



Diseño y evaluación analítica de un reactor experimental para el estudio del agrietamiento inducido por hidrógeno en acero al carbono bajo condiciones supercríticas de H₂S

Colín Mercado, A., Palacios González, J. C., Martínez Cienfuegos, I. G. y Arganis Juárez, C. R. (2026). Diseño y evaluación analítica de un reactor experimental para el estudio del agrietamiento inducido por hidrógeno en acero al carbono bajo condiciones supercríticas de H₂S [*Postprint*]. CIENCIA *ergo-sum*, 33.

<https://doi.org/10.30878/ces.v33n0a72>

Sección: Ciencias exactas y aplicadas

Universidad Autónoma del Estado de México, México

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional.



Esta versión del artículo es una “versión final del autor” que fue aceptada por un proceso de **evaluación por pares ciegos**. Este documento diferirá en formato respecto a la “versión del editor”, la cual se someterá a un proceso de corrección de estilo y de diseño editorial. De ninguna forma se modificará el contenido. Todas las ideas que se presentan son responsabilidad del autor.

Diseño y evaluación analítica de un reactor experimental para el estudio del agrietamiento inducido por hidrógeno en acero al carbono bajo condiciones supercríticas de H₂S

Design and analytical evaluation of an experimental reactor to study hydrogen-induced cracking in carbon steel under supercritical H₂S conditions

Arturo Colín Mercado, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México, México¹

ROR: <https://ror.org/0079gpv38>

Correo electrónico: acolinm008@alumno.uaemex.mx

ORCID: 0009-0003-3600-6025

J. Cuauhtémoc Palacios González, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México, México

ROR: <https://ror.org/0079gpv38>

Correo electrónico: jcpalaciosg@uaemex.mx

ORCID: 0000-0003-1876-6226

I. Galileo Martínez Cienfuegos, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México, México

ROR: <https://ror.org/0079gpv38>

Correo electrónico: igmartinezc@uaemex.mx

ORCID: 0000-0001-5417-0548

Carlos Rosendo Arganis Juárez, Departamento de Sistemas Nucleares, Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, México

ROR: <https://ror.org/00k7h5c65>

Correo electrónico: carlos.arganis@inin.gob.mx

ORCID: 0000-0002-3846-7648

Recepción: 3 de julio de 2025

Aprobación: 27 de mayo de 2026

RESUMEN

El agrietamiento inducido por hidrógeno (AIH) es un mecanismo de falla crítico en aceros expuestos a H₂S. El objetivo de este trabajo fue diseñar y validar un reactor experimental para evaluar la susceptibilidad al AIH en acero SA-106 bajo condiciones supercríticas (CS) de H₂S ($T_c > 100.25^\circ\text{C}$, $P_c > 8.96 \text{ MPa}$), no contempladas en pruebas estandarizadas, mediante la adquisición de señales electroquímicas. La metodología incluyó el diseño mecánico según ASME Sección VIII e ISO 15156, selección de materiales (SA-312 TP316L), cálculo de espesores y configuración de boquillas para instrumentación. Los resultados indican que el reactor opera hasta 18.50 MPa y 300°C, y las pruebas preoperacionales confirman su funcionalidad y estabilidad en la adquisición de señales electroquímicas.

PALABRAS CLAVE: agrietamiento, hidrógeno, supercrítico, H₂S, reactor.

¹ Autor para correspondencia.

ABSTRACT

Hydrogen-induced cracking (HIC) is a critical failure mechanism in steels exposed to H₂S. This work aimed to design and validate an experimental reactor to evaluate HIC susceptibility in SA-106 carbon steel under supercritical H₂S conditions (SC) ($T_c > 100.25^\circ\text{C}$, $P_c > 8.96\text{ MPa}$), not covered by standardized tests, through the acquisition of electrochemical signals. The methodology included mechanical design according to ASME Section VIII and ISO 15156, material selection (SA-312 TP316L), thickness calculation, and nozzle configuration for instrumentation. The results indicate that the reactor operates up to 18.50 MPa and 300°C, and pre-operational tests confirm its functionality and stability in acquiring electrochemical signals.

KEYWORDS: HIC, hydrogen, supercritical, H₂S, reactor.

INTRODUCCIÓN

La integridad de componentes de acero al carbono en la industria energética y petroquímica es constantemente amenazada por el fenómeno de AIH (Mohtadi-Bonab & Ghesmati-Kucheki, 2019). Dicho mecanismo degradante es catalizado por la presencia de sulfuro de hidrógeno (H₂S) y puede conducir a fallas estructurales. El AIH ocurre cuando los átomos de hidrógeno se difunden en el metal recombinándose en discontinuidades microscópicas alcanzando presiones internas que superan la resistencia mecánica del material (González-Velázquez et al., 2022).

Si bien los métodos estandarizados de prueba como la norma NACE TM-0284 (NACE International, 2016) proporcionan un marco de evaluación de la susceptibilidad al AIH, poseen una limitación significativa ya que para estos estándares las pruebas se realizan típicamente a condiciones de presión y temperatura ambiente. Esto se traduce en una brecha crítica, ya que, en los escenarios operativos reales, los materiales pueden estar expuestos a H₂S en CS ($T_c > 100.25^\circ\text{C}$, $P_c > 8.96\text{ MPa}$) (Akinfiyev et al., 2016; National Institute of Standards and Technology, 2023).

En el estado supercrítico, el H₂S experimenta cambios drásticos en sus propiedades fisicoquímicas, lo que altera fundamentalmente su interacción con las superficies metálicas y puede acelerar los mecanismos de absorción y difusión de hidrógeno (Wei et al., 2015).

En el contexto mexicano, la problemática se intensifica debido a las condiciones operativas

específicas de yacimientos como los de la Cuenca de Burgos y las diversas Regiones Marinas, caracterizadas por altas concentraciones de H_2S y CO_2 . Al momento de la redacción de este documento, no se ha identificado en la literatura pública nacional una plataforma integral de pruebas para AIH en condiciones reales de servicio; la mayoría de los trabajos corresponden a estudios académicos de laboratorio o modelado del fenómeno, lo que limita el desarrollo de metodologías de caracterización y selección de materiales, es por ello que la infraestructura energética nacional enfrenta desafíos técnicos significativos relacionados con la susceptibilidad al AIH ya que las fallas por este mecanismo pueden causar afectaciones ambientales y poner en riesgo comunidades enteras.

Por lo tanto, el objetivo principal de este trabajo es diseñar, analizar y validar la integridad mecánica de un reactor experimental para la evaluación de la susceptibilidad al AIH del acero al carbono SA-106, bajo CS de H_2S . El diseño presentado se fundamenta en los criterios del ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Sección VIII, División 1, y en la selección de materiales compatible con la norma ISO 15156 para servicios con H_2S . El reactor se ha diseñado en una configuración cilíndrica horizontal, y opera en un régimen superior al punto crítico del H_2S .

La organización del presente manuscrito sigue un orden preestablecido, primero se describen las CS del H_2S y su relevancia para el AIH. Luego se presenta el diseño del reactor, explicando la selección de materiales, la geometría y la instrumentación que permiten operar de forma segura en este régimen. Posteriormente, se detalla la metodología de cálculo utilizada para validar la integridad mecánica del equipo conforme a estándares internacionales y finalmente, se expone el procedimiento experimental para la preparación de especímenes y la operación del sistema a presión y temperatura por arriba de las CS, demostrando que es posible aplicar técnicas electroquímicas en esas condiciones.

