

Estudio de vida útil de medidores de gas tipo diafragma de uso residencial

German José Covelli Solano

Tecnologías de captura de CO₂ en procesos de postcombustión de gas natural

Elizabeth Ayala Blanco

Fernando Martínez Ortega

Construcción de sistemas de presión en el intervalo de medio y alto vacío

Carlos Mauricio Villamizar Mora

Jonathan Javier Duarte Franco

Implementación de una red LPWAN de sensores para el monitoreo de condiciones ambientales

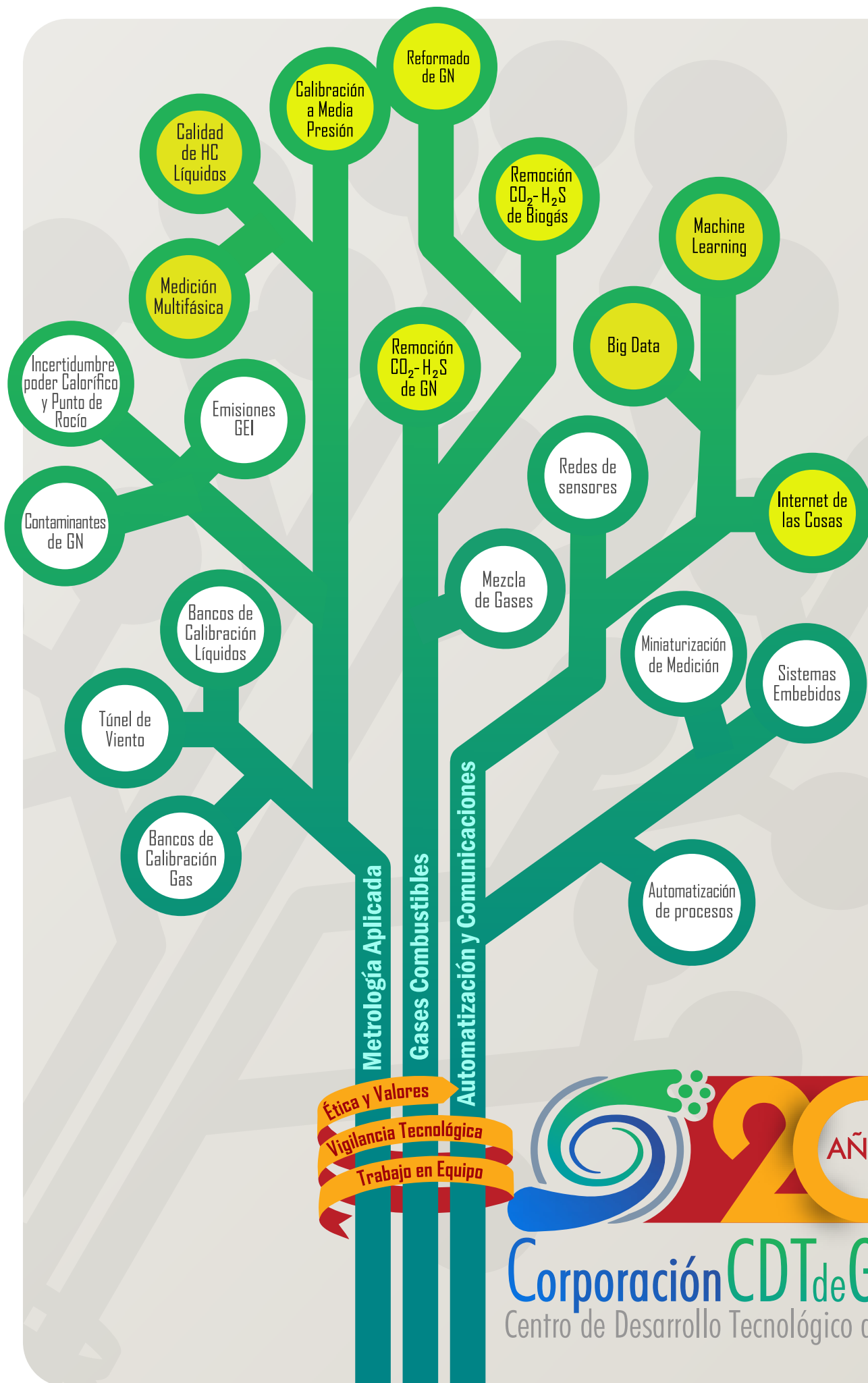
William Alexis Porras Calderón

Oscar Yazit Salah García

MET & FLU

Ciencia - Tecnología - Innovación





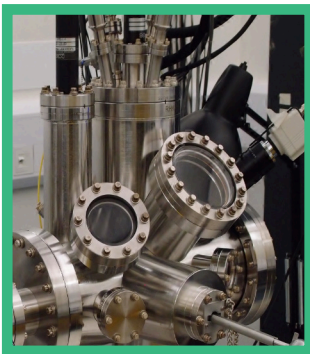


06

Estudio de vida

Útil de Medidores de Gas Tipo Diafragma de Uso Residencial

German José Covelli Solano



34

Construcción

de Sistemas de Presión en el Intervalo de Medio y Alto Vacío

Carlos Mauricio Villamizar Mora
Jonathan Javier Duarte Franco

Contenido

MET&FLU

CIENCIA - TECNOLOGÍA - INNOVACIÓN



22

Tecnologías

de Captura de CO₂ en Procesos de Postcombustión de Gas Natural

Elizabeth Ayala Blanco
Fernando Martínez Ortega



48

Implementación

de una Red LPWAN de Sensores para el Monitoreo de Condiciones Ambientales

William Alexis Porras Calderón
Oscar Yazit Salah García

Editorial

MET&FLU

>> Ciencia >> Tecnología >> Innovación

EDITOR GENERAL :

**CARLOS EDUARDO GARCÍA
SÁNCHEZ, PH.D.**

Líder del Área de Investigación y
Desarrollo Tecnológico - CDT de Gas

COMITÉ EDITORIAL :

HENRY ABRIL BLANCO

Director - CDT de Gas

JOSE AUGUSTO FUENTES M.Sc.

Gestor Técnico - CDT de Gas

LUIS EDUARDO GARCÍA SÁNCHEZ

Gerente Inline Fluid Systems

ARLEX CHAVES GUERRERO, PH.D.

Docente e Investigador - Universidad
Industrial de Santander

JUAN MANUEL ORTIZ AFANADOR

Gerente - Polygon Energy

**DIONISIO ANTONIO LAVERDE
CATAÑO, PH. D.**

Docente e Investigador - Universidad
Industrial de Santander

DISEÑADOR :

LEONARDO MANZANO PAREDES

Diseñador

Apreciados amigos lectores interesados en la metrología aplicada y demás temáticas de la revista Met&Flu:

En el año 2009, salió a circulación la primera edición de nuestra revista Met&Flu. Coincidió, en esa ocasión, con la celebración de los primeros 10 años del Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas, y hacíamos nuestras primeras referencias así: "Corporación CDT de Gas – 10 años aplicando metrología para apoyar la transformación productiva de Colombia". Quisimos compartir en ese momento con los colombianos, y con algunos amigos latinoamericanos, avances asimilados en materia de ciencia, tecnología e innovación que comenzábamos a notar relevantes para que el sector Gas Natural de Colombia apropiara y aplicara conocimientos metrológicos para el control de sus procesos. Incluimos seis secciones, en donde una sola era dedicada a la ciencia, mientras que las demás se dirigían a construir cultura metrológica, con un vocabulario comprensible, para una sociedad que apenas comenzaba a apreciar sus grandes ventajas.

Hoy, al hacer entrega a nuestros asiduos lectores de la edición número 14, de nuevo coincidimos con una celebración muy especial, porque hace 20 años, de Santander para Colombia surgió el Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas -CDT de Gas-, con el reto de convertirse en pionero de la metrología del gas en Colombia. Sin duda, hemos querido seguir compartiendo lo cosechado, porque todo se lo debemos a la capacidad innata de nuestros profesionales de asimilar conocimiento, y por supuesto, a las múltiples oportunidades que nos ha brindado el sector para convertirlo en realidades.

