendo de una corriente máxima de alimentación de 120 A .

$$\text{Densidad de corriente: } 120\text{A}/400\text{cm}^2 = 0,3\text{A/ cm}^2$$

$$\text{Voltaje nominal del stack : } 5000\text{W}/120\text{A}=41,67\text{V}$$

$$\text{Voltaje de celda nominal} = 2,08\text{V}$$

Siendo estos últimos valores $2,08\text{V}$ por celda y $41,67\text{V}$ los valores de referencia a la hora de operar y monitorizar el estado del stack. En la siguiente imagen se ha señalado el parámetro V_{stack} en el sistema de control del equipo.

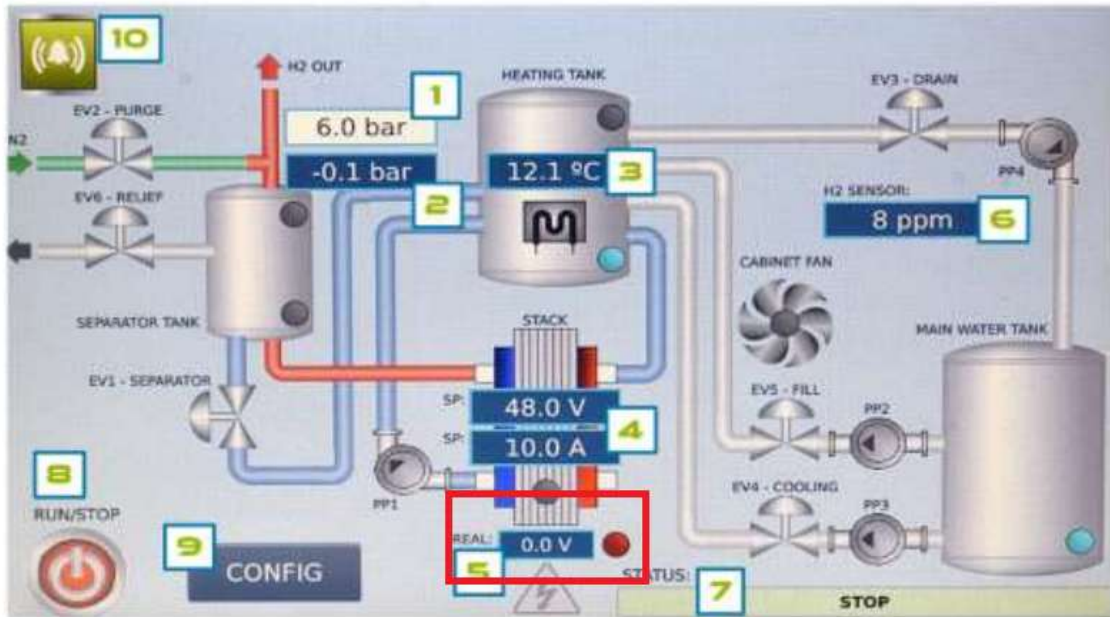


Ilustración 45: pantalla de control equipo LPGREEM 1000

Así mismo en la pestaña de configuración, podemos configurar 2 parámetros:

- Max Stack Voltaje: siendo el recomendado por el fabricante 48V el cual corresponde a una Voltaje de 2,4V por celda, donde el stack se consideraría totalmente degradado.
- SP Stack Current, que nos permite configurar la corriente de alimentación al equipo, pudiendo configurarlo en valores menores para operar el equipo a cargas parciales. No siendo recomendado por el fabricante una corriente de operación menor a 40ª lo que corresponde a un 25% de la carga nominal.