1. CARACTERIZACIÓN DE CS Y PARÁMETROS DE DISEÑO

1.1 Propiedades críticas del H_2S y comportamiento supercrítico

El diseño del reactor implica considerar las condiciones que superen el punto crítico del H_2S para alcanzar el estado supercrítico. Según los datos del National Institute of Standards and Technology (NIST), las propiedades críticas del H_2S se presentan en el Cuadro 1.

Cuadro 1
Temperatura y presión críticas del H₂S

Temperatura crítica, T_c [°C]	100.25
Presión crítica, P_c [MPa]	8.96

Fuente: NIST, 2023.

Por encima de estos valores (100.25°C y 8.96 MPa), el H₂S adquiere propiedades únicas del estado supercrítico, incluyendo una densidad similar a la de los líquidos, una viscosidad comparable a la de los gases y una difusividad intermedia entre líquidos y gases. Estas propiedades alteran significativamente su comportamiento como medio corrosivo, afectando la cinética de las reacciones de corrosión y los mecanismos de absorción de hidrógeno en el acero (Akinfiev et al., 2016).

1.2 Modelo de solubilidad H₂S-H₂O-NaCl en CS

Para caracterizar el comportamiento del sistema corrosivo, se empleó el modelo termodinámico desarrollado por Akinfiev et al. (2016), que proporciona una descripción consistente de las propiedades de la fase líquida en el sistema ternario H₂S-H₂O-NaCl. Este modelo permite calcular el volumen molar y densidad del líquido, la concentración de H₂S en solución NaCl y la solubilidad en condiciones de saturación de halita.

El modelo, disponible como software de distribución gratuita, se aplicó para calcular la solubilidad molal del H₂S en solución 1 m de NaCl_(ac) en un rango de temperaturas de 50-300°C y presiones de 5-20 MPa, en el Cuadro 2 se observa que la solubilidad del H₂S líquido disminuye con la temperatura a presión constante, mientras que muestra un incremento máximo para un fluido supercrítico, también se muestra que, a altas temperaturas, la presión aumenta abruptamente para disolver la misma cantidad de H₂S en una solución de NaCl_(ac).

1.3 Determinación de parámetros de presión y temperatura de diseño

Considerando los parámetros críticos del H₂S y los resultados del modelo de solubilidad, en el Cuadro 3

Cuadro 3 se muestran los límites inferiores y superiores de diseño.

La selección de 300°C como temperatura máxima de diseño se basa en el comportamiento

del esfuerzo permisible del material SA-106 Gr. B, motivo del estudio (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), que mantiene valores más o menos constantes en el rango de 50°C hasta 300°C y 119 MPa, mientras que a temperaturas superiores se observa una disminución significativa en la resistencia mecánica de dicho material.

Cuadro 2

Valores de solubilidad molal [$m: \text{mol kg}^{-1}$] de H_2S en 1 m $\text{NaCl}_{(ac)}$ a temperaturas máximas de 300°C y presión de 20MPa

$P[\text{MPa}]/T[^\circ\text{C}]$	50.00	100.00	150.00	200.00	250.00	300.00
5.0	1.752	1.437	1.110	0.831	0.260	
10	1.814	2.301	2.311	2.177	1.689	0.433
20	1.930	2.596	3.639	4.441	4.490	3.521

Fuente: Akinfiev et al., 2016: P. 6.

Cuadro 3

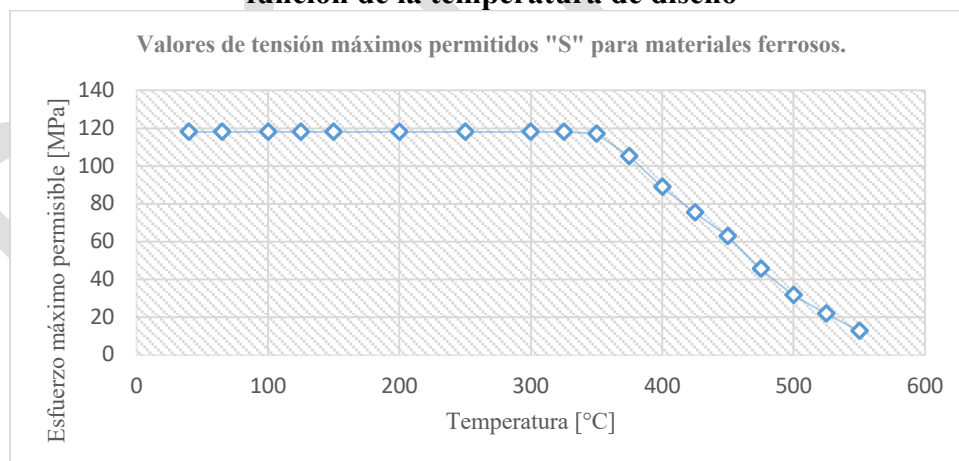
Temperatura y presión límite inferior y superior

Límite inferior >	100.25°C	8.96MPa
Límite superior <	300°C	40MPa

Fuente: elaboración propia.

Gráfica 1

Esfuerzos máximos permisibles de diseño para acero denominación SA-106 Gr. B en función de la temperatura de diseño



Fuente: ASME BPVC Sección II. Parte D, 2019: P. 78.

1.4 Cálculo de fracciones molares y concentraciones de H_2S

A partir de los valores de solubilidad obtenidos con el modelo de Akinfiev et al. (2016) en el Cuadro 2, se calcularon las fracciones molares de H_2S en solución 1 m de NaCl a sus valores

de presión y temperatura correspondientes. Los resultados en el Cuadro 4 muestran un incremento sostenido de la fracción molar de H_2S conforme aumentan la temperatura y la presión del sistema, alcanzando valores de hasta 8.07% mol a 250°C y 20 MPa.

Cuadro 4
Fracción mol [%] de H_2S en 1 m $NaCl_{(ac)}$ a temperaturas máximas de 300°C y presión de 20MPa

$P[MPa]/T[°C]$	50.00	100.00	150.00	200.00	250.00	300.00
5.0	3.1511	2.5845	1.9964	1.4946	0.4676	
10	3.2626	4.1385	4.1565	3.9155	3.0378	0.7788
20	3.4712	4.6691	6.5450	7.9874	8.0755	6.3327

Fuente: elaboración propia.

Esta tendencia indica una mayor disponibilidad de H_2S bajo CS, lo que intensifica su actividad corrosiva. Al combinar estas fracciones molares con las presiones de operación, es posible determinar presiones parciales significativamente superiores a las evaluadas en condiciones estándar, fundamentales para estudiar la susceptibilidad al AIH.

Estos valores de fracción molar, combinados con las presiones de operación, permiten calcular las presiones parciales efectivas de H_2S utilizando la ecuación:

$$p_{H_2S} = p_B \frac{x_{H_2S}}{100} \quad (1)$$

Donde:

p_B ; es la presión de punto de burbuja del sistema, es decir, la presión a la cual la mezcla fluida que contiene H_2S comienza a liberar su fase gaseosa, expresada en MPa.

x_{H_2S} ; es la fracción molar de H_2S en el gas, expresada como un porcentaje.