En este sentido habiendo consolidado durante estos 20 años la imagen del CDT de Gas en la industria nacional, y con la visión viva de proyectarlo a nivel de los países de la Región Andina, seguimos plasmando y compartiendo conocimiento y tecnología, como ahora, con artículos de alto rigor técnico, seleccionados por nuestro Editor General Carlos Eduardo García Sánchez y revisados por pares especialistas en la materia: un compartir de resultados del estudio de la vida útil de medidores de gas tipo diafragma de uso residencial, enviado por el ingeniero Germán José Covelli Solano, de Gases de Occidente de la ciudad de Cali, y con artículos propios que nos relatan experiencias muy importantes para CDT y para nuestros lectores: la construcción de sistemas que van a operar en medio y alto vacío preparado y presentado por los ingenieros Carlos Mauricio Villamizar Mora y Jonathan Javier Duarte Franco; la implementación de una red LPWAN de sensores para el monitoreo de condiciones ambientales, del cual hacen referencia los ingenieros William Alexis Porras Calderón y Oscar Yazit Salah García, y el artículo de ciencia que comparten Elizabeth Ayala Blanco del CDT de Gas y el profesor de la UIS Fernando Martínez Ortega, quienes nos comparten los resultados de investigar en tecnologías de captura de CO₂ en procesos de post-combustión de gas natural. Aprovechamos para expresar nuestro más sincero agradecimiento a los pares revisores, que en esta ocasión fueron integrantes de las universidades EAFIT, Santo Tomás, Nacional de Colombia sede Medellín y UNAB, de Polygon Energy, y del CDT de Gas.

Esperamos entonces que este número 14 de nuestra revista sea del agrado de todos los lectores, a quienes también les hacemos una cordial invitación para que redacten sus artículos y los postulen, porque el CDT de Gas continúa investigando con metrología, desarrollando con metrología e innovando con metrología, intentando hacer las cosas de una manera diferente a lo común, destacándose el aplicar el conocimiento de manera inmediata, como una forma de compartirlo para el aprovechamiento de nuestra sociedad, porque “El Conocimiento es de Todos”.



Henry Abril Blanco

Director: Corporación CDT de GAS

Estudio de Vida Útil de Medidores de Gas

Tipo Diafragma de Uso Residencial

GERMÁN J. COVELLI SOLANO

Jefatura de Aseguramiento Metrológico. germanjc@gdo.com.co
Gases de Occidente S.A. ESP., Cali, Valle del Cauca - Colombia.

RESUMEN

Según el reporte de cobertura del servicio de gas natural del cuarto trimestre de 2018 emitido por el Ministerio de Minas y Energía, Colombia cuenta con más de 9,5 millones de usuarios residenciales conectados que utilizan medidores de gas tipo diafragma para medir su consumo. Desde 1977, cuando se iniciaron las primeras conexiones residenciales en la ciudad de Barranquilla, se instalaron medidores que hoy en día pueden tener más de 35 años en operación. En este artículo se presentan los resultados del estudio experimental en laboratorio y campo, destinado a evaluar el desempeño metrológico de los medidores de gas tipo diafragma. Los resultados del análisis para los medidores probados en campo muestran que una cantidad significativa de los medidores excedió los errores máximos permisibles (EMP) definidos en las normas técnicas colombianas para verificación posterior. Por otro lado, se evidencia que la mayoría de los medidores nuevos probados experimentalmente tienen asociadas derivas negativas, es decir tienden a medir menos volumen con el paso del tiempo.

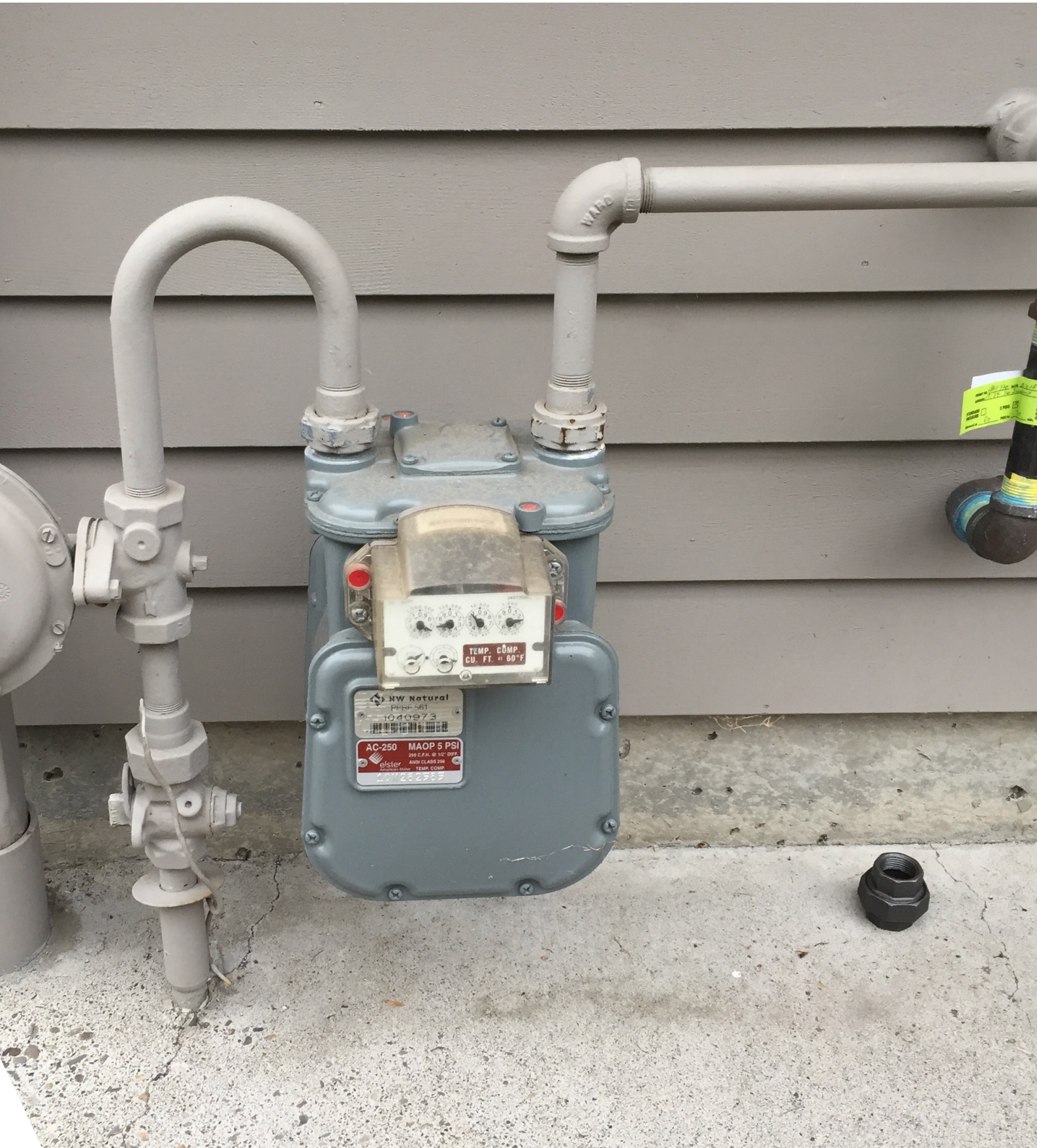
Palabras clave: *Medidor Diafragma, Desempeño Metrológico, Vida Útil, Gas Natural, Verificación Posterior, Máximos Errores Permisibles.*

ABSTRACT

According to the reported coverage of the natural gas service of the fourth quarter of 2018 issued by the Ministry of Mines and Energy, Colombia has more than 9,5 million connected residential users who use diaphragm gas meters to measure their consumption. In 1977 the first residential connections began in the city of Barranquilla, and the meters installed in that moment have been in operation for more than 35 years. This article presents the results of a experimental study in laboratory and field, aimed at evaluating the metrological performance of diaphragm gas meters. The results of the analysis for the meters tested in field show that a significant number of the meters exceeded the maximum permissible errors (EMP) defined in the Colombian technical standards. On the other hand, it is evidenced that most of the new experimentally tested meters have negative drifts associated, that is, they tend to measure less volume over time.

Keywords: *Diaphragm meter, metrological performance, shelf life, natural gas, subsequent verification, maximum permissible errors.*





1 INTRODUCCIÓN

En 1977 se comenzó a suministrar gas natural domiciliario en Barranquilla a través de la primera conexión otorgada por el Ministerio de Minas y Energía a la distribuidora Gases del Caribe S.A. Lo anterior estuvo ligado a la necesidad de cuantificar el volumen de gas en cada uno de los hogares que se conectaban, lo que conllevó la instalación de medidores de gas. Hoy en día, existen más de 9 millones de usuarios de gas natural de tipo residencial conectados en todo el país [1], los cuales tienen medidores de gas tipo diafragma para medir su consumo, algunos de ellos con más de 35 años de servicio.

Es importante que los usuarios reciban facturas “exactas” por la cantidad de gas que consumen en sus hogares, un equipo de medición que se encuentre dentro de los requerimientos metrológicos permitidos es la clave para garantizar que se reciba una facturación confiable.

Dentro de la enorme variedad de tecnologías que existen para medir volumen de gas, los medidores de desplazamiento positivo tipo diafragma se han caracterizado por su instalación masiva (inclusive sobre las tecnologías emergentes con principio de medición ultrasónico), dentro de las principales razones que han favorecido su popularidad se encuentran: su bajo costo, la alta relación máximo/mínimo (“rangeabilidad”) y requerimientos de instalación simples, entre otros.

