

Evaluación de las tecnologías Espejo Enfriado y Óxido de Aluminio para la medición de humedad y punto de rocío de vapor de agua en gas natural.

Magda Alexandra Castilla Tarazona

Trabajo de grado para optar por el Título de Ingeniera Química

Modalidad de práctica empresarial

Directora

Yuly Fernanda López Contreras

Ingeniera Química, Ph. D.

Tutora

Diana Marcela Castillo Blanco

Ingeniera Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2023

Dedicatoria

A mi madre Yaneth Tarazona, por empezar sus días a las 4 am, por ser mi voz de aliento en cada momento difícil, por comprender mi proceso apoyándome en cada decisión y por su lucha incansable contra todo obstáculo, incluso el cáncer de mama, para que este sueño fuese una realidad, no tengo cómo agradecerle por tanto madre.

A mi padre Manuel Castilla, por su perseverancia y dedicación, que me enseñaron lecciones valiosas que trascienden el ámbito académico y que han forjado mi persona. Sus consejos siempre han sido certeros, y sus palabras de aliento me han impulsado a superar obstáculos y a continuar persiguiendo mis metas.

A mi abuela Aura Trigos, por cuidarme desde siempre cuando mamita trabajaba dándome el amor más puro, incondicional y sincero, por cada oración que ha hecho todos los días por mi bienestar y por cada billete que puso en mi mano antes de salir del pueblo.

A mi tío Ramón Castilla (QEPD), con quién siempre soñé compartir la alegría de este logro y quién hasta en sus últimos días alentó mi camino, se alegró por mis triunfos y confió en mis capacidades, no lo olvido tío.

A mi yo de hace 5 años, quiero agradecerle por tomar la decisión más importante de mi vida, que ha traído consigo la mayor satisfacción tanto personal como profesional. Gracias por nunca rendirte y por superar exitosamente cada dificultad en el camino.

Agradecimientos

Quiero expresar mi gratitud a Dios, quien ha sido mi fuente constante de fortaleza, inspiración y dirección durante esta travesía académica.

A mis padres, por ser los promotores de este logro que no habría sido posible sin su apoyo. Su sacrificio y esfuerzo han allanado el camino para que yo pueda perseguir mis sueños.

A mi hermano Manuel F. Castilla, a quién admiro profundamente y para quién espero ser ejemplo. Gracias por comprender y caminar conmigo este duro proceso que vivimos juntos, estaré con vos hasta que sea yo la que esté en tus agradecimientos.

A mis abuelos, por sus oraciones en cada momento importante, por sus consejos y experiencias compartidas que han sido un tesoro invaluable en mi desarrollo personal y académico.

A mi hermana Karen Angarita que, con su presencia ha sido un recordatorio constante de la importancia de tener a alguien en quien confiar. Sus palabras de ánimo en los momentos de duda y sus celebraciones genuinas en cada logro han sido muy importantes para estar donde estoy hoy.

A Juan Felipe, por acompañarme en mis momentos de frustración y de satisfacción, por su apoyo incondicional hasta la culminación de este sueño que compartimos, su presencia hizo que este proceso fuese más ameno y llevadero.

A mis familiares y amigos, por su amor y respaldo, por entender mis momentos de ausencia y por brindarme sus consejos. En especial, agradezco a mi tía Leidy y mi gran amiga Yenny Ostos.

A la Corporación CDT de Gas, por acogerme brindándome todas las herramientas y conocimiento para culminar esta etapa, en especial a Diana, por su acompañamiento constante.

A mi directora Yuly, por su retroalimentación y paciencia a lo largo de todo el proceso.

A mi querida alma máter, la Universidad Industrial de Santander, por brindarme valiosos espacios de enriquecimiento personal y profesional.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción.....	11
1. Objetivos.....	13
1.1. Objetivo general.....	13
1.2. Objetivos específicos.....	13
2. Marco conceptual.....	13
2.1. Metrología.....	13
2.2. Mensurando.....	14
2.3. Incertidumbre de medida.....	14
2.3.1. Estimación de incertidumbre estándar.....	16
2.3.2. Incertidumbre expandida.....	17
2.4. Principio de medición de las tecnologías disponibles en el CDT de Gas para medición de contenido de vapor de agua.....	18
2.4.1. Principio de medición del equipo disponible de la tecnología de espejo enfriado.....	18
2.4.2. Principio de medición del equipo disponible de la tecnología de óxido de aluminio.....	20
3. Metodología.....	23
3.2. Descripción de cada una de las etapas llevadas a cabo durante el desarrollo del proyecto.....	23
3.2.1. Identificar la normatividad y lineamientos aplicables a cada tecnología.....	23
3.2.2. Analizar las mediciones de humedad y punto de rocío.....	24
3.2.3. Establecer las implicaciones metodológicas y prácticas.....	24
4. Resultados.....	25

EVALUACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS DE ESPEJO ENFRIADO Y ÓXIDO DE ALUMINIO	5
4.1. Normatividad y lineamientos aplicables a cada tecnología	25
4.1.1. Revisión bibliográfica de las tecnologías óxido de aluminio y espejo enfriado incluyendo normatividad y estándares internacionales	25
4.1.2. Ventajas y desventajas de cada una de las tecnologías teniendo en cuenta los equipos disponibles	27
4.1.3. Procedimientos técnicos de medición de los analizadores PANAMETRICS PM880 y el HYGROVISION-BL.....	30
4.2. Análisis de las mediciones de humedad y punto de rocío realizadas con los equipos disponibles	31
4.2.1. Cálculo del resultado de medición	31
4.2.2. Estimación de la incertidumbre de medición	38
4.3. Implicaciones metodológicas y prácticas de la implementación de los equipos disponibles para cada tecnología	40
5. Conclusiones	41
Referencias bibliográficas	43
Apéndices	46

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1 Métodos y características metrológicas humedad y punto de rocío	26
Tabla 2 Especificaciones teórico-prácticas de cada tecnología teniendo en cuenta los equipos disponibles	28
Tabla 3 Características y condiciones de operación del Panametrics PM880 AC	29
Tabla 4 Características, especificaciones y condiciones de operación del Hygrovision-BL	30
Tabla 5 Descripción de las fuentes de variabilidad	33

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1 Microscopio acoplado para visualización de condensados del analizador Hygrovision BL.....	19
Figura 2 Refracción total en el espejo sin condensado del analizador Hygrovision BL.....	20
Figura 3 Dispersión de los rayos de luz por condensado en el analizador Hygrovision BL.....	20
Figura 4 Higrómetro PM880 AC y su conexión de sonda y transceptor de infrarrojos	21
Figura 5 Sonda serie TF	21
Figura 6 Principio de medición sensor óxido de aluminio	22
Figura 7 Conexión del sistema de muestreo al analizador PM880 AC	23
Figura 8 Diagrama de flujo del proceso de evaluación de las tecnologías de espejo enfriado y óxido de aluminio	23
Figura 9 Fuentes de variabilidad del modelo de medición.....	32
Figura 10 Resultados de medición de humedad con la tecnología espejo enfriado	35
Figura 11 Resultados de medición de humedad con la tecnología óxido de aluminio	36
Figura 12 Tendencia del punto de rocío vs hora de medición en cada punto de medición.....	37
Figura 13 Incertidumbre expandida para cada punto de medición con la tecnología espejo enfriado.....	39
Figura 14 Incertidumbre expandida para cada punto de medición con la tecnología óxido de aluminio.....	39

Lista de apéndices

	Pág.
Apéndice A Procedimiento técnico de medición del analizador Panametrics PM880.	46
Apéndice B. Procedimiento técnico de medición del analizador Hygrovision-BI.	47
Apéndice C Vista general de las hojas de cálculo “Resultados de medición”, “Incertidumbre” y “Resumen” de Microsoft Excel.	48
Apéndice D Código Visual Basic para el cálculo de la humedad a partir de la ecuación de Bucacek.	49
Apéndice E Resumen de los resultados obtenidos por medio de los equipos disponibles de la tecnología de espejo enfriado y óxido de aluminio, respectivamente.	50

Resumen

Título: Evaluación de las tecnologías Espejo Enfriado y Óxido de Aluminio para la medición de humedad y punto de rocío de vapor de agua en gas natural.*

Autor: Magda Alexandra Castilla Tarazona.**

Palabras Clave: Espejo enfriado, óxido de aluminio, humedad, punto de rocío de vapor de agua, estimación de incertidumbre, método GUM, metrología.

Descripción: La práctica empresarial en la Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico de Gas tuvo la finalidad de comparar las tecnologías espejo enfriado y óxido de aluminio, utilizando los equipos disponibles para la medición de punto de rocío de vapor de agua, permitiendo identificar los aspectos clave para la elección entre estas. La metodología constó de tres etapas, inicialmente se identificaron las normativas y lineamientos, posteriormente se llevó a cabo un análisis detallado de las mediciones y, por último, se identificaron las implicaciones prácticas de ambas tecnologías. Para esto, se establecieron cinco puntos de transferencia de custodia donde se realizaron mediciones directas de punto de rocío del vapor de agua y siguiendo las directrices de la norma ASTM D1142 – 95 (2021), se calculó la humedad y la incertidumbre asociada utilizando el método GUM. Los resultados del proyecto indican que los sensores de óxido de aluminio son versátiles, pero pueden tener mayor incertidumbre en condiciones variables de gas natural, mientras que los higrómetros de espejo enfriado ofrecen tiempos de estabilización más rápidos, pero presentan limitaciones en puntos de rocío de vapor de agua menores a $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ y en puntos con contaminantes o alta humedad. La elección entre ambas tecnologías depende de la aplicación y la precisión requerida.

* Práctica empresarial.

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Ingeniería Química. Directora: Yuly Fernanda López Contreras. Ingeniera Química, PhD. Tutora: Diana Marcela Castillo Blanco. Ingeniera Química.

Abstract

Title: Evaluation of Chilled Mirror and Aluminum Oxide technologies for natural gas moisture and water vapor dew point measurement.*

Author: Magda Alexandra Castilla Tarazona.**

Key Words: Chilled mirror, aluminum oxide, moisture, water dew point, estimation of the uncertainty, GUM method, metrology.

Description: The purpose of the business practice at the Gas Technology Development Center Corporation was to compare the chilled mirror and aluminum oxide technologies, using the available equipment for water vapor dew point measurement, allowing to identify the key aspects for the choice between them. The methodology consisted of three stages, initially the regulations and guidelines were identified, then a detailed analysis of the measurements was carried out and, finally, the practical implications of both technologies were identified. For this, five custody transfer points were established where direct water vapor dew point measurements were performed and following the guidelines of ASTM D1142 - 95 (2021), the moisture and associated uncertainty were calculated using the GUM method. The results of the project indicate that aluminum oxide sensors are versatile, but may have higher uncertainty in varying natural gas conditions, while chilled mirror hygrometers offer faster stabilization times, but have limitations at water vapor dew points below -30 °C and at points with contaminants or high moisture. The choice between the two technologies depends on the application and the required accuracy.

* Business Practice.

** Faculty of Physicochemical Engineering. School of Chemical Engineering. Chemical Engineer. Directora: Yuly Fernanda López Contreras. Chemical Engineer, PhD. Tutor: Diana Marcela Castillo Blanco. Chemical Engineer.

Introducción

El Gas Natural (GN) es una mezcla compleja compuesta principalmente por hidrocarburos ligeros, y puede contener además hidrocarburos pesados, agua, sulfuro de hidrógeno y dióxido de carbono, entre otros compuestos (Ayala et al., 2016). Para que el GN extraído de los pozos pueda ser incorporado en la red de gasoductos y llegar sin problemas a hogares, vehículos e industrias, debe cumplir estándares de calidad de gas (Prieto Jiménez et al., 2019).