Para sistemas líquidos sin gas se calcula la presión parcial efectiva (p_{H_2S}), es decir para sistemas líquidos la actividad efectiva termodinámica de H_2S se define mediante una presión parcial virtual de H_2S que se determina mediante el procedimiento descrito en NACE TM-0284. El resultado puede ser utilizado como la presión parcial de H_2S para el sistema líquido.

Finalmente, con la ayuda del Cuadro 5 se puede determinar la duración de la prueba dependiendo de la presión parcial de H_2S y su fracción molar en la solución de prueba (NACE

International, 2016). Los cálculos demuestran que el reactor puede alcanzar presiones parciales de H_2S significativamente superiores a las evaluadas en condiciones estándar, lo que permitirá estudiar el fenómeno de AIH en condiciones que simulan de manera más realista los entornos operativos de la industria energética.

Cuadro 5
Duración de la prueba AIH estándar dependiendo de la presión parcial de H_2S y su fracción molar porcentual en la solución de prueba de acuerdo con TM-0284

p_{H_2S} [kPa]	x_{H_2S} [%mol]	Duración [h]
$0.10 \leq p_{H_2S} \leq 0.30$	$0.1 \leq x_{H_2S} \leq 0.3$	2160
$0.30 < p_{H_2S} \leq 1.00$	$0.3 < x_{H_2S} \leq 1.0$	720
$1.00 < p_{H_2S} \leq 10.00$	$1.0 < x_{H_2S} \leq 10$	336
$10.00 < p_{H_2S}$	$10 < x_{H_2S}$	96

Fuente: NACE International, 2016: P. 14.

2. DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DEL REACTOR EXPERIMENTAL

2.1 Especificaciones generales y configuración geométrica

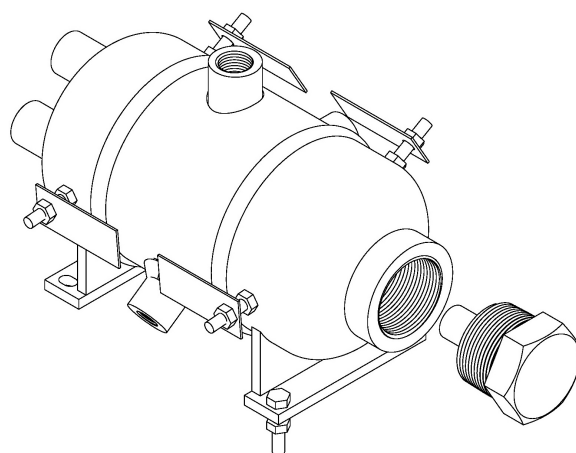
Con la caracterización integral del comportamiento supercrítico del H_2S y la determinación de los parámetros operativos, se desarrolló la etapa de diseño detallado, garantizando que la geometría, los materiales seleccionados y los sistemas de instrumentación soporten adecuadamente estas condiciones para lograr la obtención de datos confiables del AIH. La siguiente sección presenta el diseño integral del equipo desarrollado bajo estas especificaciones.

En la **Figura 1** se presenta el reactor experimental diseñado, consistente en un recipiente a presión de configuración cilíndrica horizontal. Sus especificaciones geométricas principales incluyen un diámetro interior de 96 mm, una longitud entre tangentes de 160 mm y un volumen de trabajo mínimo de 420 cm³. La configuración estructural comprende un cuerpo cilíndrico con tapas semielípticas 2:1, diseñado específicamente para alojar tres probetas de acero SA-106 Grado B durante los ensayos de corrosión de susceptibilidad al AIH.

El diseño geométrico garantiza el cumplimiento de la relación área y volumen mínima de 3cm³cm⁻², especificada en la norma NACE TM0284-2016 para pruebas de AIH. La configuración permite el acomodo de los especímenes manteniendo la separación adecuada

entre ellos y las paredes del reactor mediante un dispositivo de sujeción especializado.

Figura 1
Geometría del reactor de prueba para obtención de datos de susceptibilidad al AIH de fluidos amargos en CS de tubería SA-106 Grado B



Fuente: elaboración propia.

2.2 Selección de materiales de construcción (SA-312 TP316L y SA-403 WP316L)

La selección del material para el reactor se basó en el cumplimiento de la norma ISO 15156-3:2020 para servicios en ambientes con H_2S . Los aceros inoxidable austeníticos SA-312 TP316L y SA-403 WP316L cumplen y exceden los requisitos químicos mínimos de la norma (Cuadro 6), siendo una alternativa económica frente a aleaciones base níquel (Pujar et al., 2007).

Cuadro 6
Requerimientos químicos de tubería sin costura y fundición SA-312 TP316 y SA-403 WP316 [UNS31600], respectivamente de acuerdo con la Sección II

	Composición [%]		
	ASME BPVC	ISO 15156-3	
Carbono, máx.	0.08	0.08 máx.	✓
Manganeso	2.00	2.00 máx.	✓
Fósforo, máx.	0.045	0.045 máx.	✓
Azufre, máx.	0.030	0.040 máx.	✓

Fuente: ASME BPVC, 2019: P. 461-688.

De acuerdo con ASME BPVC Sección II (2019), estos materiales mantienen un esfuerzo

permisible de 119 MPa a 300°C, proporcionando un margen de seguridad adecuado bajo CS manteniendo integridad estructural en el rango operativo de 300°C y 18.50 MPa, por lo tanto, la configuración final seleccionada es: para envoltorio y componentes principales, SA-312 TP316L; tapas y componentes fundidos, SA-403 WP316L; y boquillas y accesorios SA-182 F316L.

2.3 Configuración de boquillas para instrumentación y control

El reactor incorpora un sistema integral de ocho boquillas distribuidas para garantizar su operación segura y la adquisición confiable de datos, según se detalla en el Cuadro 7.

Cuadro 7
Cuadro de boquillas para recipiente de pruebas

Ítem	Cantidad	DN	Tipo	Servicio
N1	1	40	NPT	Acceso
N2	1	8	NPT	Salida de señales
N3	1	15	NPT	Válvula de seguridad
N4	1	8	NPT	Reserva
N5	1	8	NPT	Control de temperatura
N6	1	8	NPT	Entrada de señales
N7	1	8	NPT	Manómetro
N8	1	8	NPT	Drenaje

Fuente: elaboración propia.

La instrumentación y el control de procesos se gestionan mediante boquillas independientes. Por ejemplo, la boquilla N5 (DN8) está destinada al control de temperatura, permitiendo la instalación de termopares y la boquilla N4 (DN8) se designa como reserva, proporcionando flexibilidad operativa para futuras modificaciones. Todas las boquillas utilizan conexiones NPT Clase 6000 y están fabricadas en SA-182 F316L para garantizar compatibilidad química y mecánica con el cuerpo del reactor.