Actualmente algunos fabricantes de medidores de gas tipo diafragma estipulan un tiempo de vida útil de diez (10) años [2], alineados con las recomendaciones de la OIML R31 [3] y pruebas de durabilidad mecánica realizadas sobre los medidores. Sin embargo, el periodo de validez

legal de un medidor debe ser determinado por las autoridades de cada país.

En Colombia, no existe un lineamiento claro que defina periodo de validez de un medidor de gas tipo diafragma. No obstante, la NTC 2728 [4] (adopción modificada (MOD) por redacción de la norma OIML R31:1995) establecen lineamientos para la aprobación de modelo, la verificación inicial, verificación posterior. Dicha norma describe que si los medidores se someten a verificación posterior, se recomienda aplicar los límites de error en servicio. En este mismo numeral, se establece un intervalo de tiempo entre verificaciones de como máximo cinco (5) años (la OIML R31 recomienda 10 años).

Es claro entonces que al terminar el periodo de validez legal de un medidor se debe realizar la verificación posterior, ya sea para cada medidor de forma individual o usando métodos estadísticos. Una vez se obtengan los resultados, estos se comparan con los Errores Máximos Permisibles (EMP). Si el medidor cumple se podría extender el periodo de validez, y si el medidor no cumple se deberían tomar las acciones que garanticen una medición confiable.

Para validar el desempeño metrológico de los medidores de gas tipo diafragma instalados en la red de distribución de Gases de Occidente S.A. E.S.P. (GdO S.A. E.S.P.), se realizó un estudio de vida útil de medidores nuevos y usados, de algunas marcas instaladas y/o que potencialmente pueden ser instaladas en la red de distribución de GdO S.A. E.S.P.

El artículo presenta los resultados obtenidos al someter los medidores nuevos a ensayo de durabilidad y los usados a verificación posterior. Con lo anterior se busca proporcionar infor-

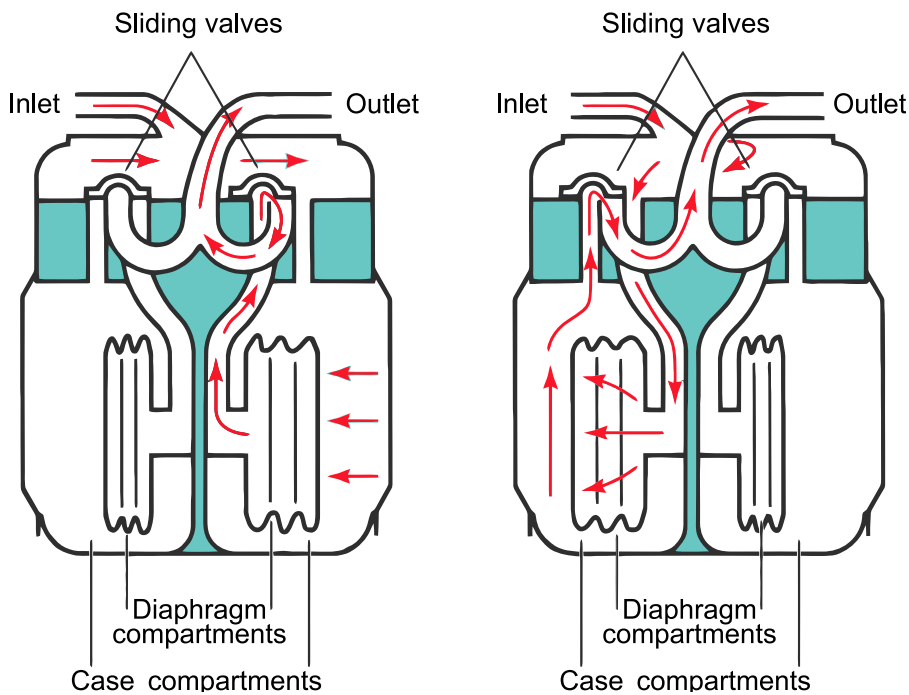


Figura 1. >> Principio de operación de un medidor tipo diafragma. Fuente: American Meter Company.

mación técnica a las diferentes compañías distribuidoras de gas sobre el posible desempeño metrológico de medidores tipo diafragma de uso residencial a lo largo de su vida útil.

2 EL MEDIDOR TIPO DIAFRAGMA

2.1 HISTORIA

Los medidores de diafragma encuentran sus raíces en el medidor de desplazamiento positivo de tipo húmedo desarrollado por Samuel Clegg a mediados de 1815 [5], quien después de mejorarlo, lo patentó como “New hydraulic gas meter”. En 1844, William Richards y el Sr. Croll patentaron el medidor de desplazamiento seco. Su medidor tenía dos diafragmas móviles, dos válvulas deslizantes y un índice dial. Thomas Glover mejoró el diseño, este medidor llegó a conocerse como “Glover two-diaphragm”. El diseño del medidor básico del Sr. Glover todavía

está en uso hoy en día.

Antes de 1990 se utilizaban medidores de gas con diafragma de origen natural, que generan errores significativos debido a la disminución del rendimiento del diafragma por el propio desgaste. Después de 1990 los diafragmas naturales fueron reemplazados por sintéticos, esperando que fueran más resistentes al desgaste, garantizando entonces un funcionamiento metrológico más estable.

Los medidores de gas tipo diafragma fabricados hoy representan más de 125 años de evolución del diseño (ver Figura 2). Las mejoras tecnológicas en los campos de fundición de aluminio, metalurgia en polvo, ingeniería plástica, diseño de sellos y los avances realizados en otros campos de la ingeniería como la electrónica y los sistemas de comunicación se han incorporado en los medidores más avanzados.

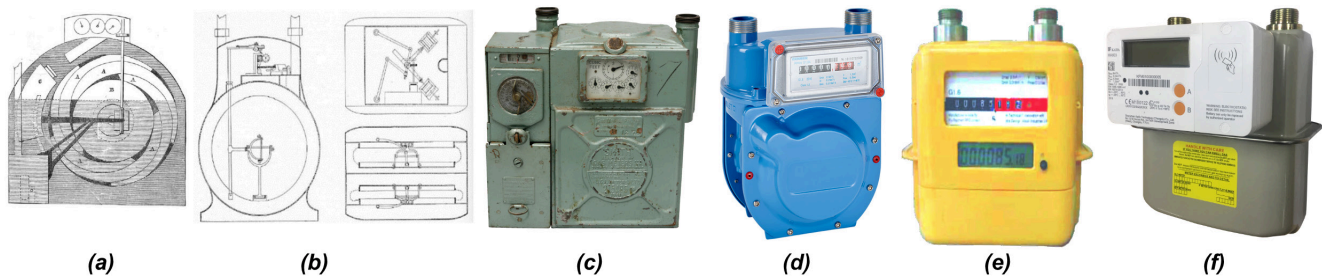


Figura 2. >> Evolución del medidor tipo diafragma: (a) Medidor cámara húmeda Samuel Clegg. (b) Medidor Richards y Croll. (c) Medidor Glover. (d) Medidor convencional [6]. (e) Medidor con odómetro digital [7]. (f) Medidor con antena de comunicación para transmisión de datos [8].

2.2 PRINCIPIO DE OPERACIÓN

Los medidores de desplazamiento positivo operan llenando y vaciando una o más cámaras de volumen definido, siguiendo una secuencia regular (cíclica). El gas que fluye dentro del medidor llena el espacio interior de la carcasa y pasa hacia el lado abierto donde se encuentran las válvulas deslizantes de uno de los lados de la cámara de medición, el otro lado se encuentra conectado a la salida.

Las cámaras de medición se encuentran separadas por diafragmas y éstas a su vez son controladas por válvulas deslizantes. Durante la operación, la acción de una de las válvulas de la cámara provoca la acción de la válvula de la otra cámara de medición, cada una de las cámaras posee un volumen fijo definido. Por medio de acoplamientos de barras (eslabonamientos) los movimientos del diafragma son convertidos en movimientos rotativos a un cigüeñal (eje transmisor). El movimiento rotativo se transmite a un indicador de carátula que totaliza el volumen de gas que ha pasado a través del medidor.

2.3 DESEMPEÑO METROLÓGICO

El medidor de diafragma se caracteriza por presentar alto error de medición (de signo negativo – tendencia a indicar menos volumen del real) a caudales bajos, cerca de su límite de operación

inferior (Q_{\min}).

Existe una zona intermedia con un comportamiento óptimo (lineal), con error bajo y una tercera zona cerca del límite de operación superior (caudal máximo o Q_{\max}) donde el error empieza a aumentar nuevamente. En la Tabla 1 se pueden apreciar los EMP según la Norma Técnica Colombiana NTC 2728 [4].

Tabla 1. >> Errores máximos permisibles para medidores de gas tipo diafragma – NTC 2728 [4].