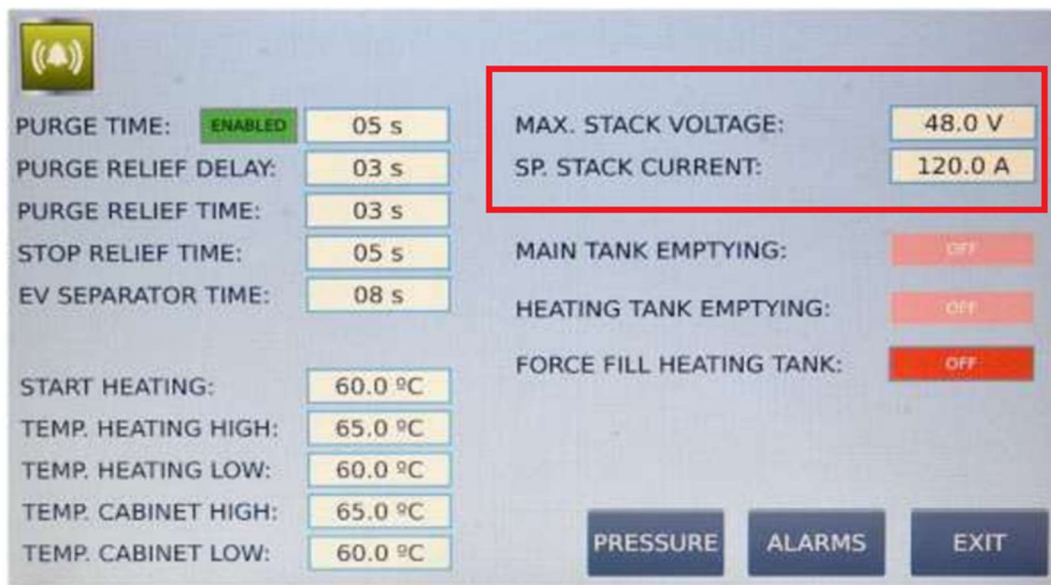


Ilustración 46: pantalla de configuración equipo LPGREEM 1000

3.4.5 MEDIDA DE LA CURVA DE POLARIZACION

Este apartado se encuentra desarrollado en el anexo caso práctico 1, tema 3, anexo. . A continuación se ofrece el marco teórico necesario.,

La curva de polarización de un stack PEM de un electrolizador es una representación gráfica que muestra la relación entre el voltaje de la celda y la densidad de corriente durante la operación del electrolizador. Esta curva es fundamental para evaluar el rendimiento del electrolizador y comprender los diferentes procesos de pérdida de energía que ocurren dentro del stack.

La curva de polarización generalmente tiene tres regiones distintivas, cada una dominada por diferentes tipos de pérdidas o sobrepotenciales:

Sobrepotencial de Activación: Esta es la región inicial de la curva, donde se observa un aumento rápido del voltaje con la densidad de corriente. Estas pérdidas están asociadas con las reacciones electroquímicas en los electrodos. Las pérdidas de activación son causadas por la energía requerida para superar las barreras cinéticas de las reacciones de descomposición del agua ($H_2O \rightarrow H_2 + O_2$).

Sobrepotencial Óhmico: En esta región intermedia, la relación entre el voltaje y la densidad de corriente es más lineal. Las pérdidas óhmicas son las más evidentes aquí. Estas pérdidas son debidas a la resistencia al flujo de iones a través de la membrana y la resistencia al flujo de corriente eléctrica a través de los componentes del stack.

Sobrepotencial de Concentración: En esta región final, el voltaje aumenta significativamente con la densidad de corriente. Este comportamiento es debido a las limitaciones en la difusión de los reactivos (agua y gases) hacia y desde los sitios activos en los electrodos. Las pérdidas de concentración ocurren cuando la velocidad de suministro de reactivos o la eliminación de productos no puede seguir el ritmo de la demanda de corriente, resultando en una disminución de la eficiencia.

Analizar la curva de polarización ayuda a identificar el punto de operación óptima del electrolizador, donde se obtiene un buen equilibrio entre eficiencia y producción de hidrógeno. Desviaciones en la forma esperada de la curva pueden indicar problemas específicos, como deterioro de la membrana, problemas en los electrodos, o dificultades en el suministro de reactivos.