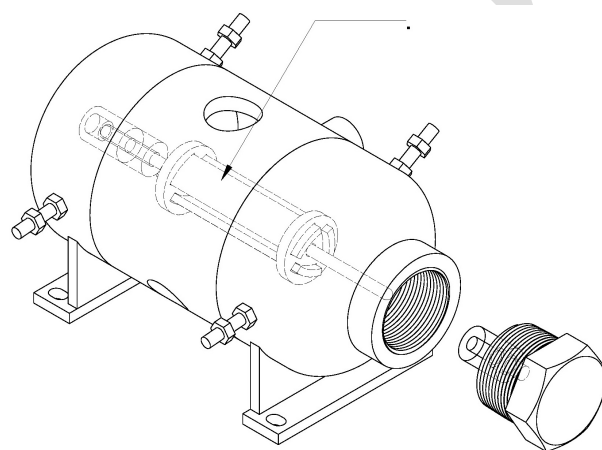
2.4 Diseño del sistema de sujeción de especímenes

En la **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra el sistema de sujeción interno que fue diseñado para maximizar el área de contacto de los especímenes con el fluido

corrosivo, evitando al mismo tiempo cualquier interacción galvánica con las paredes del reactor.

Los cupones de prueba pueden colocarse en orientación vertical, según el tipo de ensayo, y el dispositivo tiene capacidad para alojar hasta tres especímenes de 100×20 mm obtenidos a espesor completo de tubería. Esta configuración garantiza que todas las caras de los cupones de prueba estén expuestas de manera uniforme al fluido de trabajo, cumpliendo con los criterios establecidos en la metodología de prueba estándar.

Figura 2
Instalación de sistema de sujeción de probetas para prueba de susceptibilidad al AIH dentro del reactor de prueba para obtención de datos



Fuente: elaboración propia.

3. METODOLOGÍA DE CÁLCULO DE INTEGRIDAD MECÁNICA

Con la caracterización termodinámica de las CS del H_2S completa, una vez definidos los límites de presión (8.96-40 MPa) y temperatura (100.25-300 °C) de operación, el material de construcción seleccionado conforme a ISO 15156-3, y la geometría y sistemas del reactor totalmente especificados, se procedió a la etapa fundamental de validación mecánica. Los cálculos de integridad estructural se realizaron de acuerdo a la metodología de ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Sección VIII, División 1.

3.1 Cálculo de espesor mínimo en la envoltante por presión interna

La Sección VIII del Código ASME de Calderas y Recipientes a Presión se basa en principios

de resistencia de materiales y utiliza conceptos como el espesor de la pared, los factores de seguridad y ecuaciones que relacionan el esfuerzo permisible para calcular la resistencia a la presión. A tensión circunferencial, se aplica la Ecuación (2) por el Apéndice 1-1 subsección (a) (1) cuando se conoce la presión de diseño, el diámetro exterior del recipiente y se desea conocer el espesor mínimo t .

$$t = \frac{PR_0}{SE+0.4P} \quad (2)$$

En la Ecuación (2), "S", denota el valor del esfuerzo máximo permisible a la temperatura de diseño correspondiente y E se refiere a la eficiencia de la junta, dependiendo del proceso, el valor usado normalmente es 1.0, de acuerdo con ASME BPVC, Sección VIII, UG-27.

Dado que no se espera corrosión en el recipiente, la Ecuación (2) indica el espesor mínimo requerido para satisfacer el criterio de integridad mecánica por esfuerzo interno.

En la En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se muestran diferentes espesores de pared en función del esfuerzo máximo permisible a su temperatura correspondiente para las tapas del reactor de prueba tipo semielípticas, de la misma manera que la envolvente, estas se ven afectadas por las consideraciones de diseño que se toman en cuenta para su fabricación repercutiendo en los costos de las mismas.

Gráfica 2

Espesor calculado para la pared de la envolvente del recipiente de prueba a diferentes presiones y temperaturas de diseño

se muestran diferentes espesores de pared en función del esfuerzo máximo permisible a su temperatura correspondiente, aunque la diferencia en espesores no es significativa; un incremento o reducción en el mismo se verá reflejado directamente en el costo del material para fabricación.

3.2 Cálculo de espesor mínimo en las tapas semielípticas por presión interna

Tomando en cuenta los principios de diseño de la Sección VIII del Código ASME de Calderas y Recipientes a Presión se resuelven las ecuaciones resultantes en las tapas laterales con la finalidad de calcular la resistencia a la presión interna.

La Ecuación (3) indicada por al Apéndice 1-4, subsección (c), debe usarse cuando la relación

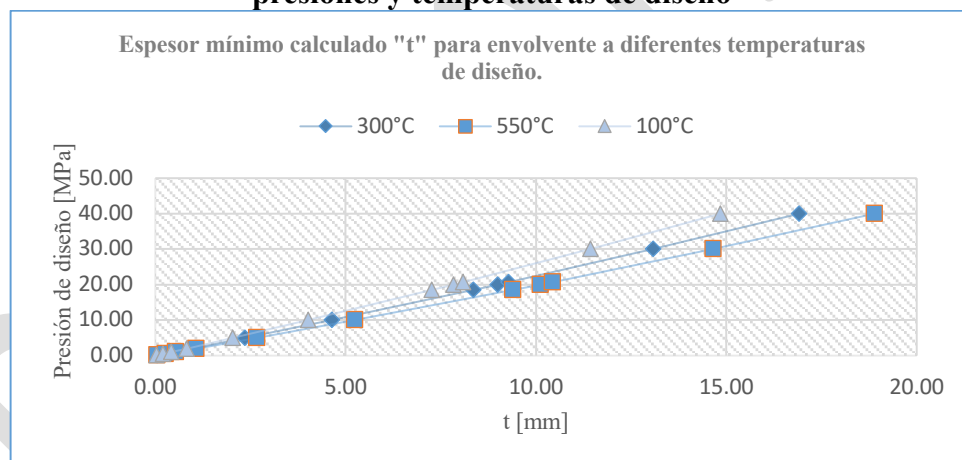
entre el espesor mínimo y el radio de corona de la tapa semielíptica cumpla con el criterio $t / L \geq 0.002$. Conocida la presión de diseño, el diámetro exterior de la tapa semielíptica y el factor K^2 se determina el espesor mínimo t .

$$t = \frac{PD_0K}{2SE+2P(K-0.1)} \quad (3)$$

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se muestran diferentes espesores de pared en función del esfuerzo máximo permisible a su temperatura correspondiente para las tapas del reactor de prueba tipo semielípticas, de la misma manera que la envolvente, estas se ven afectadas por las consideraciones de diseño que se toman en cuenta para su fabricación repercutiendo en los costos de las mismas.

Gráfica 2

Espesor calculado para la pared de la envolvente del recipiente de prueba a diferentes presiones y temperaturas de diseño

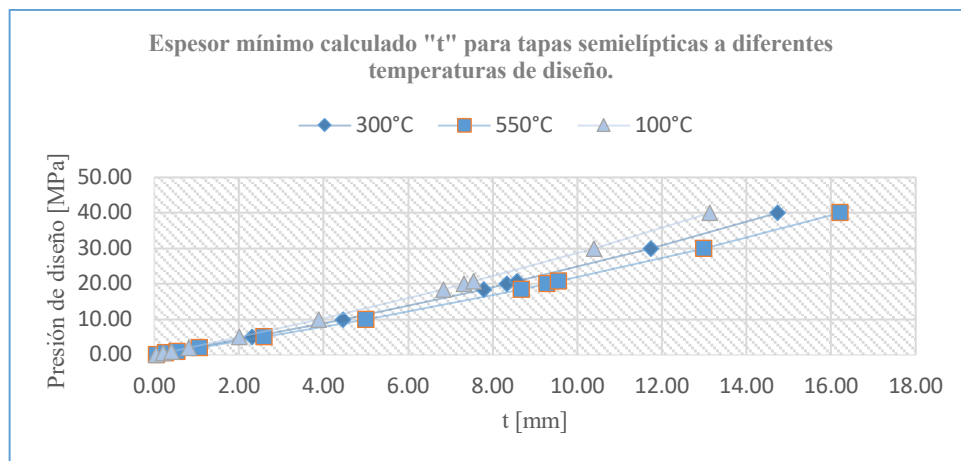


Fuente: elaboración propia.