CAUDAL	MÁXIMOS ERRORES PERMITIDOS	
	VERIFICACIÓN INICIAL	EN SERVICIO
$Q_{\minimo} \leq Q < 0,1 Q_{\maximo}$	$\pm 3 \%$	$- 6 \%$ $+ 3 \%$
$0,1 Q_{\maximo} \leq Q < Q_{\maximo}$	$\pm 1,5 \%$	$\pm 3 \%$

La OIML R 137 [9] establece los EMP de los medidores de gas acorde con clases de exactitud (ver Tabla 2), estos EMP se pueden aplicar como criterio de aceptación en verificaciones iniciales o evaluación de modelo, para verificación posterior no está definida la aplicación de este criterio.

Tabla 2. >> EMP para medidores de gas en verificación inicial – OIML R137 [9].

FLOW RATE Q	DURING TYPE EVALUATION AND INITIAL VERIFICATION		
	ACCURACY CLASS		
	0.5	1	1.5
$Q_{min} \leq Q < Q_t$	$\pm 1 \%$	$\pm 2 \%$	$\pm 3 \%$
$Q_t \leq Q \leq Q_{max}$	$\pm 0,5 \%$	$\pm 1 \%$	$\pm 1,5 \%$

2.4 CAÍDA DE PRESIÓN

Un medidor de diafragma presenta una caída de presión proporcional al caudal que fluye por sus conexiones, la NTC 2728 [4] establece las caídas de presión máximas permitidas (ver Tabla 4), definiendo así criterios de diseño y desempeño claros, en especial para los reguladores de presión (aguas arriba) y los equipos o accesorios localizados aguas abajo del medidor.

Tabla 3. >> WME permisible para medidores de gas – OIML R137 [9].

CAUDAL Q	DURANTE LA EVALUACIÓN DE MODELO Y VERIFICACIÓN INICIAL		
	CLASE DE EXACTITUD		
	0.5	1	1.5
WME	$\pm 0,2$	$\pm 0,4$	$\pm 0,6$

Tabla 4. >> Caídas de presión permisibles para medidores de gas tipo diafragma – NTC 2728 [4].

$Q_{máximo}$ [m ³ /h]	Valores máximos permitidos en caída de presión por el medidor	
	Medidor nuevo Pa	Medidor en servicio Pa
1 hasta 10 inclusive	200	220
16 hasta 65 inclusive	300	330
100 hasta 1 000 inclusive	400	440

3 DISEÑO DEL EXPERIMENTO

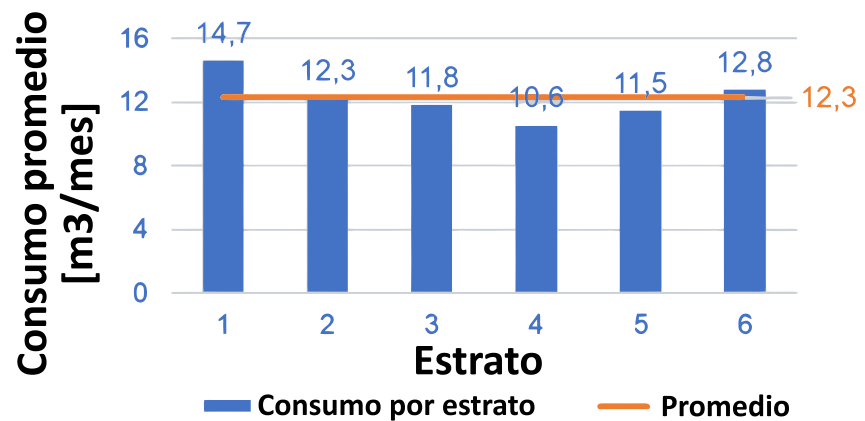
3.1 MEDIDORES NUEVOS

3.1.1 SELECCIÓN DE MEDIDORES Y MUESTRA

El principal objetivo de esta fase fue seleccionar diferentes marcas de medidores de gas tipo diafragma en las denominaciones que se utilizan en la red de GdO S.A. E.S.P: G1.6 ($Q_{max} = 2,5$ m³/h), G2.5 ($Q_{max} = 4,0$ m³/h) y G4.0 ($Q_{max} = 6,0$ m³/h), para lo cual se contactaron los principales fabricantes y proveedores de medidores de gas presentes en el país. Se logró la participación de 7 modelos G1.6, 4 modelos G2.5 y 3 modelos G4.0. Sin embargo, teniendo en cuenta que más del 98% de los medidores instalados corresponden a la designación G1.6, se delimitó el alcance de este estudio solo a dicha designación.

El proceso de selección de la muestra se realizó acorde con numeral 7.2.3.1 de la NTC 2728 [4] y la NTC 2859 [10], para lo cual cada fabricante dispuso de un lote de medidores nuevos, de este lote fue seleccionada de manera aleatoria la

Figura 3. >> Promedio de consumos por estratos para la ciudad analizada.



muestra. En total se colectaron 35 medidores (5 por cada modelo presentado).

3.1.2 MÉTODO DE ENSAYO

El ensayo de durabilidad consiste en establecer una línea base de errores del medidor a diferentes caudales. Luego, someter el medidor a un flujo de gas continuo durante un período de tiempo y a unas condiciones determinadas, para posteriormente determinar nuevamente los errores y compararlos contra los errores iniciales, evaluando los criterios de desempeño definidos. Adicionalmente, se verifica que los errores obtenidos antes y después del ensayo de durabilidad se encuentren dentro de los EMP descritos en la NTC 2728 [4].

3.1.3 TIEMPO DE SIMULACIÓN

Teniendo en cuenta las estadísticas de consumo residencial de 7 meses (06/2017 a 02/2018) para una de las principales ciudades del Valle del Cauca, en la cual GdO S.A. E.S.P. distribuye gas natural residencial, se determinó un consumo promedio de 12,3 m³/mes.

Lo anterior permitió determinar un posible consumo de volumen de gas por medidor de aproximadamente 1476 m³ en 10 años, es decir que se simularía un consumo de 10 años en aproxi-

madamente 738 horas a un caudal de 2 m³/h acorde con OIML R 137 [9] ($0,8 Q_{\max}$ para medidores sometidos a ensayo de durabilidad).

Para simular el consumo de 10 años, correspondiente al periodo de validez reportado en la OIML R31 [3], se requieren 736 horas, por lo tanto, se adoptó como primera evaluación el ensayo de durabilidad acelerada de la norma mexicana NOM-014-SCFI-1997. Cumplido el tiempo del ensayo de durabilidad, se definieron periodos de verificación posterior cada 360 horas (simulando 5 años de operación). Se verificaron los EMP en Q_{\min} , $0,2Q_{\max}$ y Q_{\max} hasta completar un tiempo de simulación de 30 años, equivalente a 2160 horas.

Tabla 5. >> Tiempos y volúmenes simulados para medidores en Laboratorio – Caudal de prueba 2 m³/h.

Tiempo de prueba horas	Tiempo de operación simulado años	Volumen simulado m³
0	0	0
720	10	1440
1080	15	2160
1440	20	2880
1800	25	3600
2160	30	4320

3.1.4 INFRAESTRUCTURA METROLÓGICA PARA

EL ENSAYO

Para el ensayo de durabilidad se acondicionó una infraestructura para instalar los 35 medidores de gas al mismo tiempo en un cuarto de condiciones ambientales de temperatura y humedad controladas. Como fluido de ensayo se usó aire a presión regulada proveniente de un compresor.

3.2 MEDIDORES USADOS

Desde un punto de vista técnico, determinar el desempeño metrológico de medidores de gas instalados en una red de distribución es algo complejo, debido a que existen factores que

pueden afectar el desempeño metrológico durante su vida útil, como lo son: (i) la calidad de fabricación, (ii) el tiempo de operación, (iii) el consumo promedio del medidor, (iv) el entorno de instalación del medidor, y (v) la correcta selección del medidor, entre otras.

Para nuestro proceso, la selección de la muestra tuvo en cuenta los siguientes criterios:

- (a) Año de instalación: los medidores seleccionados deben tener más de 5 años desde su instalación. Adicionalmente, la muestra debe contener medidores de



Figura 4. >> Medidores en ensayo de durabilidad.



Figura 5. >> Medidores en calibración – Banco B-SONiC con patrones tipo boquillas sónicas. Acreditación 10-LAC-060 del Organismo Nacional de Acreditación – ONAC.

Figura 6. >> Medidores en verificación posterior – Patrones volumétricos calibrados en Laboratorio Acreditado ONAC.



- diferentes edades.
- (b) Modelo del medidor: el tamaño del medidor debe corresponder con la designación G1.6 de tal manera que concuerde con la definida para el estudio experimental en laboratorio.
- (c) El ciclo de facturación: por cuestiones de logística, se definió un solo ciclo de facturación sobre el cual se realizaría la selección de la muestra.

Lo anterior permitió obtener un lote de 9735 me-

didores, de los cuales se seleccionó de manera aleatoria una muestra de 289 medidores, en cinco (5) marcas diferentes y con tiempos de operación desde 6 hasta 19 años desde su instalación.