La calidad del gas, en el contexto del gas natural, se refiere a las características y especificaciones que debe cumplir el gas para ser considerado apto y seguro para su distribución y uso en aplicaciones industriales, comerciales y domésticas. Estas especificaciones de calidad del GN se encuentran definidas para cada país y hacen parte de documentos regulatorios, para Colombia la Comisión de Regulación de Energía y Gas de Colombia (CREG), desde 1995 y por medio de la Resolución CREG 071 de 1999 (Modificada por la Resolución 41 de 2008) creó el Reglamento Único de Transporte de gas natural (RUT) (López & Salazar, 2010).

Para garantizar que se cumplan estos estándares, se lleva a cabo un proceso de pretratamiento, en donde se eliminan los hidrocarburos de cadena larga para evitar la condensación del gas durante el transporte, al tiempo que se reducen o eliminan compuestos inorgánicos, como el dióxido de carbono, el sulfuro de hidrógeno, el nitrógeno, el agua y otras impurezas (Prieto Jiménez et al., 2019).

Por esta razón, como parte esencial de garantizar la calidad del gas natural, se debe mantener un control adecuado de los niveles de humedad y el punto de rocío del vapor de agua durante la recolección, procesamiento y transporte del GN. Esto es fundamental para asegurar su eficiencia y rentabilidad en todo el ciclo de suministro. (Zou et al., 2021).

Para garantizar que el gas cumple con los límites de humedad establecidos en la regulación,

es importancia garantizar la validez de las mediciones de los parámetros relacionados. Para lograr esto, se hace necesario implementar una política de trazabilidad, así como llevar un estudio de las tecnologías disponibles para medir y controlar la humedad de manera efectiva.

De acuerdo a lo anterior, y teniendo en cuenta la necesidad de contar con mediciones confiables de humedad del gas natural, la Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico de Gas (CDT de Gas) ha puesto a disposición de la industria su conocimiento y experiencia en metrología, para brindar a la industria la medición del contenido de vapor de agua utilizando la tecnología de óxido de aluminio, sin embargo, en los últimos años se ha venido incluyendo la realización de mediciones con la tecnología de espejo enfriado.

El CDT de Gas ofrece servicios en el sector gas, aplicando principios relacionados con la medición de fluidos. A través de su experiencia y conocimientos en metrología, contribuye al avance científico y tecnológico en el sector del gas y de la industria colombiana en general.

A partir de lo anterior, se ha identificado la necesidad de evaluar estas dos tecnologías con el fin de determinar los aspectos más influyentes para tener en cuenta en lo relacionado con mantenimiento y usos específicos, estableciendo mediante un estudio comparativo las implicaciones prácticas para la medición, la toma de decisiones informada y la implementación efectiva de estas tecnologías en el campo de la medición de humedad.

1. Objetivos

1.1. Objetivo general

Evaluar las tecnologías Espejo Enfriado y Óxido de Aluminio con los equipos disponibles en la Corporación CDT de Gas para la medición de humedad y punto de rocío de vapor de agua en gas natural a diferentes puntos de transferencia de custodia.

1.2. Objetivos específicos

Identificar las normativas aplicables y los lineamientos establecidos para cada tecnología de acuerdo con las características de los equipos disponibles en la Corporación CDT de Gas.

Analizar los principales parámetros metroológicos que caracterizan las mediciones de humedad y punto de rocío de vapor de agua en gas natural empleando las tecnologías disponibles en la Corporación CDT de Gas.

Establecer las implicaciones metodológicas y prácticas para la medición de humedad y punto de rocío empleando los equipos disponibles en la Corporación CDT de Gas.

2. Marco conceptual

2.1. Metrología

La metrología es la ciencia de la medición, comprendiendo las determinaciones experimentales y teóricas a cualquier nivel de incertidumbre en cualquier campo de la ciencia y la tecnología. La medición no es algo exclusivo de los científicos. La red de servicios, proveedores y transportadores dependen de la metrología para funcionar de manera eficiente y confiable (Escamilla Esquivel, 2014).

2.2. Mensurando

El mensurando es la magnitud que se desea medir. La especificación de un parámetro a medir implica la comprensión de la naturaleza de la magnitud en cuestión y la descripción del estado del fenómeno, objeto o sustancia que posee dicha propiedad (VIM, 2012).

2.3. Incertidumbre de medida

Es el parámetro no negativo que caracteriza la dispersión de los valores atribuidos a un mensurando a partir de la información que se utiliza (VIM, 2012).

En general, la incertidumbre de medida incluye numerosas componentes. Algunas de estas pueden determinarse mediante una evaluación de tipo A de la incertidumbre de medida, utilizando la distribución estadística de los valores obtenidos a partir de las series de mediciones y pueden ser representados por desviaciones estándar. Las otras, pueden calcularse mediante una evaluación de tipo B de la incertidumbre de medida, también pueden ser caracterizadas por desviaciones estándar, evaluadas a partir de funciones de densidad de probabilidad basadas en la experiencia o en otra información disponible (VIM, 2012).

La “Guide to the expression of uncertainty in measurement” o más conocida como "GUM" es considerada como la guía de referencia más completa y ampliamente aceptada para expresar la incertidumbre en las mediciones (Ruiz et al., 2010). En la actualidad, el CDT de Gas emplea el método GUM para llevar a cabo la evaluación de incertidumbre en diversos procedimientos (García & Dueñas, 2014), incluyendo aquellos relacionados con la metrología de humedad. Por lo tanto, en este documento se seguirá utilizando el método GUM como el enfoque principal para estimar la incertidumbre en dichos procesos.

El modelo de medición de incertidumbre consiste en la relación matemática entre todas las

magnitudes que se sabe que intervienen en una medición. La forma general de un modelo de medición es:

$$h(Y, X_1, \dots, X_n) = 0 \quad (\text{Ec.1})$$

donde Y, la cantidad de salida en el modelo que corresponde al mensurando, cuyo valor de cantidad debe inferirse a partir de la información sobre las cantidades de entrada en el modelo X_1, \dots, X_n (JCGM, 2012). El modelo de medida (Ec.1) puede escribirse explícitamente como:

$$Y = f(X_1, \dots, X_n) \quad (\text{Ec.2})$$

donde Y es la cantidad de salida en el modelo de medición, la función f es la función de medición. En términos más generales, f puede simbolizar un algoritmo que da como resultado para los valores de las cantidades de entrada x_1, \dots, x_n un valor de cantidad de salida único correspondiente (JCGM, 2012).

$$y = f(x_1, \dots, x_n) \quad (\text{Ec.3})$$

Por otra parte, el resultado de medición consiste en la evaluación del modelo de medición en los valores promedio de cada una de las magnitudes de entrada medidas experimentalmente, así como los valores promedio declarados de las magnitudes cuyo valor se toma de fuentes externas, y calcular el mensurando (Capacitaciones virtuales Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas., 2023).

$$y = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_N) \quad (\text{Ec.4})$$

donde las \bar{x}_i que se estiman a partir de datos experimentales se han calculado con la siguiente fórmula.

$$\bar{x}_i = \sum_{k=1}^n \frac{x_{i,k}}{n} \quad (\text{Ec.5})$$

donde $x_{i,k}$, es el valor experimental de la magnitud de entrada i en la k -ésima réplica.

2.3.1. Estimación de incertidumbre estándar

Cuando se expresa el modelo de medición utilizando una serie de Taylor truncada en los términos de primer orden, esto se conoce como una linealización del modelo. Si además todas las magnitudes de entrada son independientes entre sí, varios de los términos de la linealización se anulan, quedando solo los términos lineales significativos (Capacitaciones virtuales Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas., 2023).

La incertidumbre estándar $u_c(y)$ del mensurando Y se estima con la siguiente expresión:

$$u_c(y) = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)^2 u^2(x_1) + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)^2 u^2(x_2) + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_N}\right)^2 u^2(x_N)} \quad (\text{Ec.6})$$

A partir de las incertidumbres $u(x_i)$ de las magnitudes de entrada X_i y del modelo de medición $f(X_1, X_2, \dots, X_N)$, donde,

$$u(x_i) = \sqrt{\sum_{j=1}^m u^2(x_{i,j})} \quad (\text{Ec.7})$$

donde $u(x_{i,j})$, es la incertidumbre de cada fuente de variabilidad (Sí las hay) de las magnitudes de entrada X_i .

De manera general, la incertidumbre estándar se estima con la siguiente ecuación,

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i)} \quad (\text{Ec.8})$$

Las derivadas parciales del modelo de medición respecto a cada magnitud de entrada se conocen como “coeficientes de sensibilidad”, puesto que representan la tasa de cambio del mensurando respecto a un cambio unitario en la magnitud de entrada (Capacitaciones virtuales Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas., 2023).

2.3.2. Incertidumbre expandida

Finalmente, se determina la incertidumbre expandida de medida, cuyo símbolo sugerido es U , como medida de incertidumbre que define un intervalo sobre el resultado de medida “ y ” dentro del cual se cree con certeza (con una alta probabilidad de cobertura) que estará el valor del mensurando Y , el cual se escribe comúnmente como $Y=y\pm U$ (Ruiz et al., 2010). La incertidumbre expandida se obtiene como se muestra a continuación,

$$U = k * u_c(y) \quad (\text{Ec.9})$$

donde k es denominado factor de cobertura y depende de la distribución de probabilidad del resultado de medición (Ruiz et al., 2010).

Se aceptan dos métodos para calcular el factor de cobertura. El primero consiste en modelar la distribución del mensurando como una distribución normal (aproximada). El segundo método implica modelar la distribución del mensurando, utilizando una distribución t con grados de libertad determinados mediante el método Welch-Satterthwaite. Este último enfoque proporciona una aproximación más precisa. Al utilizar los grados de libertad obtenidos mediante el método Welch-Satterthwaite y el nivel de cobertura deseado (p), es posible determinar el factor de cobertura consultando tablas especializadas o mediante funciones usando herramientas de programación como Microsoft Excel (Capacitaciones virtuales Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas., 2023).

La fórmula de Welch-Satterthwaite para el cálculo de los grados de libertad efectivos (ϑ_{eff}) se muestra a continuación,

$$\vartheta_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{\left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^4 u^4(x_i)}{\vartheta_i}} \quad (\text{Ec.10})$$

donde ϑ_i son los grados de libertad asignados a cada magnitud de entrada o fuente de

variabilidad. Los grados de libertad de las variables aleatorias que se modelen con distribuciones t son iguales a $n-1$, para otras variables, se sugiere realizar la asignación de los grados de libertad dependiendo de qué tanta duda se tiene sobre el valor de la incertidumbre, de acuerdo con la siguiente ecuación,

$$\vartheta_i \cong \frac{1}{2 \left(\frac{\Delta u(x_i)}{u(x_i)} \right)^2} \quad (\text{Ec.11})$$

donde, $\frac{\Delta u(x_i)}{u(x_i)}$ se obtiene basado en el conjunto de información disponible (JCGM, 2008).

Para efectos de este trabajo se calcula como $\frac{100-p}{100}$, lo que corresponde al 5 por ciento de duda, ya que, el CDT de Gas, actualmente reporta en sus informes de servicios de medición de humedad un nivel de confianza no menor al 95 por ciento, lo cual establece un rango con un nivel de confianza mínimo y en el desarrollo de este proyecto se optó por adoptar el nivel de confianza mencionado.