Gráfica 3

Espesor calculado para las tapas semielípticas del recipiente de prueba a diferentes presiones y temperaturas de diseño

² Factor de proporción para tapas elipsoidales que depende de la relación entre el eje mayor y eje menor de las mismas, (ASME BPVC, Sección VIII, Apéndice 1-4, 2019).



Fuente: elaboración propia.

Con base en los cálculos de integridad mecánica realizados, se seleccionó tubería de pared completa sin costura de 4 pulgadas nominal (DN100), cédula 80S (8.56 mm), como solución óptima para el cuerpo y tapas laterales del reactor. Como muestran la En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se muestran diferentes espesores de pared en función del esfuerzo máximo permisible a su temperatura correspondiente para las tapas del reactor de prueba tipo semielípticas, de la misma manera que la envolvente, estas se ven afectadas por las consideraciones de diseño que se toman en cuenta para su fabricación repercutiendo en los costos de las mismas.

Gráfica 2

Espesor calculado para la pared de la envolvente del recipiente de prueba a diferentes presiones y temperaturas de diseño

y la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, el espesor comercial de este producto satisface con margen adecuado los requerimientos de diseño a las condiciones máximas de operación (18.50 MPa @ 300°C), eliminando la necesidad de fabricación especializada.

3.3 Cálculo de boquillas para proceso en el reactor de prueba de corrosión

La Sección VIII del Código ASME en sus párrafos UG-36 a UG-45 establece la metodología para validar la integridad mecánica de boquillas. El párrafo UG-45 establece la manera en que el espesor mínimo de los cuellos de boquillas debe ser calculado, la Ecuación (4) indica que el espesor mínimo del cuello es igual al espesor mínimo necesario por presión interna y externa más corrosión y tolerancia por roscado de acuerdo con los párrafos UG-27 y UG-28 cuando los accesos son únicamente usados para inspección dentro del recipiente (ASME

BPVC, 2019).

$$t_{UG-45} = t_a \quad (4)$$

Donde:

t_a ; espesor mínimo del cuello requerido por presión interior y exterior usando UG-27 y UG-28 (más tolerancia por corrosión y roscado), cuando aplique.

Mientras que si no es el caso (es decir las boquillas son elementos de proceso que conectan entrada, salida, válvulas de seguridad, etcétera) se debe determinar el espesor t_b para posteriormente calcular t_{UG-45} mediante el cumplimiento de la condición mostrada en las Ecuaciones (5) y (6).

$$t_b = \min [t|b3, \max (t_{b1}, t_{b2})] \quad (5)$$

$$t_{UG-45} = \max(t_a, t|b) \quad (6)$$

Donde:

t_{b1} ; para recipientes sometidos a presión interna, el espesor (más la tolerancia a la corrosión) necesario para la presión (suponiendo $E = 1.0$) para la envolvente o tapa en el lugar donde el cuello de la boquilla u otra conexión se une al recipiente, pero en ningún caso debe ser menor que el espesor mínimo especificado para el material en UG-16(b).

t_{b2} ; para recipientes sometidos a presión externa, el espesor (más la tolerancia a la corrosión) obtenido al utilizar la presión de diseño externa como una presión de diseño interna equivalente (suponiendo $E = 1.0$) en la fórmula para la envolvente o tapa en el lugar donde el cuello de la boquilla u otra conexión se une al recipiente, pero en ningún caso menos que el espesor mínimo especificado para el material en UG-16(b).

t_{b3} ; el espesor indicado en la Tabla UG-45, (ver Cuadro 8) más un sobre-espesor igual a la tolerancia a la corrosión.

t_{UG-45} ; espesor mínimo de pared en cuellos de boquillas.

Cuadro 8

Valores de espesores mínimos requeridos para cuellos de boquilla de acuerdo con su

diámetro nominal, Tabla UG-45 de la Sección VIII de ASME BPVC

Diámetro Nominal	Espesor mínimo de cuello de boquilla [Ver UG-16(d)] mm
DN8	1.96
DN15	2.42
DN40	3.22

Fuente: ASME BPVC, 2019: P. 56.

Conocidas las consideraciones de diseño de las boquillas de entrada y salida, así como los accesos al recipiente mostrados en el Cuadro 7, se resuelven numéricamente las ecuaciones e iteraciones esto da como resultado la validación de la presión máxima permisible de trabajo, la validación o cumplimiento con los requisitos de UG-45, el cálculo del espesor mínimo y la aprobación del área disponible de refuerzo de la boquilla debido a la abertura (discontinuidad) en la envolvente o tapa del recipiente a presión, ver Cuadro 9.

Finalmente, en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra un diagrama esquemático del recipiente a presión para obtención de parámetros de susceptibilidad al AIH en materiales sometidos a CS en fluidos saturados con H_2S , se consideran las boquillas de alimentación, de salida, de carga de especímenes, así como las requeridas para la entrada y salida de señales, además de boquillas para el monitoreo y control de las variables de proceso.

Cuadro 9
Resumen de espesores en boquillas calculadas por UG-45

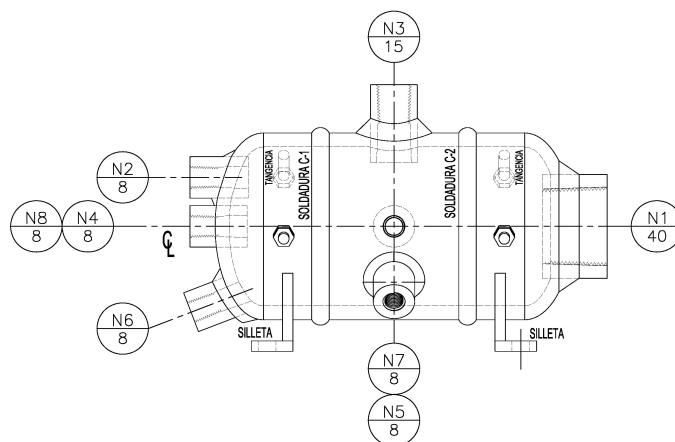
Ítem	Material	Tipo	Clase	Servicio	UG-45	t_{UG-45}	Área de refuerzo	MAWP [MPa]
N1	SA-182 F316	COPL NPT	6000	Acceso	OK	5.48	OK	18.98
N2	SA-182 F316	COPL NPT	6000	Salida de señales	OK	2.51	OK	18.98
N3	SA-182 F316	COPL NPT	6000	Válvula de seguridad	OK	3.12	OK	18.98
N4	SA-182 F316	COPL NPT	6000	Reserva	OK	2.51	OK	18.98
N5	SA-182 F316	COPL NPT	6000	Control de temperatura	OK	2.51	OK	18.98
N6	SA-182 F316	COPL NPT	6000	Entrada de señales	OK	2.51	OK	18.98
N7	SA-182	COPL	6000	Manómetro	OK	2.51	OK	18.98

	F316	NPT						
N8	SA-182 F316	COPE NPT	6000	Drenaje	OK	2.51	OK	18.98

Fuente: elaboración propia.