▮ La curva permite evaluar la eficiencia del electrolizador bajo diferentes condiciones de operación. Ayuda en el diseño y optimización de stacks y sistemas de control para mejorar el rendimiento y la durabilidad. Facilita la comparación del rendimiento de diferentes materiales de membrana y catalizadores.

3.4.6 MEDIDA DEL RENDIMIENTO REAL

Este apartado se encuentra desarrollado en el anexo caso práctico 2, tema 3, anexo. A continuación se ofrece el marco teórico necesario.

Para que la reacción de electrólisis tenga lugar necesita de un voltaje mínimo (potencial reversible) que se puede determinar a partir de la energía eléctrica que se corresponde con la energía de Gibbs ($\Delta G = \Delta H - T\Delta S = 285,8 - 48,7 = 237,1$ kJ/mol).

$$E^0 \text{ Reversible} = \frac{-\Delta G^0}{n \times F} = \frac{-237,1}{2 \times 96485} = -1,23 \text{ V}$$

Como la electrólisis es una reacción endotérmica para poder realizarse es necesario que absorba el calor del medio. Para que la reacción tenga lugar sin absorción o emisión de calor es necesario suministrar al medio la energía de

disociación del agua ($\Delta H = 285,8 \text{ kJ/mol}$). El potencial que corresponde a estas condiciones se denomina potencial termoneutro.

$$E^0 \text{ Termoneutro} = \frac{-\Delta H^0}{n \times F} = \frac{-285,8}{2 \times 96485} = -1,48 \text{ V}$$

Por tanto, por debajo de 1,23V no tiene lugar la reacción, entre 1,23V y 1,48V hay absorción de calor del medio, a 1,48V no se produce ni absorción ni emisión de calor y por encima de 1,48V se produce emisión de calor.

Calcularemos el rendimiento del voltaje realizando el cociente entre el voltaje termoneutro y el voltaje real utilizado en cada celda.

$$\eta \text{ Voltaje} = \frac{E^0 \text{ Termoneutro}}{\text{Voltaje real}} \times 100 = \frac{1,48}{\text{Voltaje real}} \times 100$$

Si trabajamos con celdas en serie dividiremos el voltaje del stack entre el número de celdas(z):

$$\text{Voltaje real} = \text{Voltaje stack} / z$$

Rendimiento global

Calcularemos el rendimiento global de la celda mediante el producto del rendimiento Farádico por el rendimiento del voltaje que hemos calculado anteriormente.

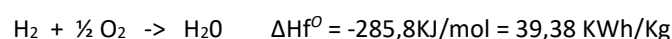
$$\eta \text{ Global} = \eta \text{ Faraday} \times \eta \text{ Voltaje} \times 100$$

Utilizar en este caso los rendimientos de Faraday y del voltaje en tanto por uno.

Eficiencia energética

La eficiencia energética de un electrolizador puede calcularse como el cociente entre la energía que es capaz de suministrar el hidrógeno generado entre la energía utilizada para producir dicho hidrógeno. Realizaremos una estimación de la eficiencia energética del electrolizador, teniendo en cuenta para el cálculo la energía eléctrica suministrada al equipo durante un determinado tiempo de operación.

Para el cálculo de la energía que es capaz de liberar el hidrógeno producido al combinarse con el oxígeno tendremos en cuenta la entalpía de formación del agua^{*(1)}.



^{*(1)} Se define **entalpía estándar de formación** o "calor estándar de formación" de un compuesto a la variación de entalpía que acompaña la formación de 1 mol de una sustancia en su estado estándar a partir de sus elementos

constituyentes en su estado estándar (la forma más estable de un elemento a 1 atmósfera de presión y una determinada temperatura, que suele ser 298 K ó 25 °C). Se denota como ΔH° .