2.4. Principio de medición de las tecnologías disponibles en el CDT de Gas para medición de contenido de vapor de agua

2.4.1. Principio de medición del equipo disponible de la tecnología de espejo enfriado

El analizador portátil Hygrovision BL es utilizado para realizar mediciones automáticas y manuales de la temperatura del punto de rocío de vapor de agua, por medio de la tecnología de espejo enfriado. Funciona de acuerdo con el principio de medición directa y emplea un espejo con control de temperatura para establecer el punto de rocío donde se mide la reflectividad del espejo, conforme la temperatura del espejo (superficie reflectante) disminuye, se produce la formación de condensados. La película de condensado en el interior de la cámara de medición se puede visualizar por medio de un sistema óptico ubicado sobre la cámara de alta presión (Figura 1) (“Operating manual for Hygrovision-BL”, s. f.).

Figura 1

Microscopio acoplado para visualización de condensados del analizador Hygrovision BL

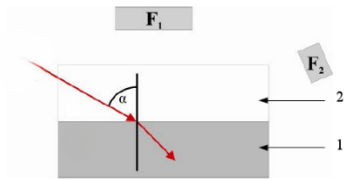


Nota: Adaptado de (“Operating Manual for Hygrovision-BL,” n.d.).

El sistema que detecta la formación de condensados utiliza el fenómeno de refracción total para determinar el punto de rocío, este emplea un láser que emite luz con polarización vertical, la cual ilumina la interfaz del medio heterogéneo (gas) y una superficie dieléctrica reflectante (espejo de temperatura controlada), en un ángulo específico que es conocido como ángulo de Brewster. Cuando el espejo está limpio, es decir, cuando no se ha formado condensado, los rayos de luz polarizada que inciden sobre la interfaz entre el gas (1) y la superficie del espejo (2) se refractan completamente (Figura 2). En consecuencia, no se refleja luz en ninguno de los fotodetectores (F1 y F2) y el resultado es una señal nula de los sensores; visualmente la refracción total en la superficie del espejo se evidencia de color azul claro (“Operating Manual for Hygrovision-BL,” n.d.).

Figura 2

Refracción total en el espejo sin condensado del analizador Hygrovision BL

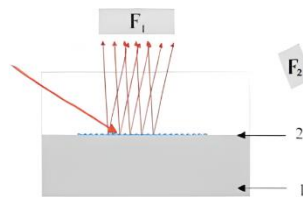


Nota: Adaptado de (“Operating Manual for Hygrovision-BL,” n.d.).

Cuando se forma condensación en el espejo, el ángulo de incidencia de la luz polarizada sobre su superficie cambia y ya no se observa refracción ya que, los rayos de luz se reflejan y dispersan en diversas direcciones. El sistema de registro fotoeléctrico registra un aumento de la intensidad de la luz detectada por el fotodetector situado en la posición F1 (Figura 3). La intensidad de la señal depende de la cantidad de agua condensada; esta condensación aparece como una acumulación de pequeños puntos negros redondos distribuidos uniformemente por toda la superficie del espejo de condensación (“Operating Manual for Hygrovision-BL,” n.d.).

Figura 3

Dispersión de los rayos de luz por condensado en el analizador Hygrovision BL



Nota: Adaptado de (“Operating Manual for Hygrovision-BL,” n.d.).

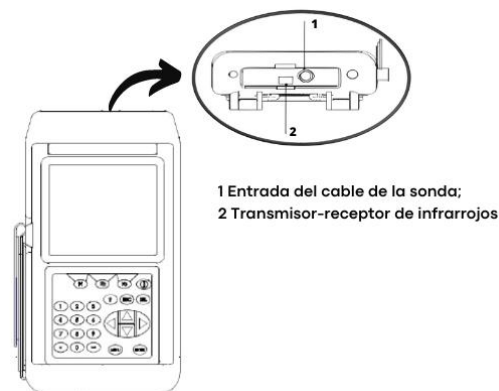
2.4.2. Principio de medición del equipo disponible de la tecnología de óxido de aluminio

El higrómetro PM880 AC cuenta con una entrada en su parte superior para conectar el cable de la sonda de humedad, además dispone de un tranceptor de infrarrojos incorporado que

facilita la comunicación entre el medidor y otros dispositivos de infrarrojos permitiendo el intercambio de datos in situ y la transferencia de registros, como se muestra en la Figura 4 (*Model PM880 AC User's Manual, 2021*).

Figura 4

Higrómetro PM880 AC y su conexión de sonda y transceptor de infrarrojos

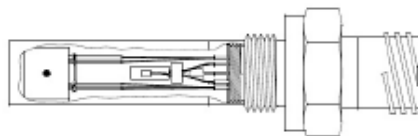


Nota: Adaptado de (*Model PM880 AC User's Manual, 2021*).

Las sondas son la parte del sistema de medición que entra en contacto con el flujo de proceso, el PM880 AC tiene la capacidad de recibir diversos tipos de sondas que permiten realizar mediciones de humedad, temperatura y presión. (*Model PM880 AC User's Manual, 2021*) No obstante, en la Corporación CDT de Gas emplean específicamente tres sondas de la serie de tres funciones (TF), las cuales combinan mediciones de humedad, temperatura y presión (Figura 5).

Figura 5

Sonda serie TF



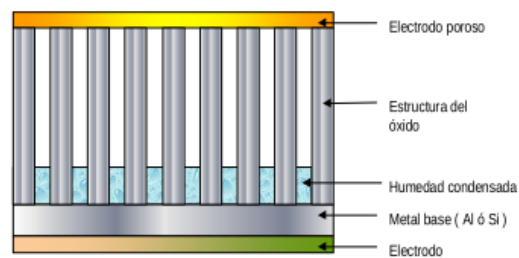
Nota: Tomado de (*Model PM880 AC User's Manual, 2021*).

El concepto fundamental del principio de medición utilizando el sensor de la sonda implica

el uso de una tira de aluminio con una de sus caras anodizadas que proporciona una capa de óxido poroso. Sobre esta superficie, hay una delgada capa de oro, tal como se ilustra en la Figura 6. Estas dos capas funcionan como los dos electrodos esenciales de un condensador hecho con óxido de aluminio. Cuando el sensor entra en contacto con una muestra húmeda, el vapor de agua presente en la muestra se mueve rápidamente a través de la capa de oro y se distribuye en las paredes de los poros de la capa de óxido, en una relación directamente proporcional a la presión parcial del agua en la muestra. La cantidad de moléculas de agua que son absorbidas en la estructura del óxido es lo que determina la conductividad de las paredes de los poros. Esta conductividad, en combinación con su resistencia, da lugar a un valor de impedancia eléctrica que se relaciona directamente con la presión de vapor de agua que rodea al sensor. (Velasco, 1999)

Figura 6

Principio de medición sensor óxido de aluminio



Nota: Tomado de (Velasco, 1999)

Para medir la humedad de manera efectiva, se sugiere utilizar un sistema de muestreo adecuado (Figura 7). El propósito de dicho sistema es ajustar o regular el flujo de muestra según las especificaciones de la sonda, el diseño del sistema de muestreo se determina en función de los requisitos específicos de cada aplicación.

Figura 7

Conexión del sistema de muestreo al analizador PM880 AC



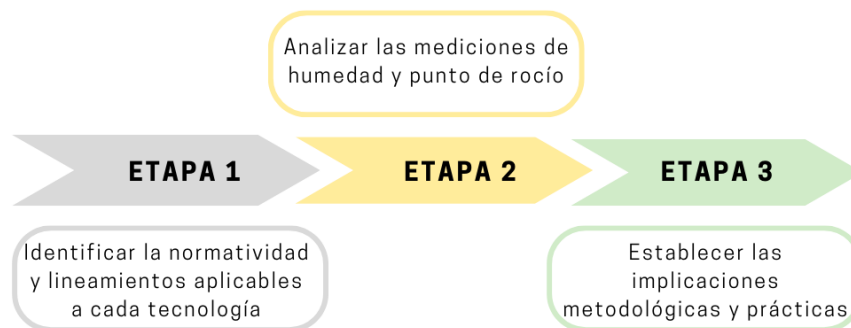
Nota: Tomado de (*Model PM880 AC User's Manual*, 2021).

3. Metodología

Para garantizar el éxito en el desarrollo del trabajo, se planteó la siguiente metodología, de acuerdo con cada objetivo específico propuesto, tal como se ilustra en la Figura 8.

Figura 8

Diagrama de flujo del proceso de evaluación de las tecnologías de espejo enfriado y óxido de aluminio



3.2. Descripción de cada una de las etapas llevadas a cabo durante el desarrollo del proyecto

3.2.1. Identificar la normatividad y lineamientos aplicables a cada tecnología

Se realizó una revisión bibliográfica de las tecnologías espejo enfriado y óxido de aluminio teniendo en cuenta las especificaciones y requerimientos de los equipos con los que cuenta la

Corporación CDT de Gas, por medio de bases de datos como Science Direct y Springer a las que la Universidad Industrial de Santander tiene acceso. Además, de recursos electrónicos como las páginas web oficiales de diferentes organizaciones y/entidades como la ASTM (American Society for Testing and Materials), la ASTM International, la CREG (Comisión de Regulación de Energía y Gas), el RUT (Reglamento único de Transporte), la BIPM (Oficina Internacional de Pesas y Medidas), Minciencias (Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación de Colombia) y algunos artículos de la revista ION (Investigación, Optimización y Nuevos procesos en Ingeniería).

También se hizo uso de recursos suministrados por el CDT de Gas como los manuales operativos y Datasheets de los equipos en estudio, guías de manuales de procedimiento de otros equipos, guía de informes de servicios de los equipos y material electrónico de cursos que se llevaron a cabo durante la práctica.

El objetivo principal de esta etapa del proyecto fue comprender los instrumentos de medición de humedad disponibles en el CDT de Gas.

3.2.2. Analizar las mediciones de humedad y punto de rocío

Se establecieron cinco puntos de transferencia de custodia en GN, con diferentes condiciones de presión para realizar un análisis de las principales características metrológicas de las mediciones de humedad y punto de rocío realizadas con los equipos disponibles en el CDT de Gas, a las que se les estimó la incertidumbre asociada haciendo uso del método GUM. Además, se llevó a cabo un estudio comparativo entre los resultados obtenidos para cada tecnología utilizada.

3.2.3. Establecer las implicaciones metodológicas y prácticas

Se concluyó, haciendo uso de los resultados y hallazgos previos identificando los factores más relevantes relacionados con la calibración, el mantenimiento y los usos específicos de cada

una de las tecnologías evaluadas. Esto permitió establecer posibles implicaciones prácticas para la medición de humedad y punto de rocío del vapor de agua en GN, considerando distintos contextos, lo que llevará al CDT de Gas a poder seleccionar del equipo más adecuado según las necesidades específicas de la industria o darle a esta las condiciones de medición de los equipos para que haya claridad en los resultados que se obtendrán en el caso de condicionar la medición a un equipo en específico.

4. Resultados

4.1. Normatividad y lineamientos aplicables a cada tecnología

4.1.1. Revisión bibliográfica de las tecnologías óxido de aluminio y espejo enfriado incluyendo normatividad y estándares internacionales

Anteriormente, el CDT de Gas realizó una investigación comparativa, que se encuentra documentada en una de sus publicaciones, sobre la calidad del gas natural conforme a la normativa colombiana. En este estudio se evaluaron distintos contaminantes presentes en el gas, se examinaron los métodos de regulación y se analizaron sus características metrológicas, incluyendo aspectos cruciales como la humedad y el punto de rocío, en la Tabla 1 se proporciona una visión general de los hallazgos obtenidos en el estudio.