Para determinar los errores de cada uno de los medidores, se llevó a cabo la calibración in situ (ver Figura 6), utilizando un medidor volumétrico como patrón de referencia. Los medidores de referencia fueron calibrados en laboratorio acreditado por ONAC, logrando una incertidum-

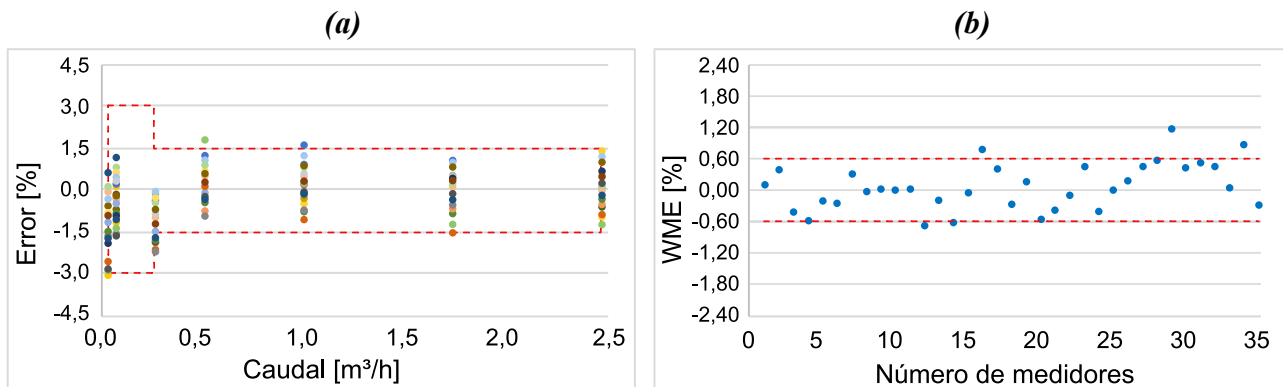


Figura 7. >> (a) Errores de los medidores antes del ensayo de durabilidad. (b) WME calculado a partir de Q_{min} , $0,2Q_{max}$ y Q_{max} .

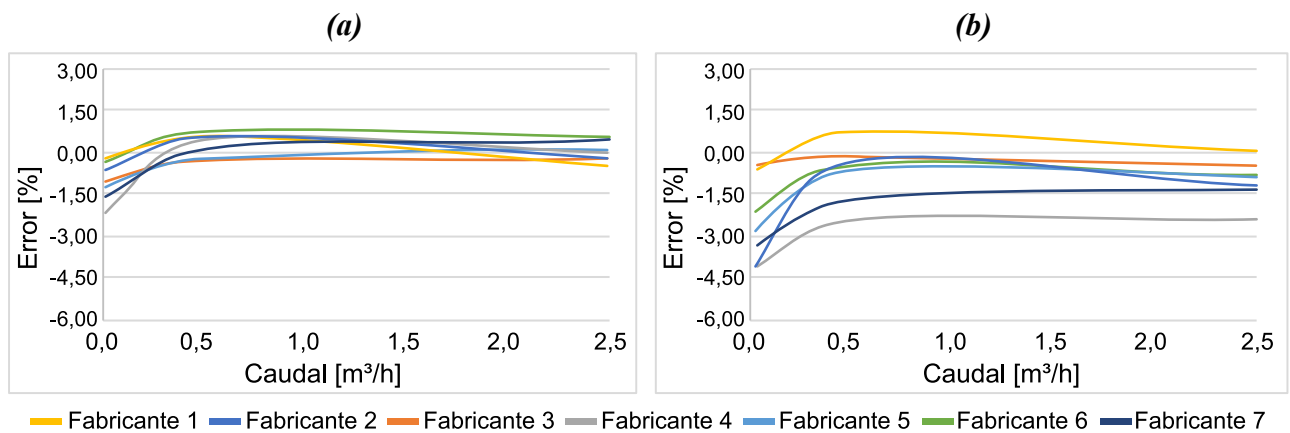


Figura 8. >> Errores promedio por fabricante: (a) antes del ensayo de durabilidad. (b) después del ensayo de durabilidad.

bre de calibración in situ del orden de 0,73 % con un nivel de confianza del 95% ($k = 2$). De igual manera, para aquellos medidores que fueron encontrados fuera de los EMP se realizó un proceso de confirmación mediante calibración en laboratorio acreditado por ONAC.

4 RESULTADOS

4.1 MEDIDORES NUEVOS

El error de indicación para cada uno de los me-

didores de la muestra fue determinado en los caudales: Q_{\min} , $3Q_{\min}$, $0,1Q_{\max}$, $0,2Q_{\max}$, $0,4 Q_{\max}$, $0,7Q_{\max}$ y Q_{\max} acorde con la NTC 2728 [3], antes y después del ensayo de durabilidad acelerada.

Así mismo, para evidenciar el error promedio que puede llegar a tener un medidor tipo diafragma, para la verificación inicial se calculó el error medio ponderado (WME), que es determinado en función de los caudales de prueba y los errores porcentuales, de acuerdo con siguiente ecuación:

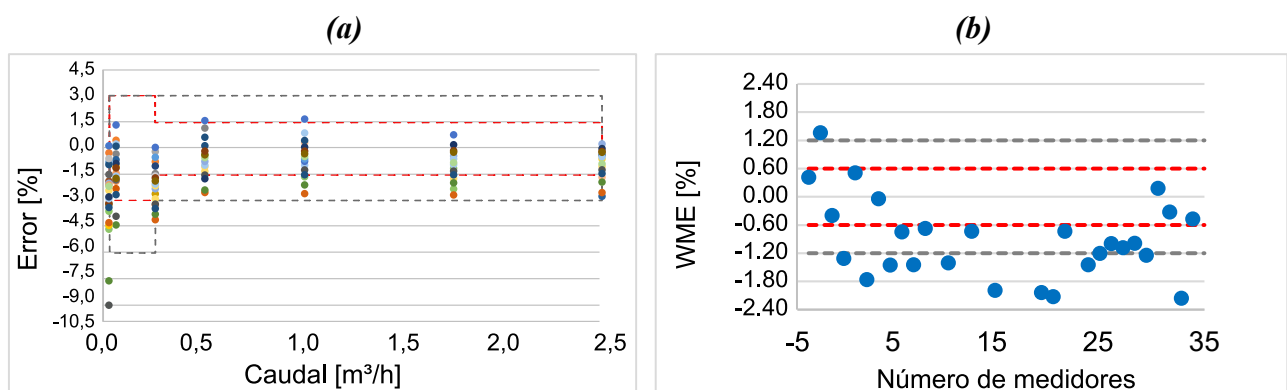


Figura 9. >> (a) Errores de los medidores después del ensayo de durabilidad acelerada 720 horas. (b) WME.