Figura 3

Diagrama esquemático de boquillas en el reactor de pruebas de susceptibilidad al AIH vista en elevación



Fuente: elaboración propia.

4. PREPARACIÓN DE ESPECÍMENES Y METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

4.1 Caracterización del material de prueba (SA-106 Grado B)

El material seleccionado para evaluación fue el acero al carbono SA-106 Grado B, debido a que se utiliza ampliamente en la fabricación de tuberías y conductos que transportan fluidos a altas temperaturas y presiones, cabe destacar que el acero SA-106 se fabrica en grados A, B y C y que la elección del grado específico depende de las condiciones de operación y los requisitos de diseño. Por ejemplo, las propiedades mecánicas a temperatura ambiente del grado B, incluyen una resistencia a la tracción mínima de 415 MPa y un límite elástico mínimo de 240 MPa (ver Cuadro 10).

Cuadro 10

Propiedades mecánicas del acero SA-106 a temperatura ambiente de acuerdo con la

Sección II de ASME BPVC

	Grado A	Grado B	Grado C
Resistencia a la tracción, min., (MPa)	330	415	485
Límite elástico, min., (MPa)	205	240	275

Fuente: ASME BPVC 2019: P. 185.

Químicamente, contiene un máximo de 0.30% de carbono, 0.29-1.06% de manganeso, y límites controlados de fósforo y azufre (0.035% máximo cada uno), tal como se especifica en el Cuadro 11. Esta composición y propiedades, así como su amplio uso en la industria, lo convierten en un material representativo para estudiar la susceptibilidad al AIH en condiciones similares a las de servicio real.

Cuadro 11
Requerimientos químicos del acero SA-106 de acuerdo con la Sección II de ASME BPVC

	Composición [% masa]		
	Grado A	Grado B	Grado C
Carbono, máx.	0.25	0.30	0.35
Manganeso	0.27-0.93	0.29-1.06	0.29-1.06
Fósforo, máx.	0.035	0.035	0.035
Azufre, máx.	0.035	0.035	0.035
Silicio, mín.	0.10	0.10	0.10

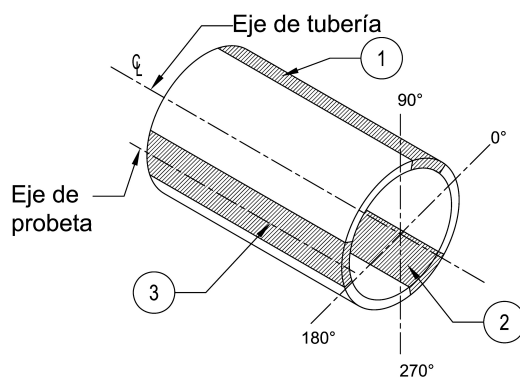
Fuente: ASME BPVC, 2019: P. 184.

4.2 Preparación y dimensionamiento de especímenes

Los especímenes de prueba se obtuvieron de tubería sin costura SA-106 Grado B, DN50 cédula 40, con un espesor de pared máximo de 3.91 mm de acuerdo con ASME B36.10M-2018. La geometría de cada espécimen fue de 100 ± 1 mm de longitud por 20 ± 1 mm de ancho. Para tuberías sin costura, tres especímenes se extrajeron a 120° de separación alrededor de la circunferencia, con su eje longitudinal paralelo al eje de la tubería (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), cumpliendo con lo establecido en la norma NACE TM0284 (NACE International, 2016). Esta configuración asegura la representatividad de las muestras al cubrir diferentes orientaciones del material base.

Figura 4

Diagrama esquemático de ubicación de especímenes de prueba en la tubería para ser analizados



Fuente: elaboración propia.

4.3 Procedimiento de saturación con H_2S en CS

El protocolo de saturación inicia con la colocación de los especímenes en el reactor mediante el dispositivo de sujeción que maximiza el área de contacto con el fluido y evita el contacto con las paredes del reactor. La solución de prueba, compuesta por agua destilada ASTM D1193 Tipo IV, NaCl y CH_3COOH , se introduce en el reactor. Posteriormente, se realiza un purgado con argón (Ar) de alta pureza (99.998%) durante una hora a través de la boquilla N4 para eliminar oxígeno residual. Una vez sellado el reactor, se introduce H_2S de grado CP (99.5% de pureza) mediante burbujeo controlado a través de la misma boquilla, manteniendo una velocidad constante durante una hora hasta alcanzar la presión de saturación deseada. La concentración de H_2S en solución se verifica mediante titulación yodométrica a través de la válvula auxiliar en la boquilla N7, tanto al inicio como al final de la prueba.

4.4 Protocolo de medición y control de variables

Durante la exposición, se mantienen constantes la presión y temperatura mediante sistemas de control automático asociados a las boquillas N5 (control de temperatura) y N7 (manómetro). El pH se mide inmediatamente después de la saturación y al finalizar la prueba, utilizando muestras obtenidas a través de la boquilla N7 para asegurar el mantenimiento del intervalo preestablecido. La duración de la prueba se determina según la presión parcial efectiva de H_2S y su fracción molar, siguiendo los criterios del Cuadro 5. Por ejemplo, para presiones parciales superiores a 10 kPa y fracciones molares mayores al 10%, la duración

estándar es de 96 horas. Variables como presión, temperatura y pH se registran continuamente, mientras que la concentración de H_2S se valúa al inicio y final de la prueba para garantizar condiciones de saturación estables durante todo el experimento.

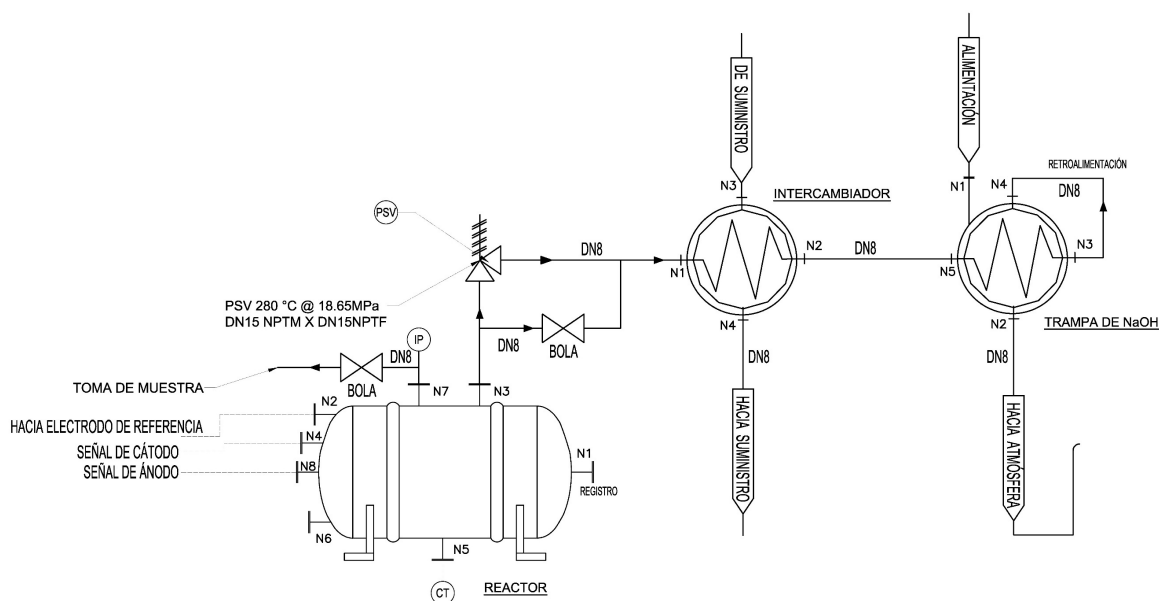
5. RESULTADOS: VALIDACIÓN EXPERIMENTAL PRELIMINAR Y DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA INTEGRADO

Como etapa preliminar de validación del diseño, se implementó el sistema experimental completo, realizando pruebas de funcionalidad y seguridad sin la introducción de H_2S debido a protocolos de seguridad institucional. Esta validación preoperacional permitió verificar la integridad operativa de todos los componentes y subsistemas bajo condiciones controladas de presión y temperatura.