Tabla 1*Métodos y características metroológicas humedad y punto de rocío*

CONTAMINANTE	MÉTODO	CARACTERÍSTICAS METROLÓGICAS
HUMEDAD (H₂O)	ASTM D1142. Contenido de vapor de agua por medición de la temperatura del Punto de Rocío.	No existen datos de precisión disponible para este método
	ASTM D4888. Vapor de agua en Gas Natural usando Tubos detectores.	La precisión considerada generalmente es de +/- 25% del valor de la lectura.
	ASTM D5454. Contenido de vapor de agua en gases combustibles empleando analizadores de humedad electrónicos.	Los datos de precisión se están preparando para este método de ensayo mediante un estudio entre laboratorios
PUNTO DE ROCÍO DE HIDROCARBURO	ASTM D1142. Contenido de vapor de agua por medición de la Temperatura del Punto de Rocío.	No existen datos de precisión disponibles para este método

***ASTM:** American Society for Testing and Materials (Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales)

Nota: Adaptado de (Hernández Suarez et al., 2008).

Para respaldar lo mencionado anteriormente, la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) reconoce que uno de los métodos más ampliamente empleados para medir el punto de rocío de vapor de agua es el método de espejo enfriado y se sugiere la realización de mediciones y calibraciones periódicas siguiendo las pautas establecidas en la norma ASTM (American Society for Testing and Materials) D-1142-95(2021), o, en su defecto, utilizar estándares de mayor exactitud siempre que estén disponibles (RESOLUCIÓN GREG-071 DE 1999. Reglamento Único de Transporte (RUT), 2019).

Por otro lado, la organización ASTM International designa la norma ASTM D5454 - 11(2020) como el método estándar para determinar el contenido de vapor de agua en combustibles gaseosos mediante el uso de analizadores electrónicos de humedad.

En el país, el manejo de todos los campos de gas es similar, ya que, en cada pozo se realiza la medición del caudal volumétrico con el propósito de monitorearlo; luego, el gas es transportado a instalaciones de producción donde se somete a un proceso de tratamiento para eliminar cualquier componente que pueda impedir cumplir con las condiciones establecidas por el RUT. Si el GN entregado por el agente no cumple alguna de las especificaciones establecidas, será necesario llevar a cabo todas las operaciones de procesamiento requeridas hasta que se alcancen dichas especificaciones, de lo contrario, no será posible realizar la entrega del gas en los puntos de transferencia de custodia. Las especificaciones establecidas en RUT en cuanto a humedad y punto de rocío de vapor de agua refieren que debe estar libre de líquidos, y que el contenido máximo de vapor de agua debe ser de 6 lb/MMSCF o 97 mg/m³ (RESOLUCIÓN GREG-071 DE 1999. Reglamento Único de Transporte (RUT), 2019).

4.1.2. Ventajas y desventajas de cada una de las tecnologías teniendo en cuenta los equipos disponibles

Con el fin de definir la aplicabilidad de las tecnologías de espejo enfriado y óxido de aluminio en los procedimientos de medición, se estudiaron sus ventajas y restricciones, tomando en consideración las especificaciones de los equipos disponibles para medir la humedad y el punto de rocío (Tabla 2).

Tabla 2

Especificaciones teórico-prácticas de cada tecnología teniendo en cuenta los equipos disponibles

VENTAJAS	
Espejo enfriado	Óxido de aluminio
<p>Conociendo parámetros como la temperatura y la presión, los demás parámetros psicrométricos se pueden calcular con precisión (D 5454 – 93, s. f.).</p> <p>Es uno de los métodos con mayor precisión para determinar el punto de rocío de un gas que contiene vapor de agua y, por extensión, para analizar trazas de humedad (When Your Dew Point Measurements Matter, 2021).</p> <p>El Hygrovision BL opera hasta una presión 250 bar («Operating manual for Hygrovision-BL», s. f.).</p>	<p>Las sondas de la serie de tres funciones (TF), disponibles en el CDT de Gas combinan mediciones de humedad, temperatura y presión.</p> <p>Son de tamaño moderado, lo que permite que se puedan implementar en múltiples puntos a lo largo de las líneas de proceso (ASTM D 5454 – 93, s. f.).</p> <p>Estima valores de punto de rocío de agua menores a -30°C.</p> <p>El PM880 cuenta con un amplio rango de opciones en unidades de medición, entre ellas una de las más utilizadas en medición de humedad [lb/MMSCF]*.</p> <p>El PM880 opera hasta una presión de 345 bar. (Model PM880 AC User’s Manual, 2021).</p> <p>La inversión inicial usualmente es menor a la de otras tecnologías (Gleissner, s. f.).</p>
DESVENTAJAS	
Espejo enfriado	Óxido de aluminio
<p>Usualmente son de mayor tamaño y podría dificultar su uso en diferentes puntos de proceso (ASTM D 5454 – 93, s. f.).</p> <p>El Hygrovision BL no estima valores de punto de rocío menores a -30°C, de encontrarse debajo de este valor, el equipo muestra “<-30°C”.</p> <p>A diferencia del PM880 el Hygrovision BL no mide humedad ni presión, por lo que es necesario usar un transductor de presión.</p> <p>La inversión inicial usualmente es mayor que la de otras tecnologías (Gleissner, s. f.).</p>	<p>Su tiempo de estabilización tiende a ser lento (Gleissner, s. f.).</p> <p>Cuando estos sensores muestran un buen tiempo de respuesta para mediciones de seco a húmedo, el tiempo de respuesta de húmedo a seco es significativamente más lento (Gleissner, s. f.).</p>
* lb/MMSCF: Libra por millón de pie cúbico.	

Por otra parte, algunas de las especificaciones y condiciones técnicas de operación de los

equipos vienen detalladas en sus manuales y facilitan la puesta en marcha de estos, dichas especificaciones se muestran en las Tablas 3 y 4 para el analizador Panametrics PM880 AC y el Hygrovision BL respectivamente, e influyen en la respuesta global de la medición de Humedad. Si un equipo no cumple con las características especificadas, ya sean electrónicas, operacionales, mecánicas o de seguridad, se comprometerá su funcionamiento y el resultado de las mediciones.

Tabla 3

Características y condiciones de operación del Panametrics PM880 AC

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN	
ELECTRÓNICA	Batería interna	Recargable. Las baterías PM880 se pueden instalar o desinstalar según conveniencia.
	Temperatura de funcionamiento	14 a 122 °F (-10 a 50 °C)
	Presión de operación	Configuraciones posibles entre 0 a 500 psig (1 to 345 bar)
	Unidades de visualización	<ul style="list-style-type: none"> • Humedad: temperatura DP, ppmv, ppmw, % HR, lb/ MMSCF y otros Unidades de visualización. • Temperatura: °F, °C y °K
MEDICIÓN DE HUMEDAD	Calibración	Los sensores de humedad de Panametrics están calibrados por computadora según las concentraciones de humedad rastreables del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST).
TEMPERATURA DE PUNTO DE ROCÍO/ESCARCHA	Rangos de calibración (punto de rocío/escarcha)	Estándar: 50 a -112 °F (+10 a -80 °C) con datos de +68 a -166 °F (+20 a -110 °C)
	Exactitud (punto de rocío/escarcha)	<ul style="list-style-type: none"> • ±3,6 °F (±2 °C) por encima de -148 °F (-100 °C) • ±5,4 °F (±3 °C) por debajo de -148 °F (-100 °C)
	Repetibilidad (punto de rocío/escarcha)	<ul style="list-style-type: none"> • ±0,4 °F (±0,2 °C) por encima de -148 °F (-100 °C) • ±0,9 °F (±0,5 °C) por debajo de -148 °F (-100 °C)

Nota: Adaptado de (*PM880 Panametrics portable hygrometer*, 2020).

Tabla 4

Características, especificaciones y condiciones de operación del Hygrovision-BL

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN
Periodo de operación	Ilimitado utilizando una fuente de alimentación externa.
Rango de medición de punto de rocío	De -30°C a temperatura ambiente
Temperatura de operación	De -10 a +50°C
Temperatura del gas objetivo	De -20 a +50°C
Límites de tasa de error para mediciones	±1°C en el rango hasta -30°C a temperatura ambiente; ±1,5 °C en el rango entre -60 a -30°C
Tiempo de funcionamiento continuo	4 horas por acumulador
Presión operacional	de 0,1 a 30 MPa (10 a 250 Bar)
Duración de la batería recargable	10 años
Vida útil del sensor de punto de rocío	3 años

Nota: Adaptado de (*Dew point analyzer. Humidity Analyzer HYGROVISION-BL*, 2017)

4.1.3. Procedimientos técnicos de medición de los analizadores PANAMETRICS PM880 y el HYGROVISION-BL

Los procedimientos técnicos de medición en las empresas sirven como una guía para el uso adecuado de los equipos durante una medición ya que, proporcionan al operario una secuencia de pasos a seguir, lo que ayuda a evitar errores técnicos.

En el CDT de Gas, disponían de un procedimiento técnico con última actualización en el año 2020 para el equipo PANAMETRICS PM880, al que se le realizó una actualización, añadiendo mayor detalle en las condiciones y descripción técnica del mismo, a partir del manual de operación del equipo, además, se incorporaron aspectos como el principio de medición, fuentes de incertidumbre, coeficiente de sensibilidad, incertidumbre expandida, entre otros. El Apéndice A proporciona una visión general del contenido del procedimiento.

Por otra parte, se creó el procedimiento técnico de medición para el equipo HYGROVISION-BL, ya que no existía uno previamente, a partir del manual de operación del

equipo. Este procedimiento incluye objetivos, alcance, consideraciones generales, descripción técnica de operación, prueba funcional, descripción del principio de medición, fuentes de incertidumbre, coeficiente de sensibilidad y la estimación de la incertidumbre expandida, entre otros aspectos importantes. El Apéndice B brinda una visión general de lo mencionado anteriormente.

4.2. Análisis de las mediciones de humedad y punto de rocío realizadas con los equipos disponibles

El modelo para estimar los resultados de medición de humedad a partir del punto de rocío de vapor de agua en gas natural, junto con su correspondiente incertidumbre expandida, ha sido desarrollado mediante la utilización de la herramienta Microsoft Excel y Visual Basic. Sin embargo, en este trabajo de grado, realizado en la modalidad de práctica empresarial, no es posible compartir los archivos concretos debido a que estos son considerados información confidencial por parte de la Corporación CDT de Gas. En su lugar, se proporcionará una descripción detallada del modelo y se presentarán vistas generales de las hojas de cálculo de la plantilla en Apéndice C, con el objetivo de brindar una comprensión completa del enfoque y los resultados obtenidos en este proyecto.

4.2.1. Cálculo del resultado de medición

El mensurando, que en este caso es la humedad de medición w [lb/MMSCF], se evalúa en un punto de flujo de gas natural específico, considerando la temperatura y presión correspondientes a la temperatura de punto de rocío de vapor de agua y la presión observadas en ese punto. Para llevar a cabo esta medición, la norma ASTM D1142-95(2021) proporciona una serie de tablas que permiten calcular la humedad a partir de la temperatura de punto de rocío de vapor de agua y la

presión medidas en el proceso de medición. No obstante, la aplicación de estas tablas puede resultar compleja y propensa a errores de interpolación y/o extrapolación, según las circunstancias particulares.