Por tanto la energía capaz de liberar por kg de hidrógeno producido es:

$$\frac{\text{Energía capaz de liberar}}{\text{kg}} = 285,8 \frac{\text{KJ}}{\text{mol}} \times \frac{1 \text{ KWh}}{3600 \text{ KJ}} \times \frac{1 \text{ mol}}{2,016 \text{ g}} \times \frac{1000 \text{ g}}{1 \text{ Kg}} = 39,38 \frac{\text{KWh}}{\text{Kg}}$$

Para calcular cuánto nos cuesta producirlo tenemos que medir en un determinado intervalo de tiempo la energía consumida y el hidrógeno producido:

- E consumida (J) = Intensidad (A) x Voltaje (V) x tiempo (s)
- La masa de hidrógeno producida se calcula midiendo el volumen de H₂ producido en el voltámetro de Hoffman en ese tiempo, y utilizando la ley de los gases ideales (PV = nRT) para el cálculo de la masa.

A continuación podremos obtener el rendimiento energético a partir de la siguiente ecuación:

$$\text{Renergético} = \frac{\text{Energía capaz de liberar H}_2 \text{ por cada kg}}{\text{Energía consumida/masa producida}} = \frac{39,38 \text{ kWh/kg}}{\frac{(I \cdot V \cdot t)/3.600.000}{m}}$$

Donde "m" será la masa en Kg de hidrógeno producido en el tiempo "t" en segundos. El valor de 3.600.000 corresponde al cambio de unidades de J a kWh.

3.4.7 CAMBIO STACK

Un cambio de stack en un electrolizador PEM (Membrana de Electrolito Polimérico) se refiere al proceso de reemplazar el conjunto de celdas electroquímicas que constituye el corazón del electrolizador.

Este cambio es necesario cuando el stack ha alcanzado el final de su vida útil o su rendimiento ha disminuido significativamente debido a la degradación. Algunas de las principales causas que motivan su cambio son:

Degradación de Eficiencia:

Con el tiempo, el rendimiento del stack disminuye debido a la degradación de la membrana, los electrodos y otros componentes.

Mantenimiento Preventivo:

En algunos casos, se programa un cambio de stack como parte de un plan de mantenimiento preventivo para evitar fallos imprevistos y garantizar un rendimiento óptimo.

Fallas Operativas:

Problemas como fugas, cruces de gas o fallas eléctricas pueden requerir el reemplazo del stack.

El coste del stack de un electrolizador PEM puede variar significativamente dependiendo de la tecnología y el fabricante, pero generalmente constituye una parte considerable del coste total del equipo. El stack de un electrolizador PEM típicamente representa entre el 30% y el 60% del coste total del sistema.

Siendo esta la operación más costosa y compleja en el mantenimiento de un equipo electrolizador, se compone en esencia de una combinación de todas las operaciones presentadas en el documento.

1. Preparación
 - Apaga el electrolizador y desconéctalo de todas las fuentes de energía y suministros de agua y gas.
 - Despresurización del sistema e inertizado de la línea de hidrógeno.
 - Vaciado del agua del sistema.
2. Desmontaje del Stack Antiguo:
 - Desconecta todas las conexiones eléctricas e hidráulicas del stack.
 - Retira los pernos o sujetadores que mantienen el stack en su lugar.
 - Extrae cuidadosamente el stack antiguo del electrolizador.
 -
3. Inspección y Limpieza:
 - Inspeccionar las áreas de montaje y componentes circundantes para detectar cualquier signo de desgaste, corrosión o daño.
 - Limpia las superficies de montaje y componentes que puedan haber acumulado residuos.
4. Instalación del Nuevo Stack:
 - Coloca el nuevo stack en la posición correcta dentro del electrolizador.
 - Asegura el stack con los pernos o sujetadores correspondientes.
 - Reconecta todas las conexiones eléctricas e hidráulicas.
5. Verificación y Prueba:
 - Verifica que todas las conexiones estén firmes y seguras.
 - Llena el sistema con agua desionizada y purga cualquier aire atrapado en el sistema.
 - Realiza pruebas de funcionamiento para asegurar que el nuevo stack opere correctamente y no haya fugas.
6. Monitoreo Inicial:
 - Es recomendable monitorear el rendimiento del nuevo stack durante las primeras horas de operación para detectar cualquier problema potencial.