5.1 Descripción del sistema experimental integral para evaluación de AIH bajo CS

En la **Figura 5** se muestra el diagrama de tuberías e instrumentación (DTI) del sistema integral para evaluación de AIH bajo condiciones controladas supercríticas, dicho sistema está compuesto por un reactor primario, tren de enfriamiento en serie, línea de muestreo especializada, trampa química de neutralización y conexiones instrumentadas para adquisición de señales electroquímicas. Se realizaron pruebas operacionales para verificar la estabilidad del sistema, cuyos resultados incluyen datos crudos de ruido electroquímico presentados más adelante, confirmando la funcionalidad del montaje y la confiabilidad en la adquisición de señales.

Figura 5
Diagrama de tubería e instrumentación del sistema experimental para evaluación de la susceptibilidad al AIH bajo CS



Fuente: elaboración propia.

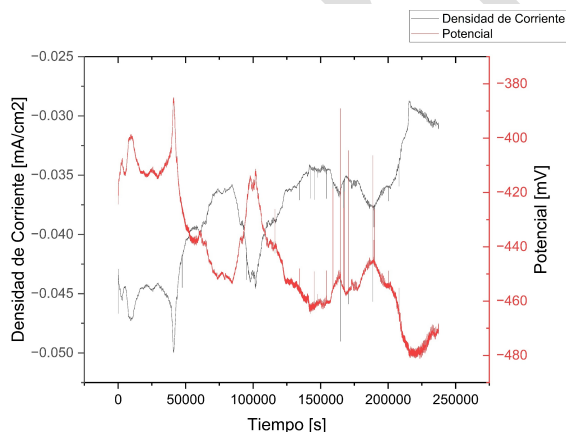
El sistema opera en configuración batch e incluye un intercambiador de calor para una reducción térmica gradual y una trampa de NaOH para neutralización de H_2S residual. El equipo incorpora ocho boquillas (N1-N8) para instrumentación, muestreo, conexión de electrodos y sistemas de seguridad. La protección contra sobrepresión incluye una válvula de seguridad (PSV) calibrada a 280°C y 18.65 MPa, y líneas de muestreo con válvulas de cierre rápido o venteo controlado para manejo de fluidos amargos.

El reactor se usó en conjunto con un dispositivo diseñado por el Instituto de Investigaciones Nucleares de la República Checa que permite el incremento en hasta 6 señales adicionales por boquilla con el fin de poder realizar pruebas electroquímicas, como: Resistencia a la Polarización, de la cual se obtiene la velocidad de corrosión uniforme en mm/año de la muestra; Curvas de Polarización, en donde se obtiene también la velocidad de corrosión uniforme en mm/año y las pendientes de Tafel que es una medida de los electrones intercambiados en las reacciones; Ruido Electroquímico (RE) en corriente y voltaje, para identificar si los procesos son de corrosión uniforme o localizada, por medio de un tratamiento estadístico del índice de Localización (IL) (Cottis & Turgoose, 1999; Pujar et al., 2007); pruebas de corrosión de pérdida de peso; y de la evaluación de la susceptibilidad al AIH de la normativa NACE TM0284.

Estas técnicas fueron utilizadas durante las pruebas preoperacionales del sistema confirmando la funcionalidad del montaje y la confiabilidad de los datos obtenidos, por ejemplo, en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se reportan los datos obtenidos durante las pruebas preoperacionales de RE, los cuales una vez analizado el IL tras la remoción de tendencia, indican corrosión localizada bajo las condiciones ensayadas.

Además, fue posible la utilización de un electrodo de referencia Ag/AgCl de la marca CORTEST, enfriado con agua, para realizar las pruebas a temperaturas mayores que las de su punto de ebullición.

Gráfica 4
Series de tiempo en densidad de corriente y potencial de 66 horas a 180°C y 15 kg/cm², datos obtenidos durante las pruebas preoperacionales del sistema integral de evaluación de AIH.



Fuente: elaboración propia.

5.2 Análisis comparativo con sistemas comerciales para CS de H₂S

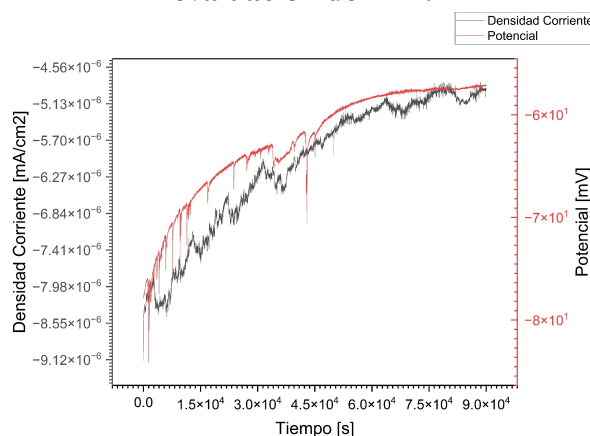
El análisis comparativo con sistemas comerciales del Cuadro 12 demuestra que el reactor propuesto presenta una solución especializada y económicamente competitiva para estudios de AIH en CS, con capacidades operativas de 18.50 MPa @ 300°C y un volumen de 420 cm³ que cumple específicamente con los requerimientos normativos.

La selección de acero inoxidable SA-312 TP316L/SA-403 WP316L reduce costos de manera significativa respecto a aleaciones base níquel, como Hastelloy C-276, mientras que su configuración con ocho boquillas especializadas ofrece ventajas técnicas para aplicación de

técnicas electroquímicas.

Gráfica 5

Series de tiempo en densidad de corriente y potencial de 25 horas a 50°C y 110 kg/cm², datos obtenidos durante las pruebas preoperacionales del sistema integral de evaluación de AIH.



Fuente: elaboración propia.

Sin embargo, esta selección de materiales conlleva limitaciones técnicas inherentes: el acero 316 presenta susceptibilidad al agrietamiento por corrosión bajo tensión (SCC) en ambientes con cloruros y H₂S (Pujar et al., 2007), así como una pérdida progresiva de resistencia mecánica por encima de 300°C que restringe el intervalo operativo máximo.

De cualquier manera, estas consideraciones justifican la selección del 316L para el intervalo operativo específico del reactor ($\leq 300^{\circ}\text{C}$, ≤ 18.50 MPa), pero excluyen su aplicación en condiciones más severas donde serían imprescindibles aleaciones de níquel como Hastelloy C-276 o Inconel 625.