Por lo anterior, se ha propuesto la adopción del modelo de medición establecido por Bucacek (Aimikhe & A. Adeyemi, 2020; Moshfeghian, 2014) del cuál se ofrece una correlación en la norma para el cálculo mediante las tablas mencionadas («ASTM D1142 – 95 (Reapproved 2021)», 2021). El modelo de medición se detalla a continuación,

$$w = 47430 * \left(\frac{P_{sw}}{P}\right) + B \quad (\text{Ec.13})$$

$$B = \exp \left[6,69449 - \frac{3083,87}{T+459,67} \right] \quad (\text{Ec.14})$$

Donde, w [lb/MMSCF], es la humedad de medición; P es la presión a la que se determinó el punto de rocío del gas, [psia]; T es la temperatura de punto de rocío medida, [°F], a la presión P ; y P_{sw} es la presión de vapor de agua, [psia]. Además, las (Ec. 15 y 16) muestran la ecuación internacional para el cálculo de la presión de vapor (Wagner & Pruß, 2002),

$$P_{sw} = P_c * \exp[(a_1 \tau + a_2 \tau^{1,5} + a_3 \tau^3 + a_4 \tau^{3,5} + a_5 \tau^4 + a_6 \tau^{7,5}) / (1 - \tau)] \quad (\text{Ec.15})$$

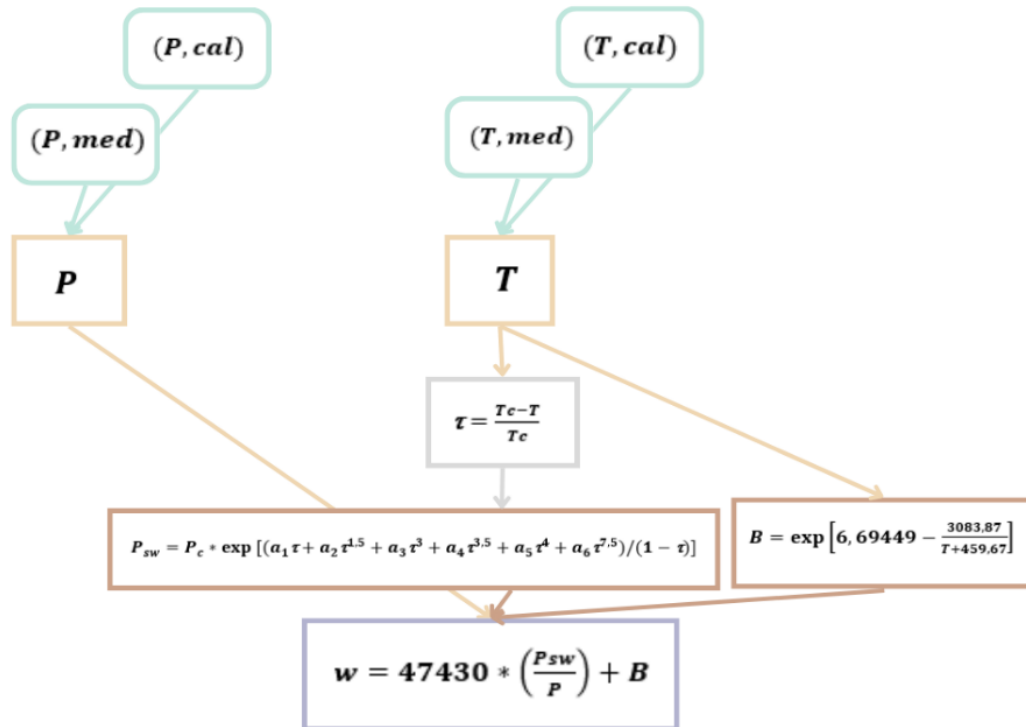
$$\tau = \frac{T_c - T}{T_c} \quad (\text{Ec.16})$$

Donde, $T_c = 647,096$ [K], $P_c = 22,064$ [MPa], $a_1 = -7,85951783$, $a_2 = 1,88408259$, $a_3 = -11,7866497$, $a_4 = 22,6807411$, $a_5 = -15,9618719$, $a_6 = 1,80122502$, P_{sw} [MPa] y T [K]. Siendo T_c y P_c , la temperatura y presión críticas respectivamente.

Con lo anterior, se puede inferir que la humedad en el gas natural depende de la temperatura de punto de rocío de vapor de agua (T) y de la presión a la que se llevó a cabo la medición. Por lo tanto, se consideraron las fuentes de variabilidad de estas magnitudes. En la Figura 9 se presentan las fuentes de variabilidad en el modelo de medición de humedad en gas natural al implementar los equipos disponibles de las tecnologías espejo enfriado y óxido de aluminio.

Figura 9

Fuentes de variabilidad del modelo de medición



Adicionalmente, en la tabla 6, se muestran las fuentes de variabilidad, su tipo de evaluación y la distribución de probabilidad asociada que se usa para reducir las a valores de incertidumbre estándar para su posterior combinación.

Tabla 5

Descripción de las fuentes de variabilidad

Var. Entrada	Fuente var.	Unid.	Tipo	Distribución	$u(x_{i,j})$
P	Medición	psig	A	t	$\frac{\sigma *}{\sqrt{n}}$
	Calibración	psig	B	Normal (k=2)	$\frac{U}{k}$

T	Medición	°F	A	t	$\frac{\sigma^*}{\sqrt{n}}$
	Calibración	°F	B	Normal (k=2)	$\frac{U}{k}$

* σ es desviación estándar y n es el número de mediciones realizadas.

Para evaluar la incertidumbre asociada a la medición, las fuentes provenientes de calibración fueron tomadas de los certificados de calibración de los instrumentos utilizados para cada tecnología, disponibles en el CDT de Gas. Debido a que el equipo utilizado en la tecnología de espejo enfriado no está diseñado para realizar mediciones de presión, se emplearon las mediciones de presión realizadas por el equipo de la tecnología de óxido de aluminio.

Por otra parte, en la hoja de cálculo denominada "Resultados de medición", se realiza el cálculo de la humedad en unidades [lb/MMSCF] mediante la evaluación del modelo previamente descrito (Ec.13 a 16). Este cálculo se basa en el promedio de las mediciones de temperatura de punto de rocío de vapor de agua y de la presión en las cuales se realizaron las observaciones, y se ejecuta mediante la llamada a la función programada en Visual Basic (Apéndice D).

Para este propósito, se establecieron cinco puntos de transferencia de custodia distintos, la elección de estos puntos se fundamentó en la disponibilidad de datos, las ofertas de servicios y consideraciones logísticas, con el fin de asegurar la calidad de las mediciones realizadas en el marco de esta investigación. Estos puntos se encuentran ubicados en ciudades como Barrancabermeja y Villavicencio, donde ya existen relaciones de colaboración previas con empresas del sector de gas natural por parte del CDT de Gas. Es fundamental destacar que cada uno de estos puntos presenta variaciones en los niveles de presión del gas natural, con el fin de comprender cómo las condiciones de presión pueden influir en las mediciones. Además, dado que son puntos de transferencia de custodia, se requiere que cumplan con las condiciones establecidas

en el RUT, por lo que resulta imprescindible medir parámetros como la humedad para facilitar la entrega y recepción adecuadas del gas natural. En la Figura 10, se presentan los resultados de las mediciones de humedad utilizando la tecnología de espejo enfriado en los puntos 1, 2 y 3, mientras que en los puntos 4 y 5 no fue posible obtener mediciones, ya que se observó que estos últimos puntos medidos presentaban saturación de sustancias que no eran objeto de estudio en este proyecto. Esta saturación resultó invasiva para los equipos de ambas tecnologías, pero afectó principalmente el funcionamiento de la tecnología de espejo enfriado, que notificaba la presencia de suciedad en el espejo, a pesar de los intentos por limpiarlo, esta notificación persistía. Además, en el punto 5, la humedad estaba muy por encima de los límites establecidos por el RUT, lo que también dificultaba las mediciones con esta tecnología. Se informó a los responsables sobre esta situación para tomar las medidas de procesamiento necesarias hasta que se cumplan las especificaciones requeridas.

Figura 10

Resultados de medición de humedad con la tecnología espejo enfriado

DATOS DE MEDICIÓN				PROMEDIO DE MEDICIONES			INCERTIDUMBRE ORIGINAL				RESULTADO DE MEDICIÓN	
Punto de medición	Repetición (n)	Presión medida [psig]	PR H ₂ O medido [°F]	Var. Entrada	Fuente de var.	Promedio	n	U	k	$u(x_{i,j})$	w [lb/MMSCF]	$\pm U(w)$ [lb/MMSCF]
1	1	59,41	< -22	P	Medición [psig]	59,41	5			0,00	< 5,45	----
	2	59,41	< -22		Calibración [psig]	0,00		3	2,01	1,49		
	3	59,41	< -22	T	Medición [°F]	< -22,00	5			0,000		
	4	59,41	< -22		Calibración [°F]	0,00		0,39	2	0,20		
	5	59,41	< -22									
2	1	917,38	-17,32	P	Medición [psig]	920,06	5			0,77	< 1,08	----
	2	919,26	< -22		Calibración [psig]	0,00		0,42	2	0,21		
	3	921,22	< -23,8	T	Medición [°F]	< -22,14	5			1,255		
	4	921,22	< -23,8		Calibración [°F]	0,00		0,39	2	0,20		
	5	921,22	< -23,8									
3	1	107,94	-10,66	P	Medición [psig]	107,91	5			0,015	5,85	0,20
	2	107,90	-10,84		Calibración [psig]	0		3,00	2	1,5		
	3	107,94	-11,02	T	Medición [°F]	-11,02	5			0,13		
	4	107,90	-11,20		Calibración [°F]	0,00		0,39	2	0,20		
	5	107,86	-11,38									

Por otra parte, en la Figura 11, se presentan los resultados de las mediciones de humedad utilizando la tecnología de óxido de aluminio en todos los puntos designados, sin ninguna excepción.