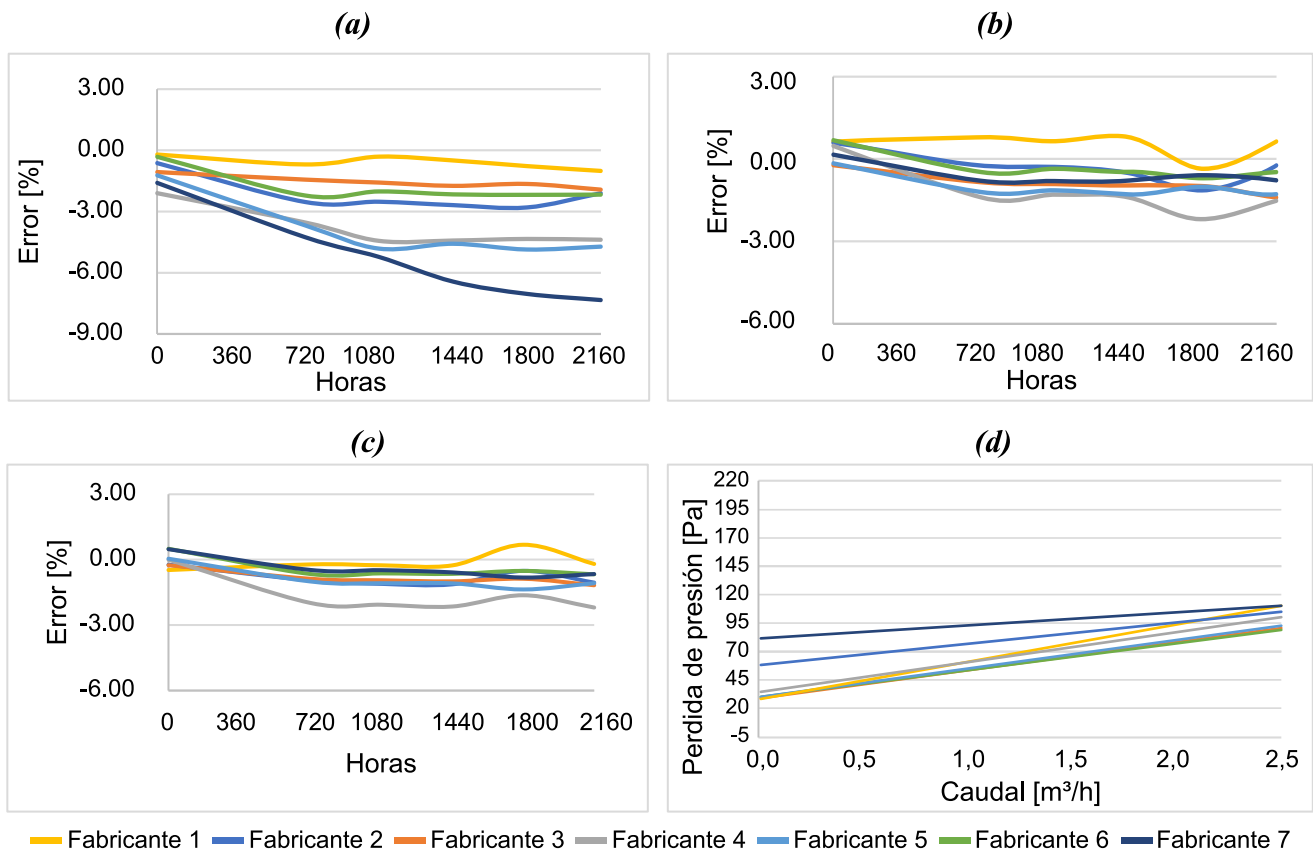


Figura 10. >> Promedio de los errores (a) en Q_{min} , (b) en $0,2Q_{max}$ y (c) en Q_{max} , desde la verificación inicial hasta 2160 horas de prueba. (d) Caída de presión en los caudales Q_{min} y Q_{max} después de durabilidad.

$$WME = \frac{\sum_{i=1}^n k_i E_i}{\sum_{i=1}^n k_i} \quad \text{Ecuación 1}$$

Con:

$$k_i = Q_i / Q_{max} \quad \text{para } Q_i \leq 0,7 Q_{max}$$

$$k_i = 1,4 - Q_i / Q_{max} \quad \text{para } 0,7Q_{max} < Q_i \leq Q_{max}$$

donde:

k_i = factor de ponderación al caudal Q_i ;

E_i = el error al caudal Q_i .

La deriva promedio en cada uno de los caudales se calculó con la siguiente ecuación:

$$\text{Deriva} = \text{Error}_{720h} - \text{Error}_{0h} \quad \text{Ecuación 2}$$

En la Figura 7-a se presentan los resultados de las calibraciones iniciales realizadas para cada uno de los medidores. La verificación de los EMP determinó que el 28% de los medidores evaluados estuvieron por fuera de los límites permisibles, principalmente en el caudal de transición ($0,1Q_{max}$). En la Figura 7-b se observa que el 17% de los medidores evaluados se encuentran por fuera del WME permisible. Adicionalmente, el 40% presentaron un WME negativo, es decir miden menos volumen.

En la Figura 8-a y b se presentan los resultados de los errores promedio agrupados por fabricante, antes y después del ensayo de durabilidad (720 horas). Se observa que los errores

promedio en 6 de los 7 fabricantes (31 de los 35 medidores evaluados) tuvieron una deriva negativa, es decir que tienden a medir menos volumen con el paso del tiempo.

En la Figura 9-a se presentan los resultados de las calibraciones realizadas (después del ensayo de durabilidad) para cada uno de los medidores. La verificación de los EMP determinó que el 20% de los medidores evaluados estuvieron por fuera de los límites permisibles. Se evidenció que la mayor deriva del error se presentó en el Q_{\min} .

En la Figura 9-b se observa que, si en un caso hipotético se evaluará el WME en verificación posterior y asumiendo que corresponde a dos veces el valor permisible en verificación inicial, el 60% de los medidores se encontrarían por fuera del WME permisible (asumiendo una tolerancia máxima de dos veces el WME inicial). En esta evaluación, el 91% de los medidores presentaron un WME con valor negativo.

La Figura 10-a, b y c, muestra los promedios

de los errores de los medidores sometidos a ensayo, agrupados por fabricante y caudal de prueba. Se observa nuevamente que se produce un error promedio negativo para los caudales analizados, es decir que el error promedio aumenta a medida que aumentan las horas de operación del medidor, siendo la condición más crítica la presentada en Q_{\min} , en donde se presenta la mayor variación del error con el paso del tiempo. La Figura 10-d presenta la pérdida de presión en Q_{\min} y Q_{\max} de los medidores durante la calibración realizada a las 2160 horas. En la Tabla 6 se presentan las derivas del error promedio agrupado por cada fabricante evaluado en la calibración de las 720 horas. Esta desviación fue calculada a partir del promedio de los errores de los medidores por cada caudal de calibración.

4.2 MEDIDORES USADOS

Los medidores usados fueron calibrados en caudal de $0,2Q_{\max}$. Los resultados del proceso de verificación posterior se presentan a continuación. La Tabla 7 muestra los resultados agrupa-

Tabla 6. >> Deriva promedio de los medidores por fabricante después de 720 horas.

Fabricante	Deriva promedio						
	Q_{\min}	$3Q_{\min}$	$0,1Q_{\max}$	$0,2Q_{\max}$	$0,4Q_{\max}$	$0,7Q_{\max}$	Q_{\max}
1	-0,486	0,036	0,286	0,180	0,280	0,224	0,258
2	-1,906	-0,964	-1,07	-0,842	-0,760	-0,686	-0,718
3	-0,37	-0,668	-0,636	-0,578	-0,468	-0,586	-0,620
4	-1,436	-1,096	-1,62	-1,842	-1,348	-1,504	-1,982
5	-2,454	-1,468	-1,098	-1,026	-0,922	-0,986	-1,044
6	-1,898	-1,622	-1,442	-1,286	-1,254	-1,160	-1,158
7	-2,662	-1,162	-0,962	-0,876	-0,822	-0,868	-0,951

Tabla 7. >> Resultados de la verificación posterior agrupados por edad de los medidores.

Grupo	Edad de los medidores [años]		Número de medidores verificados	Resultados obtenidos			
				Promedio de error [%]	Conformes	No conformes	Con fuga
A	6	a 9	122	-0,69	120	2	0
B	10	a 14	111	0,23	103	6	2
C	15	a 19	56	0,61	33	18	5

Tabla 8. >> Resultados de la verificación posterior agrupados por fabricantes.

Fabricante	Número de medidores verificados	Resultados obtenidos					
		Promedio de error [%]	Errores negativos	Errores positivos	Conformes	No conformes	Con fuga
Fabricante 1	199	1,02	55	139	177	17	5
Fabricante 2	13	-0,63	9	2	11	0	2
Fabricante 3	2	4,67	1	1	1	1	0
Fabricante 4	58	-1,38	48	10	52	6	0
Fabricante 5	17	1,17	5	12	15	2	0

dos por edad de los medidores. Se observa que para los medidores del grupo A (los de menor edad), del total de medidores verificados, el 2% fue evaluado como no conforme, para los medidores del grupo B el 7% y para los medidores del grupo C el 41%.

La Tabla 8 contiene los resultados agrupados por fabricante. Para el Fabricante 1 el 70% de los medidores verificados presentó error positivo. Por otra parte, para el Fabricante 4 el 83% de los medidores presentó error negativo. Lo anterior es congruente con los errores promedios obtenidos de +1,02% y -1,38% respectivamente.

5 CONCLUSIONES

Se evidenció que los errores promedio para los medidores ensayados en laboratorio describen la curva de error típica de la tecnología, con una tendencia a tener errores negativos entre Q_{\min} y $3Q_{\min}$, y errores lineales: positivos entre el $0,2Q_{\max}$ y $0,4Q_{\max}$ y cercanos a cero entre $0,7Q_{\max}$ y Q_{\max} .

Los resultados de las pruebas realizadas en laboratorio para medidores nuevos muestran que el error medio ponderado (calculado en la verificación inicial a partir de los 3 caudales de prueba) es muy cercano a cero. Sin embargo, asumiendo el concepto hipotético de comparación para los medidores después del ensayo de

durabilidad acelerada (720 horas), el WME fue de -1,36%, lo anterior se puede traducir en una tendencia del medidor a medir menos volumen de gas a favor del usuario.

Se evidenció que una parte de los medidores ensayados en verificación inicial no cumple con los EMP definidos en la NTC 2728, principalmente en $0,1Q_{max}$, $0,2 Q_{max}$ y $0,4Q_{max}$.

Para el ensayo de medidores nuevos, se evidenció que la mayor deriva del error ocurre en Q_{min} .