Como parte del control de calidad del reactor, se realizaron ensayos no destructivos en el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ) conforme a los requisitos de las normativas ASME Sección V y ASME Sección VIII (ASME BPVC, 2019), que incluyeron inspección visual interna y externa de soldaduras, pruebas de líquidos penetrantes en uniones críticas y radiografía digital para evaluación volumétrica, confirmándose que el reactor se encuentra libre de defectos relevantes como grietas, porosidad o inclusiones no permisibles, validando la confiabilidad estructural del equipo previo a las pruebas preoperacionales.

Cuadro 12

Análisis comparativo de especificaciones técnicas, reactor propuesto vs comerciales

Parámetro	Reactor Propuesto	Autoclaves Comerciales Típicas	Ventaja del Diseño Propuesto
Presión máxima de operación	18.50 MPa @ 300°C	20–25 MPa @ 300°C	Optimizado para CS específicas de H ₂ S
Material de construcción	SA-312 TP316 / SA-403 WP316	Aleaciones base níquel (Hastelloy, Inconel)	Costo significativamente menor manteniendo compatibilidad con H ₂ S
Volumen de trabajo	420 cm ³	500–1000 cm ³	Volumen optimizado para la relación área-volumen de 3 cm ³ /cm ² conforme a NACE TM0284
Configuración de boquillas	8 boquillas especializadas (N1–N8)	3–5 boquillas estándar	Mayor flexibilidad para instrumentación y control de procesos
Temperatura máxima	300°C	350–500°C	Diseñado específicamente para el rango supercrítico del H ₂ S (100–300°C)
Costo estimado	Bajo (USD 20 000)	Alto (USD 50 000–150 000)	Solución económicamente viable para laboratorios de investigación

Fuente: elaboración propia.

PROSPECTIVA

Los mecanismos de degradación por H₂S representan un desafío crítico en diversas industrias debido a su capacidad para comprometer la integridad de equipos. En particular, bajo condiciones de alta presión y temperatura, el H₂S puede acelerar los mecanismos de absorción y difusión de hidrógeno en los aceros, favoreciendo el AIH y otros modos de falla asociados. Comprender este comportamiento es indispensable para evaluar materiales sometidos a ambientes severos.

En este contexto, el diseño, construcción e instrumentación de un reactor que permita simular, con cierto grado de precisión, las presiones, temperaturas y concentraciones de H₂S características del estado supercrítico constituye una herramienta estratégica para anticipar y mitigar fallas, así como para generar criterios robustos de selección de materiales en aplicaciones donde se requiere resistencia a ambientes extremos.

La obtención de datos experimentales de la susceptibilidad al AIH proporcionará una

comprensión profunda del desempeño de diversos materiales (no solo aceros al carbono) bajo condiciones operativas reales. Estos resultados contribuirán a optimizar estrategias de mejora de materiales para la industria petrolera, gasífera y de sistemas energéticos en lo general.

CONCLUSIONES

Al diseñar y evaluar de manera preoperacional el reactor experimental para estudios de AIH bajo CS de H_2S se han logrado establecer las siguientes conclusiones:

El reactor cumple integralmente con los criterios de la ASME Sección VIII División 1 para recipientes a presión y con los requisitos de la norma ISO 15156-3:2020 para materiales en servicio con H_2S , garantizando la integridad estructural en el rango completo de operación por lo que se valida su diseño bajo estándares internacionales.

El equipo puede operar de manera segura y confiable a condiciones de hasta 18.50 MPa @ 300°C, superando significativamente el punto crítico del H_2S (100.25°C, 8.96 MPa) y permitiendo la simulación de sistemas que operen a dichas presiones y temperaturas.

La selección de acero inoxidable SA-312 TP316/SA-403 WP316 representa una solución que reduce costos de manera importante comparado con aleaciones base níquel, manteniendo compatibilidad química y resistencia mecánica adecuadas para el rango operativo específico, sin embargo, el rango operativo máximo del sistema se ve afectado, independientemente de ello, la metodología de diseño del reactor es válida con el uso de materiales como Hastelloy C-276 o Inconel 625.

El diseño incorpora boquillas que permiten la integración de técnicas electroquímicas (EIS, LPR, ruido electroquímico, Tafel) y cumplen con los requisitos de relación área-volumen ($3\text{cm}^3\text{cm}^{-2}$) establecidos en la normatividad estandarizada.

Las pruebas preoperacionales confirmaron la funcionalidad del sistema demostrando estabilidad en la adquisición de señales electroquímicas.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos el invaluable apoyo recibido de la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMex), la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación

(SECIHTI), así como al personal técnico del Grupo de Tecnología de Materiales del Departamento de Sistemas Nucleares del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ), en especial al Ing. Julio César Zenteno Suárez por su asistencia técnica y colaboración en la realización de este trabajo, agradecemos también a los árbitros que aportaron una mejora a la estructura del artículo.

REFERENCIAS

Akinfiev, N. N., Majer, V., & Shvarov, Y. V. (2016). Thermodynamic description of H₂S–H₂O–NaCl solutions at temperatures to 573 K and pressures to 40 MPa. *Chemical Geology*, 424, 1–11.

American Society of Mechanical Engineers. (2019a). ASME Boiler and Pressure Vessel Code (BPVC), Section II: Materials, Part D – Properties. ASME International.

American Society of Mechanical Engineers. (2019b). ASME Boiler and Pressure Vessel Code (BPVC), Section VIII: Rules for Construction of Pressure Vessels. ASME International.

Cottis, R., & Turgoose, S. (1999). *Corrosion Testing Made Easy: Electrochemical Impedance and Noise*. NACE.

González-Velázquez, J. L., Entezari, E., López, D. R., Zúñiga, M. A. B., & Szpunar, J. A. (2022). Review of current developments on high strength pipeline steels for HIC inducing service. *Frattura ed Integrità Strutturale*, 16(61), 20–45.

International Organization for Standardization. (2020). ISO 15156-3:2020 Petroleum, petrochemical and natural gas industries — Materials for use in H₂S-containing environments in oil and gas production — Part 3: Cracking-resistant CRAs (corrosion-resistant alloys) and other alloys. ISO.

Mohtadi-Bonab, M. A., & Ghesmati-Kucheki, H. (2019). Important factors on the failure of pipeline steels with focus on hydrogen induced cracks and improvement of their resistance. *Metals and Materials International*, 25, 1109–1134.

NACE International. (2016). NACE TM-0284: Evaluation of Pipeline and Pressure Vessel

Steels for Resistance to Hydrogen-Induced Cracking (HIC) and Stepwise Cracking (SWC). NACE.

National Institute of Standards and Technology. (2023). Isochoric properties for hydrogen sulfide. <https://webbook.nist.gov/>

Pujar, M., Anita, T., Shaikh, H., Dayal, R., & Khatak, H. (2007). Analysis of electrochemical noise (EN) data using MEM for pitting corrosion of 316 SS in chloride solution. *International Journal of Electrochemical Science*, 2(4), 301–310.

Wei, L., Zhang, Y., Pang, X., & Gao, K. (2015). Corrosion behaviors of steels under supercritical CO₂ conditions. *Corrosion Reviews*, 33, 151–174.

CC BY-NC-ND