Figura 11

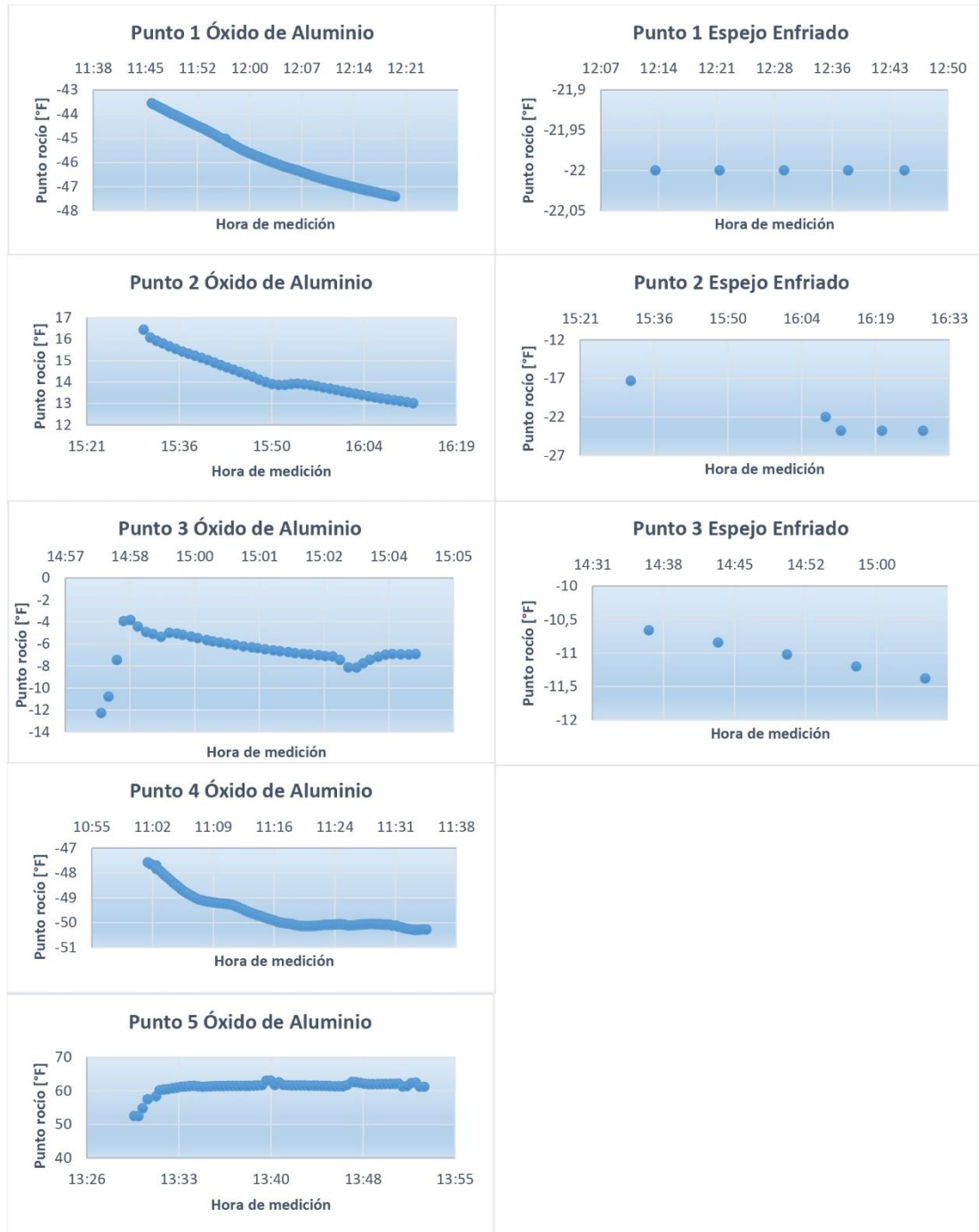
Resultados de medición de humedad con la tecnología óxido de aluminio

DATOS DE MEDICIÓN				PROMEDIO DE MEDICIONES			INCERTIDUMBRE ORIGINAL				RESULTADO DE MEDICIÓN	
Punto de medición	Repetición (n)	Presión medida [psig]	PR H ₂ O medido [°F]	Var. Entrada	Fuente de var.	Promedio	n	U	k	$u(x_{i,j})$	w [lb/MMSCF]	$\pm U(w)$ [lb/MMSCF]
1	98	59,41	-47,33	P	Medición [psig]	59,41	102			0,00	1,73	1,40
	99	59,41	-47,35		Calibración [psig]	0,00		3	2,01	1,49		
	100	59,41	-47,37	T	Medición [°F]	-45,79	102			0,003		
	101	59,41	-47,39		Calibración [°F]	0,00		1,7	2	0,85		
	102	59,41	-47,42									
2	39	915,15	13,20	P	Medición [psig]	913,68	43			0,38	3,36	0,18
	40	916,02	13,15		Calibración [psig]	0,00		0,42	2	0,21		
	41	917,38	13,11	T	Medición [°F]	14,26	43			0,011		
	42	919,26	13,06		Precisión [°F]	0,00		1,6	2	0,80		
	43	921,22	13,01									
3	39	107,97	-7,00	P	Medición [psig]	109,48	43			0,004	7,05	0,43
	40	107,95	-6,94		Calibración [psig]	0,00		3	2	1,5		
	41	107,93	-6,96	T	Medición [°F]	-6,56	43			0,00		
	42	107,94	-6,98		Precisión [°F]	0,00		1,3	2	0,65		
	43	107,90	-6,93									
4	96	334,09	-50,30	P	Medición [psig]	336,26	100			0,027	0,65	0,03
	97	334,00	-50,29		Calibración [psig]	0,00		0,42	2	0,21		
	98	333,75	-50,28	T	Medición [°F]	-49,60	100			0,00		
	99	333,59	-50,27		Precisión [°F]	0,00		1,6	2	0,80		
	100	333,46	-50,28									
5	64	447,14	61,44	P	Medición [psig]	444,24	68			0,012	29,78	1,62
	65	447,32	62,34		Calibración [psig]	0,00		0,42	2	0,21		
	66	447,31	62,43	T	Medición [°F]	61,16	68			0,07		
	67	447,38	61,24		Precisión [°F]	0,00		1,6	2	0,80		
	68	447,39	61,24									

Adicionalmente, en la Figura 12 se representa la tendencia de los valores de punto de rocío en función del tiempo de medición para cada uno de los puntos y las tecnologías utilizadas en las mediciones.

Figura 12

Tendencia del punto de rocío vs hora de medición en cada punto de medición



4.2.2. Estimación de la incertidumbre de medición

En la hoja de cálculo denominada "Incertidumbre"(Apéndice C), se procede a estimar la incertidumbre combinada. A partir de las incertidumbres individuales $u(x_i)$ de las magnitudes de entrada X_i , y con sus correspondientes coeficientes de sensibilidad (Ec.8). Los coeficientes de sensibilidad se hallaron mediante las aproximaciones de la derivada parcial de la función $w(P, T)$, utilizando la Diferencia Dividida Central para las variables P y T, como se muestran a continuación,

$$\frac{\partial w}{\partial P} = \frac{f(P+h,T)-f(P-h,T)}{2*h} \quad (\text{Ec.17})$$

$$\frac{\partial w}{\partial T} = \frac{f(P,T+h)-f(P,T-h)}{2*h} \quad (\text{Ec.18})$$

Con $h = u(x_i)$.

Posteriormente, se aplicó la fórmula de Welch-Satterthwaite para calcular los grados de libertad efectivos correspondientes a cada tecnología y punto de medición (Ec. 10 y 11), y se procedió a calcular la incertidumbre expandida (Ec. 9). Finalmente, se resume la información de los valores obtenidos en la hoja de cálculo designada como "Resumen" (Apéndice E).

En la Figura 13 se presenta el cálculo de la incertidumbre expandida para el equipo de tecnología de espejo enfriado solamente en el punto 3, puesto que en los puntos 1 y 2, la temperatura de punto de rocío cae por debajo de los $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, lo cual provoca que los resultados de medición de humedad no generen un valor específico utilizando esta tecnología. En consecuencia, la imposibilidad de obtener valores precisos en estos puntos impide llevar a cabo la evaluación de la incertidumbre. Por otra parte, en los puntos 4 y 5, no fue posible establecer la incertidumbre expandida puesto que no se obtuvieron mediciones como se expuso en la sección anterior.

Cabe destacar que, en los puntos 1 y 2, donde no se pudo estimar la incertidumbre expandida utilizando la tecnología de espejo enfriado, la humedad se encuentra por debajo del

límite de 6 lb/MMSCF, lo que indica que el gas natural analizado en estos puntos cumple con los requisitos establecidos por el RUT. No obstante, en situaciones en las que la presión en esos puntos sea más baja (cerca de 35 psig o menor), el valor presentado podría o no ajustarse a lo establecido en el RUT ya que, no se dispone de un valor de medición específico en tales circunstancias, lo que podría generar dudas en cuanto al cumplimiento de los estándares requeridos.

Figura 13

Incertidumbre expandida para cada punto de medición con la tecnología espejo enfriado

CÁLCULO DE INCERTIDUMBRE												
INCERTIDUMBRE COMBINADA						NIVEL DE COBERTURA		GRADOS DE LIBERTAD		FACTOR DE COBERTURA	INCERT. EXPANDIDA	
Punto de medición	Magnitud	$u(x_i)$	Coef. Sensib.	$u(x_i) + coef.$ [lb/MMSCF]	$u_c(y)$ [lb/MMSCF]	Magnitud	P	Var. Entrada	θ_i	θ_{eff}	k	$\pm U(W)$ [lb/MMSCF]
3	P,med [psig]	1,50	-0,040850279	-0,061	0,09	T,med	0,95	P,med	4,00	7,84	2,36	0,20
	P,cal [psig]					P,cal		200,00				
	T,med [°F]	0,23	0,260792901	0,061		P,med		4,00				
	T,prec [°F]					T,prec		200,00				

Asimismo, en la Figura 14 se detalla el cálculo de la incertidumbre expandida para el equipo de la tecnología de óxido de aluminio para los puntos propuestos, sin ninguna excepción.

Figura 14

Incertidumbre expandida para cada punto de medición con la tecnología óxido de aluminio

CÁLCULO DE INCERTIDUMBRE												
INCERTIDUMBRE COMBINADA						NIVEL DE COBERTURA		GRADOS DE LIBERTAD		FACTOR DE COBERTURA	INCERT. EXPANDIDA	
Punto de medición	Magnitud	$u(x_i)$	Coef. Sensib.	$u(x_i) + coef.$ [lb/MMSCF]	$u_c(y)$ [lb/MMSCF]	Magnitud	P	Var. Entrada	θ_i	θ_{eff}	k	$\pm U(W)$ [lb/MMSCF]
1	P,med [psig]	1,49	-1,70E-02	-0,025	0,70	P,med [psig]	0,95	P,med	101,00	67,29	2,00	1,40
	P,cal [psig]					P,cal		200,00				
	T,med [°F]	0,85	8,27E-01	0,703		T,med [°F]		101,00				
	T,prec [°F]					T,prec		200,00				
	2	P,med [psig]	0,43	-0,002313146		-0,001		0,0886	T,med			
P,cal [psig]		P,cal			200,00							
T,med [°F]		0,80	0,110742609	0,089	P,med	42,00						
T,prec [°F]					T,prec	200,00						
3		P,med [psig]	1,50	-0,049541818	-0,074	0,22	T,med		0,95	P,med	42,00	43,90
	P,cal [psig]	P,cal					200,00					
	T,med [°F]	0,65	0,311451354	0,202	P,med		42,00					
	T,prec [°F]				T,prec		200,00					
	4	P,med [psig]	0,21	-0,000604621	0,000		0,0167	T,med		0,95	P,med	
P,cal [psig]		P,cal				200,00						
T,med [°F]		0,80	0,020872616	0,017	P,med	99,00						
T,prec [°F]					T,prec	200,00						
5		P,med [psig]	0,21	-0,06015393	-0,013	0,81		T,med	0,95		P,med	67,00
	P,cal [psig]	P,cal					200,00					
	T,med [°F]	0,80	1,003431214	0,806	P,med		67,00					
	T,prec [°F]				T,prec		200,00					

Por último, en el Apéndice E se presenta en resumen los resultados obtenidos de las mediciones realizadas considerando los equipos disponibles y sus respectivas especificaciones.

4.3. Implicaciones metodológicas y prácticas de la implementación de los equipos disponibles para cada tecnología

En situaciones en las que se posea información previa o sospechas de que los niveles de humedad superan los límites del RUT, ambas tecnologías presentan desventajas. Con la tecnología de espejo enfriado, no es posible obtener un valor específico de humedad, lo que limita la capacidad de confirmar si se cumple con los requerimientos. Por otro lado, los sensores de óxido de aluminio pueden generar mediciones con una incertidumbre que podría indicar que la humedad está fuera de los límites exigidos, incluso si en realidad se encuentra dentro de ellos.

A raíz de las observaciones realizadas en los certificados de calibración, en particular con respecto a la incertidumbre asociada a la presión en los equipos que emplean la tecnología de óxido de aluminio, se recomienda considerar el uso de equipos que ofrezcan una mayor precisión en esta magnitud. Estos equipos de mayor exactitud están disponibles en la Corporación y ya se han estado implementando en el contexto de la tecnología de espejo enfriado. Esta estrategia permite obtener resultados de medición con una menor incertidumbre asociada, lo que contribuye a mejorar la precisión y confiabilidad de las mediciones.