En el ensayo de durabilidad acelerada, todos los medidores cumplieron con la caída de presión permisible. Después de las 1080 horas, uno de los medidores sobrepasó los 220 Pa y después sufrió bloqueo mecánico.

Los resultados de las verificaciones posteriores muestran que para los medidores con más de 15 años de operación (grupo C) se encontró que el 41% estuvo por fuera de los EMP. Para medidores entre 10 y 15 años (grupo B) el 7% y para medidores entre 5 y 10 años (grupo A) el 2%.

El Fabricante 1 y el Fabricante 4 representan el 88,9% de los medidores verificados. Para el primero, el error promedio fue positivo. Para el segundo, el error promedio fue negativo. Estas tendencias se presentaron en la verificación realizada tanto en laboratorio como in situ.

En total se verificaron 289 medidores, de los cuales 256 fueron declarados conformes, es decir un 88,6% del total. Un total de 33 medidores fueron declarados como no conformes, lo que corresponde al 11,4%. De los 33 declarados como no conformes 7 se encontraron con fuga en el cuerpo del medidor.

La NTC 2728 no establece el periodo de validez legal de un medidor, solo hace referencia al intervalo de tiempo entre verificaciones posteriores. Esta misma referencia recomienda para la verificación posterior al final del periodo de validez, que el medidor pueda evaluarse con los límites de error de la verificación inicial (ver Tabla 1) si se va a volver a instalar en la red para un nuevo periodo. Por otra parte, la OIML R137-1 presenta los EMP para verificación posterior, dejando claro que la autoridad nacional puede decidir qué errores máximos permisibles para la verificación posterior o en servicio se implementan.

Los resultados presentados en este estudio permiten concluir que es necesario mantener un adecuado control metrológico en los medidores nuevos y en los medidores en servicio a través de procesos como la verificación inicial y la verificación posterior, en favor de la protección tanto del usuario como de la distribuidora, garantizando de esta manera mediciones y equipos de medida confiables.

6. REFERENCIAS

- [1] Ministerio de Minas y Energía "Cobertura del servicio de gas natural – I trimestre de 2018", Fecha de consulta: 27 de julio de 2018.
https://www.minminas.gov.co/documents/10192/23981020/190618_reporte_consolidado_GN_2018_i.pdf/73996f2f-f3a7-4d90-abad-2f0dc3de0024
- [2] GDO S.A. ESP "Aceptación de Modelo de Medidores". Certificados AMM-001-2018,

- AMM-002-2018, AMM-002-2019, AMM-004-2019.
- [3] OIML R31 "Diaphragm gas meters", 1995.
- [4] ICONTEC. NTC 2728 "Medidores de Gas Tipo Diafragma", 2005.
- [5] Monica Sabina Crainic. S.C. AEM S.A., Research Department "A short history of diaphragm gas meters". Part 1 "Description of the prior art". ROMANIA 15-16 April 2010, page 172-188.
- [6] Metrex S.A. "Medidor para gas G1.6 tipo diafragma" Fecha de consulta: 30 de julio de 2018.
<http://www.metrex.com.co/photo/show/title/icontec-ntc-3727/src/@random50af8e3ad3c5e>
- [7] Zhejiang Cangnan Instrument Group CO. LTD. "Diaphragm Gas Meter". Fecha de consulta: 30 de julio de 2018.
http://www.zjcnyb.cn/en/products_inner_112.html
- [8] HONEYWELL "Thermis-Alpha". Fecha de consulta: 30 de julio de 2018.
[https://www.elster-instromet.com/en/product-details/1174/en/themis-alpha?fid=F032EA0A896F40B486350FF21BE30E5E#sbox0=;](https://www.elster-instromet.com/en/product-details/1174/en/themis-alpha?fid=F032EA0A896F40B486350FF21BE30E5E#sbox0=)
- [9] OIML R137 "Gas Meter". Part 1: "Metrological and technical requirements"; Part 2: "Metrological controls and performance tests", 2012
- [10] ICONTEC. NTC 2859 "Procedimientos de muestreo para inspección por atributos", 2007.
- [11] NOM-014-SCFI-1997 "Medidores de desplazamiento positivo tipo diafragma para gas natural o L.P. con capacidad máxima de 16 m³/h con caída de presión máxima de 200 Pa".



CDT de GAS contribuye con el cuidado del medio ambiente, como responsabilidad social, con los servicios especializados de detección óptica de gases (OGI) que buscan mejorar la seguridad industrial y asegurar el cumplimiento de la normatividad ambiental vigente, en instalaciones operativas con la mejor alternativa tecnológica para la detección de fugas de gases y la experiencia demostrada en plantas de producción de OIL & GAS y sistemas de transporte y distribución de gas natural.

Características de la tecnología disponible:

- Detección de fugas y venteos de más de 400 compuestos orgánicos volátiles, incluyendo metano, propano, butano, pentano, aromáticos, alcoholes, BTEX entre otros, de una forma rápida, segura y no intrusiva
- Tecnología intrínsecamente segura - apta para atmósferas peligrosas (Clase 1 Div. 2)
- Generación de evidencias fotográficas y de video de fugas para la implementación y seguimiento de programas LDAR

Beneficios:

- Mejora del desempeño ambiental reduciendo la emisión de gases de efecto invernadero como el metano
- Reducción de pérdidas de gas natural y otros hidrocarburos gaseosos para mejora del control de los balances
- Asegurar la gestión de fugas en las instalaciones operativas en torno a la seguridad de personas e instalaciones.



Tecnologías de captura de CO₂ en procesos de postcombustión de gas natural

Elizabeth Ayala Blanco^{*1}, Fernando Martínez Ortega²

1. Grupo de Investigación en Fluidos y Energía (GIFE). Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico de Gas. Parque Tecnológico UIS Guatiguará. Km 2 vía El Refugio. Piedecuesta, Santander, Colombia.
2. Centro de Investigación en Catálisis (CICAT). Escuela de Química, Universidad Industrial de Santander. Ciudad Universitaria, Cra 27 Calle 9, Bucaramanga, Santander, Colombia
*eayala@cdtdegas.com

RESUMEN

El desarrollo de tecnologías de captura de CO₂ en procesos de postcombustión ha sido impulsado por organismos nacionales e internacionales como una estrategia para la mitigación del cambio climático como desarrollo económico. La captura se perfila como una de las pocas tecnologías que permitirá a las industrias como la del acero, el hierro, el cemento, procesamiento de gas natural y refinerías, cumplir con los objetivos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

Aquí se presenta una visión global y divulgativa del estado del arte de las diferentes tecnologías para los procesos de captura de CO₂, recopilando los diferentes materiales utilizados a nivel industrial y aquellos que se encuentran en proceso de desarrollo. Además, se presentan algunas alternativas tecnológicas que pueden mejorar la capacidad de remoción de este contaminante, las cuales aún se encuentran en fase experimental pero tienen gran potencial como estrategia para minimizar el impacto de requerimientos térmicos y económicos.

Palabras clave: Adsorción, Captura, Dióxido de Carbono, Postcombustión.

ABSTRACT

The development of CO₂ capture technologies in post-combustion processes has been promoted by national and international organizations as a strategy for mitigating climate change as economic development. CO₂ capture is emerging as one of the few technologies used in metallurgical, processing, natural gas processing industries, and refineries, to meet the goals of greenhouse gas emissions reduction.

This work, shows a global and informative view of the state of the art of different technologies available for CO₂ capture processes, and compiles the different materials used at the industrial level and those under developments. In addition, some technological alternatives are presented to improve the removal capacity of this pollutant, which are still in the experimental phase, but already show great projected potential as strategies to minimize the impact of thermal and economic requirements.

Keywords: Adsorption, Capture, Carbon Dioxide, Post-combustion.



1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático a nivel mundial como consecuencia de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), en especial de CO₂, ha generado un gran interés en la investigación de tecnologías más eficientes para su captura. Actualmente existe una capacidad técnica de remoción de CO₂ de fuentes puntuales de emisiones como fábricas, refinerías, centrales eléctricas, entre otras; pero son muy pocos los desarrollos tecnológicos de gran escala, debido a los costos asociados.