Los resultados de este estudio indican que la tecnología de óxido de aluminio presenta ventajas claras sobre la tecnología de espejo enfriado en situaciones donde la humedad supera las condiciones establecidas por el RUT. Se ha observado que, en condiciones de alta humedad, la tecnología de espejo enfriado enfrenta dificultades significativas debido a la acumulación de condensación en el espejo, que no puede ser eliminada de manera automática. Por lo tanto, se sugiere considerar el uso de la tecnología de óxido de aluminio en estos escenarios, ya que ha

demostrado ser más robusta y efectiva al mantener su capacidad de medición.

En resumen, ambas tecnologías presentan sus propias ventajas y limitaciones, y se emplean en diferentes contextos según las necesidades y las condiciones de medición. La elección entre la tecnología de espejo enfriado y la de óxido de aluminio dependerá de diversos factores, como la temperatura de punto de rocío, la presión, la presencia de sustancias indeseadas y la precisión requerida en la medición de humedad. Es fundamental comprender las características y comportamientos de cada tecnología para seleccionar la más adecuada en función de los objetivos de medición y las condiciones específicas de cada aplicación en la industria del gas natural.

5. Conclusiones

Después de estudiar las normativas aplicables para cada tecnología y considerar las especificaciones de los equipos disponibles en el CDT de Gas, se identificó que la norma más apropiada para calcular la humedad en gas natural y estimar su incertidumbre asociada a partir de las mediciones de punto de rocío de vapor de agua es la ASTM D1142-95(2021).

Al analizar la incertidumbre expandida en el caso donde fue posible estimarla para ambas tecnologías, se evidenció una incertidumbre menor con la tecnología de espejo enfriado. Esto sugiere que emplear esta tecnología en puntos donde el gas natural medido es apropiado para la transferencia de custodia y presenta niveles de humedad cercanos a los valores establecidos conlleva a mediciones de mayor exactitud.

En los puntos de medición donde el gas natural no cumplía con las condiciones del RUT, la tecnología de Espejo Enfriado experimentó dificultades al notificar la presencia de suciedad en el espejo, lo que afectó su capacidad de realizar mediciones. Por otro lado, la tecnología de óxido de aluminio demostró ser más resistente, manteniendo su capacidad de medir en estos puntos. Esto

resalta la importancia de considerar la robustez de las tecnologías de medición y subraya la utilidad de la tecnología de óxido de aluminio en situaciones que puedan involucrar posibles contaminantes y/o alta humedad.

La tecnología de óxido de aluminio registró un mayor número de mediciones y con mayor frecuencia durante el período de operación. A pesar de esto, no logró estabilizarse en los tres primeros puntos medidos. Sin embargo, ambas tecnologías exhibieron una tendencia a buscar su estabilización a lo largo del tiempo, lo cual se evidenció en la ausencia de fluctuaciones significativas o variaciones abruptas en las mediciones.

Los sensores de óxido de aluminio ofrecen versatilidad y mediciones específicas a pesar de las condiciones que pueda presentar el gas natural, aunque podrían estar asociadas con una incertidumbre más elevada. Por otro lado, los higrómetros de espejo enfriado brindan mediciones con tiempos de estabilización más rápidos; sin embargo, en puntos de rocío menores a $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, la estimación de incertidumbre no es posible y con sobresaturación de otras sustancias o alta humedad se pueden dificultar las mediciones. La elección entre estas tecnologías dependerá de las condiciones específicas de la aplicación y el nivel de exactitud requerido.

Referencias bibliográficas

- ASTM D1142 – 95 (Reapproved 2021): Standard Test Method for Water Vapor Content of Gaseous Fuels by Measurement of Dew-Point Temperature. (2021). *ASTM Internacional*.
<https://doi.org/10.1520/D1142-95R21>
- Ayala, E., Aparicio, A., & García, C. (2016). Revisión del cálculo de poder calorífico y punto de rocío del gas natural, y de la estimación de sus incertidumbres. *Revista ION*, 29(2), 87-99.
<https://doi.org/10.18273/REVION.V29N2-2016007>
- Calculadora de humedad de gas natural PST*. (2023). Michell Instruments Ltd.
<https://www.processsensing.com/en-us/humidity-calculator/natural-gas/>
- Capacitaciones virtuales Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas. (2023). *Estimación de la incertidumbre de la medición*. [MOOC]. <https://capacitacion.cdtdegas.com/>
- Corporación CDT de Gas. (s. f.). *Investigación y Desarrollo*. Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico de Gas. Recuperado 30 de julio de 2023, de
<https://www.cdtdegas.com/index.php/tecnologia/id>
- D 5454 – 93 Standard Test Method for Water Vapor Content of Gaseous Fuels Using Electronic, 2020. Recuperado 16 de mayo de 2023, de www.astm.org
- Dew point analyzer. Humidity Analyzer HYGROVISION-BL*. (2017). VYMPEL.
<https://en.vympel.group/products/gas-analyzers/hygrovision-bl/>
- Escamilla Esquivel, Adolfo. (2014). *Metrología y sus aplicaciones*. (Primera edición). Grupo Editorial Patria, S.A.
- García, C. E., & Dueñas, D. F. (2014). PRIMARIO CAMPANA GASOMÉTRICA DEL CDT DE GAS, USANDO MÉTODO MONTE CARLO. *Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas*.

Gleissner, S. (s. f.). *Sensor Technologies Used in Dew Point Transmitters -*

Advantages/Disadvantages / Compressed Air Best Practices. COMPRESSED AIR BEST

PRACTICES. Recuperado 17 de abril de 2023, de

<https://www.airbestpractices.com/technology/instrumentation/sensor-technologies-used-in-dew-point-transmitters-advantagesdisadvantages>

Hernández Suarez, S. M., Fuentes Osorio, J. A., & Abril Blanco, H. (2008). Perspectiva de

Análisis Tecnológico a los Límites de Especificación de la CALIDAD DEL GAS

NATURAL Establecidos en la Regulación Colombiana. *Revista Semestral, CDT de Gas*.

JCGM. (2008). *Evaluation of measurement data-Guide to the expression of uncertainty in measurement*. www.bipm.org

JCGM. (2012). International vocabulary of metrology-Basic and general concepts and associated terms (VIM) 3rd edition. *BIPM*.

Model PM880 AC User's Manual. (2021).

Operating manual for Hygrovision-BL. (s. f.). *VYMPEL*. Recuperado 13 de abril de 2023, de

<https://en.vympel.group/products/gas-analyzers/hygrovision-bl/>

PM880 Panametrics portable hygrometer. (2020).

Prieto Jiménez, N., González Silva, G., & Chaves Guerrero, A. (2019). Revisión del proceso de

separación de fases del gas natural a alta presión en la industria Oil&Gas. *Entramado*,

15(1), 312-329. <https://doi.org/10.18041/1900-3803/ENTRAMADO.1.5433>

RESOLUCIÓN GREG-071 DE 1999. Reglamento Único de Transporte (RUT), Consejo

Nacional de Operación de Gas Natural (CNO-Gas) (2019).

https://www.cnogas.org.co/documentos/rut_2019.pdf

Ruiz, A., García, J., & Mesa, J. (2010). ERROR, INCERTIDUMBRE, PRECISIÓN Y

EXACTITUD, TÉRMINOS ASOCIADOS A LA CALIDAD ESPACIAL DEL DATO
GEOGRÁFICO. *Universidad de Jaén.*

Velasco, F. (1999). *ANALIZADORES DE HUMEDAD.*

VIM Vocabulario Internacional de Metrología Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados. (2012). *JCGM*, 3. <https://www.cem.es/sites/default/files/vim-cem-2012web.pdf>

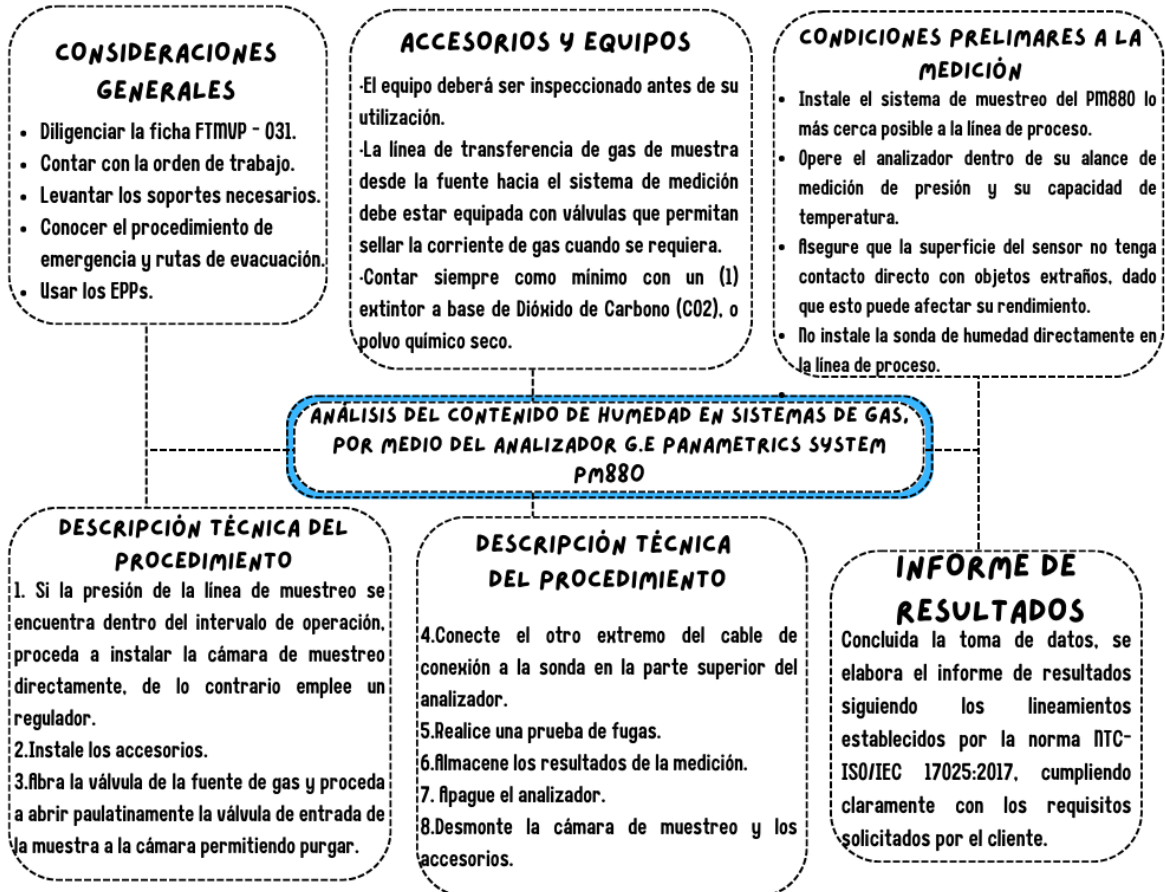
Wagner, W., & Pruß, A. (2002). The IAPWS Formulation 1995 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use. *TEOS-10*.
<http://link.aip.org/link/JPCRBU/v31/i2/p387/s1>

When Your Dew Point Measurements Matter, Choose a Chilled Mirror Hygrometer. (2021, marzo 2). INSTRUMART. <https://www.instrumart.com/blog/product-support/594/when-your-dew-point-measurements-matter-choose-a-chilled-mirror-hygrometer>

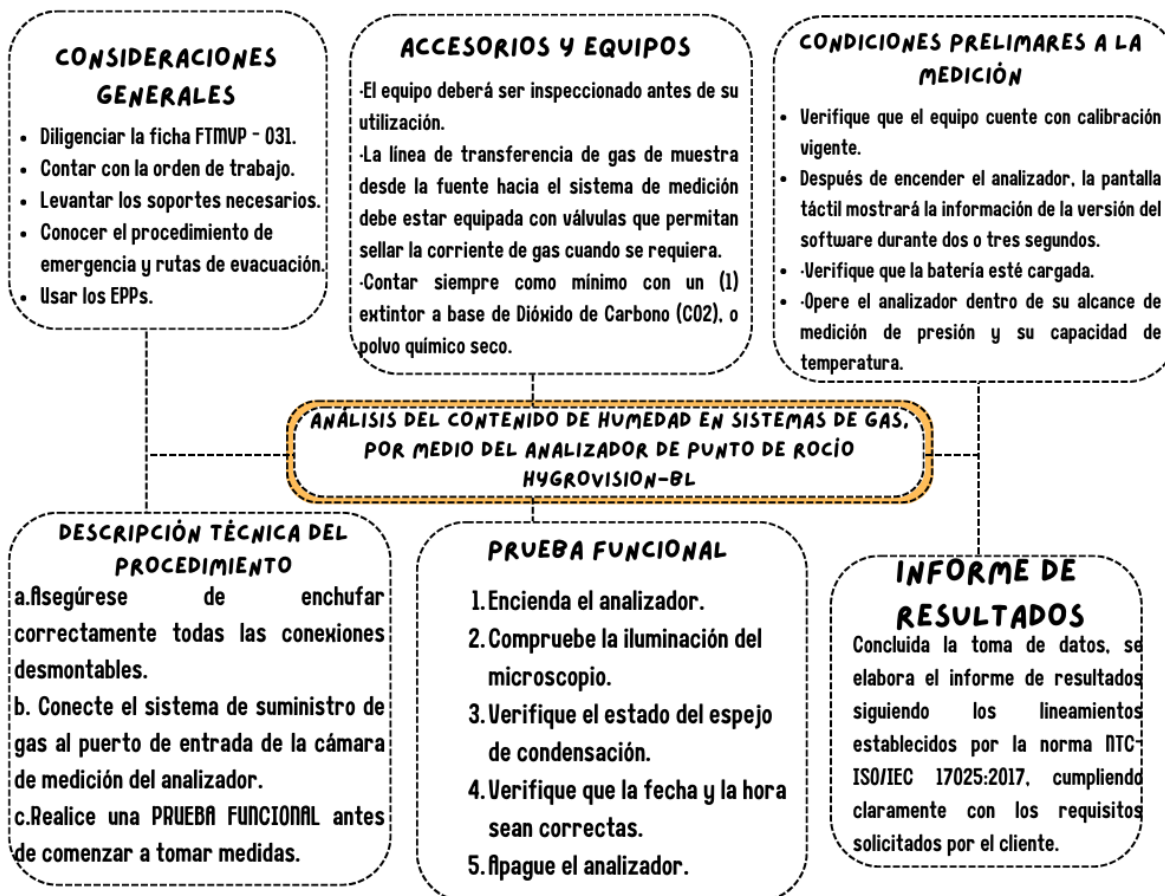
Zou, X., Huang, F., Zhang, L., & Gele, T. (2021). Discussion on Water Dew Point and Hydrocarbon Dew Point of Natural Gas. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 651(3). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/651/3/032090>

Apéndices

Apéndice A Procedimiento técnico de medición del analizador Panametrics PM880.



Apéndice B. Procedimiento técnico de medición del analizador Hygrovision-BL.



Apéndice C Vista general de las hojas de cálculo “Resultados de medición”, “Incertidumbre” y “Resumen” de Microsoft Excel.

RESULTADOS DE MEDICIÓN												
TECNOLOGÍA												
INSTRUMENTO		DESCRIPCIÓN			ID	S/N	CERT. CALIBRACIÓN					
MEDICIÓN DE HUMEDAD												
MEDICIÓN DE PRESIÓN												
DATOS DE MEDICIÓN				PROMEDIO DE MEDICIONES			INCERTIDUMBRE ORIGINAL			RESULTADO DE MEDICIÓN		
Punto de medición	Repetición (n)	Presión medida [psig]	PR H ₂ O medido [°F]	Var. Entrada	Fuente de var.	Promedio	n	U	k	$u(x_{ij})$	w [lb/MMSCF]	$\pm U(w)$ [lb/MMSCF]
1	1			P	Medición [psig]	#iDIV/0!	0			#iDIV/0!	#iVALOR!	#iDIV/0!
	2				Calibración [psig]	0,00				#iDIV/0!		
	3			T	Medición [°F]	#iDIV/0!	0			#iDIV/0!		
	4				Calibración [°F]	0,00				#iDIV/0!		
	5											
2	1			P	Medición [psig]	#iDIV/0!	0			#iDIV/0!	#iVALOR!	#iDIV/0!
	2				Calibración [psig]	0,00				#iDIV/0!		
	3			T	Medición [°F]	#iDIV/0!	0			#iDIV/0!		
	4				Precisión [°F]	0,00				#iDIV/0!		
	5											

CÁLCULO DE INCERTIDUMBRE												
INCERTIDUMBRE COMBINADA						NIVEL DE COBERTURA		GRADOS DE LIBERTAD			FACTOR DE COBERTURA	INCERT. EXPANDIDA
Punto de medición	Magnitud	$u(x_i)$	Coef. Sensib.	$u(x_i) \cdot \text{coef.}$ [lb/MMSCF]	$u_c(y)$ [lb/MMSCF]	Magnitud	p	Var. Entrada	θ_t	θ_{eff}	k	$\pm U(w)$ [lb/MMSCF]
1	P.med [psig]	#iDIV/0!	#iVALOR!	#iDIV/0!	#iDIV/0!	P.med [psig]	0,95	P.med	-1,00	#iDIV/0!	#iDIV/0!	#iDIV/0!
	P.cal [psig]					P.cal		200,00				
	T.med [°F]	#iDIV/0!	#iVALOR!	#iDIV/0!		T.med		-1,00				
	T.prec [°F]					T.prec		200,00				
2	P.med [psig]	#iDIV/0!	#iVALOR!	#iDIV/0!	#iDIV/0!	T.med	0,95	P.med	-1,00	#iDIV/0!	#iDIV/0!	#iDIV/0!
	P.cal [psig]					P.cal		200,00				
	T.med [°F]	#iDIV/0!	#iVALOR!	#iDIV/0!		T.med		-1,00				
	T.prec [°F]					T.prec		200,00				

RESUMEN DE RESULTADOS								
Tecnología/Equipo	Punto de medición	Presión Manométrica Promedio [psig]	Resultado w [lb/MMSCF]	$\pm U(w)$ [lb/MMSCF]	p (%)	k	Magnitud	Certificado de calibración
0	1	#iDIV/0!	#iDIV/0!	#iDIV/0!	95	#iDIV/0!	Presión	0
Humedad							0	
0	2	#iDIV/0!	#iDIV/0!	#iDIV/0!	95	#iDIV/0!	Presión	0
Humedad							0	

Apéndice D Código Visual Basic para el cálculo de la humedad a partir de la ecuación de Bucacek.

```
Function Wmin(P As Double, T As Double)

' P en psig, T en °F
Dim Tc As Double, Pc As Double, a1 As Double
Dim a2 As Double, a3 As Double, a4 As Double
Dim a5 As Double, a6 As Double, tao As Double
Dim Psw As Double, B As Double, W As Double
Dim Tabs As Double, Pb As Double, Tb As Double

' Pc en MPa, Tc en K
Tabs = T + 460
Pc = 22.064
Tc = 647.096
a1 = -7.85951783
a2 = 1.84408259
a3 = -11.7866497
a4 = 22.6807411
a5 = -15.9618719
a6 = 1.80122502
Tb = 60
Pb = 14.7
Tk = ((T - 32) * (5 / 9)) + 273.15

tao = 1 - (Tk / Tc)
Psw = Pc * Exp(((a1 * tao) + (a2 * ((tao) ^ (1.5)))) + _
(a3 * ((tao) ^ (3))) + (a4 * ((tao) ^ (3.5))) + (a5 * ((tao) ^ (4))) + (a6 * ((tao) ^ (7.5)))) / (1 - tao))
B = Exp(6.69447 - (3083.87 / Tabs))

Wmin = 47430 * ((Psw * 145.038) / (P + 14.7)) + B
```

Apéndice E Resumen de los resultados obtenidos por medio de los equipos disponibles de la tecnología de espejo enfriado y óxido de aluminio, respectivamente.

RESUMEN DE RESULTADOS									
Tecnología/Equipo	Punto de medición	Presión Manométrica Promedio [psig]	Tiempo de estabilización aprox. [min]	Resultado W [lb/MMSCF]	$\pm U(W)$ [lb/MMSCF]	p (%)	k	Magnitud	Certificado de calibración
ESPEJO ENFRIADO	1	59,41	59	< 5,45	---	---	---	Presión	CERT-22-EMP-955-4333
ID: TL-267 / EQ-377 S/N: D18040252								Humedad	INFC-21-OTM-033-4021
ESPEJO ENFRIADO	2	920,06	60	< 1,08	---	---	---	Presión	CERT-21-EMP-166-4020
ID: TL-267 / EQ-377 S/N: D18040252								Humedad	INFC-21-OTM-006-4021
ESPEJO ENFRIADO	3	107,91	35	5,85	0,20	95	2,36	Presión	CERT-22-EMP-954-4333
ID: TL-267 / EQ-377 S/N: D18040252								Humedad	INFC-21-OTM-032-4021

RESUMEN DE RESULTADOS									
Tecnología/Equipo	Punto de medición	Presión Manométrica Promedio [psig]	Tiempo de estabilización aprox. [min]	Resultado w [lb/MMSCF]	$\pm U(w)$ [lb/MMSCF]	p (%)	k	Magnitud	Certificado de calibración
ÓXIDO DE ALUMINIO	1	59,41	60,00	1,73	1,40	95	2,00	Presión	CERT-22-EMP-955-4333
S/N: 353100-A (Transductor) / 1420 (Indicador) ID: HL-018 (Indicador)								Humedad	INFC-21-OTM-033-4021
ÓXIDO DE ALUMINIO	2	913,68	42,00	3,36	0,18	95	2,03	Presión	CERT-21-EMP-166-4020
S/N: 177040-N (Sensor) / 1420 (Indicador); ID: HL-018 (Indicador)								Humedad	INFC-21-OTM-006-4021
ÓXIDO DE ALUMINIO	3	109,48	18,00	7,05	0,43	95	2,02	Presión	CERT-22-EMP-954-4333
S/N: 437927-PR (Transductor) / 1420 (Indicador) ID: HL-018 (Indicador)								Humedad	INFC-21-OTM-032-4021
ÓXIDO DE ALUMINIO	4	336,26	33,00	0,65	0,03	95	2,00	Presión	CERT-21-EMP-166-4020
S/N: 177040-N (Sensor) / 1420 (Indicador); ID: HL-018 (Indicador)								Humedad	INFC-21-OTM-006-4021
ÓXIDO DE ALUMINIO	5	444,24	12,00	29,78	1,62	95	2,01	Presión	CERT-21-EMP-166-4020
S/N: 177040-N (Sensor) / 1420 (Indicador); ID: HL-018 (Indicador)								Humedad	INFC-21-OTM-006-4021