El desarrollo económico de los países industrializados y subdesarrollados dependen de la demanda energética, y de acuerdo con la Agencia de Información de la Energía de Estados Unidos (Energy Information Administration - EIA) [1], se proyecta un aumento en el consumo mundial de energía del 28 % para el 2040, donde los combustibles fósiles como el petróleo, el gas natural (GN) y el carbón son las principales fuentes de consumo. En consecuencia, los gobiernos e industrias están promoviendo la captura y secuestro de carbono (CCS), como un instrumento

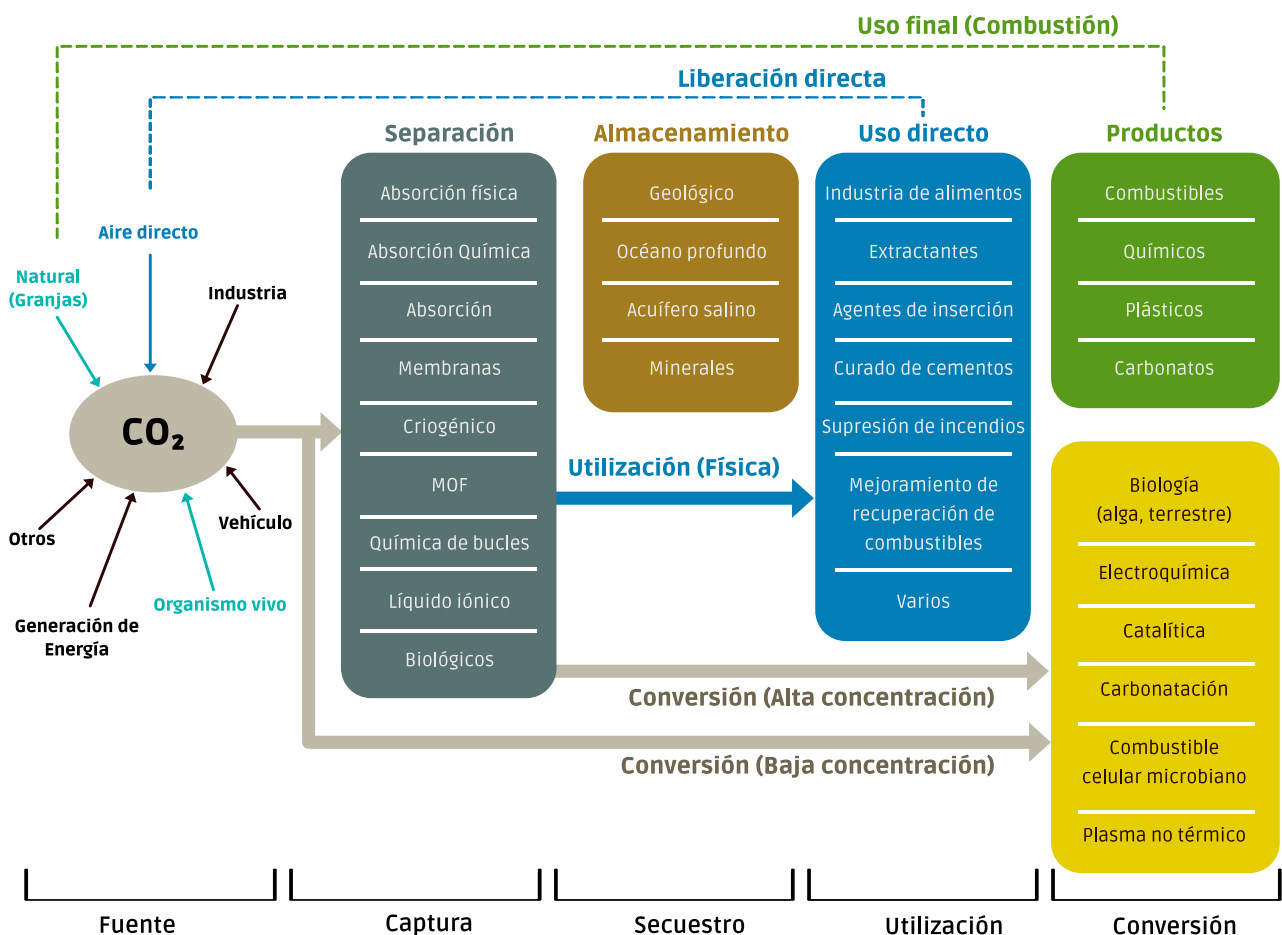


Figura 1. >> Conceptos de captura en postcombustión, utilización y tecnologías de almacenamiento de carbono. Adaptado [6].

de mitigación al cambio climático. Sin embargo, el CCS presenta limitaciones críticas tales como: el incremento elevado del costo de las operaciones, la reducción de la eficiencia de las centrales térmicas y gastos adicionales a largo plazo, entre otras [2, 3].

En los procesos de postcombustión se reduce la mayor cantidad de CO_2 por su eficiencia y mayor maduración tecnológica, algunos de los procesos que se contemplan son de absorción, adsorción, separación por membranas, separación criogénica y química de bucles [4], la cual es una tecnología nueva y presenta un alto potencial en combustión, gasificación y reforma de biomasa. A continuación se presenta una revisión global y divulgativa de algunas de las tecnologías que actualmente están siendo objeto de estudio y desarrollo para la CCS [5].

2. TECNOLOGÍAS DE CAPTURA DE CO_2 EN PROCESOS DE POSTCOMBUSTIÓN

Los sistemas de captura en procesos de postcombustión se basan fundamentalmente en ciclos de absorción/ desorción química, sin embargo para su aplicación a gran escala aún es necesario superar algunos problemas. Los mayores problemas que se pueden generar en estas tecnologías son la degradación, problemas de corrosión asociados al uso de solventes ricos en CO_2 , alto gasto energético para recuperación de solventes, entre otros.

Por lo tanto, las diferentes tecnologías de captura en procesos de postcombustión (ver Figura 1) pueden abarcar desde la absorción (física o química), adsorción, separación (criogénica o membrana) y combustión química de bucles.

2.1. ABSORCIÓN

Esta tecnología ya ha sido comercializada, basándose en la reversibilidad de las reacciones de neutralización ácido-base de los solventes acuosos alcalinos, comúnmente utilizados, con un gas ácido como el CO_2 . La absorción usada en los procesos de purificación de los gases se puede clasificar según la interacción que exista entre los gases y el absorbente: absorción física y absorción química; esta última puede ser reversible o irreversible y presenta mayor capacidad de absorción a presiones parciales de CO_2 bajas [7].

2.1.1. ABSORCIÓN FÍSICA

Este proceso depende únicamente de la solubilidad del gas y su presión parcial. Se emplea generalmente en procesos con altas presiones y tiene la ventaja de eliminar trazas de otros contaminantes, como hidrocarburos de alto peso molecular y compuestos orgánicos sulfurados, sin la formación de productos de reacción no deseados. En la Tabla 1 se indican los principales solventes utilizados en los procesos comerciales de absorción física. Durante la regeneración del solvente se reduce la presión aplicada al solvente que contiene el CO_2 en una o más etapas. Algunos ejemplos son la absorción de amoníaco en agua o la deshidratación del GN por absorción de vapor de agua en disoluciones de glicol [7].

En las plantas eléctricas de gasificación integrada en ciclo combinado, se usa un proceso de absorción física, dado que el gas de síntesis que sale del convertidor catalítico contiene CO_2 con una alta presión parcial. En el caso del Selexol (dimetiléter de polietilenglicol) se ha utilizado desde 1969 para la remoción de CO_2 y H_2S del gas natural en un rango entre $0\text{ }^\circ\text{C}$ a $5\text{ }^\circ\text{C}$, mien-

Tabla 1. >> *Proceso de absorción física [7].*

Solventes comerciales	Tipo de solvente	Condiciones de operación
Rectisol	Metanol	-10 °C a -70 °C, >2 MPa
Purisol	n-metil 2 pirrolidina	-20 °C a -40 °C, >2 MPa
Selexol	Éter dimetílico de polietilenglicol	-40 °C, >2 MPa-3 MPa
Flúor	Carbonato de propileno	> 25 °C, 3,1 MPa a 6,9 MPa
Sepasolv	Éteres metilisopropílicos de etilenglicol	--
Etasolván	n-tributil-fosfato	--

tras que el Rectisol (metanol frío), es usado comúnmente para tratamiento de gas de síntesis generado durante los procesos de producción de hidrogeno en un intervalo de -35 °C a 60° C, separando selectivamente el CO₂ de mezclas que contengan en mayor proporción CO₂, H₂ y CO [8]. Sin embargo, debido a la complejidad de operación, su utilización no ha sido extendido a otras aplicaciones industriales.

2.1.2. ABSORCIÓN QUÍMICA

La absorción química con aminas y el ciclo de calcinación-carbonatación, son los procesos tecnológicos con mayor desarrollo y viabilidad. En este proceso el soluto reacciona con un componente presente en el solvente, y la relación entre la masa del gas disuelto y la presión parcial del soluto, el cual está determinado por su equilibrio químico. Los absorbentes más empleados son las alcanolaminas en solución acuosa, dado que la alcalinidad del grupo amino reacciona rápidamente con el CO₂ exotérmicamente.

Para poder utilizar esta técnica es necesario

verificar si el sistema es compatible para corrientes de gases con bajas concentraciones de CO₂, donde el gas de interés reacciona con un líquido de absorción. Los compuestos químicos utilizados generalmente son aminas u otros absorbentes que se encuentran en etapa de investigación y presentan gran afinidad por compuestos ácidos. La mayoría de los costos de operación en la absorción química se deben a los altos consumos energéticos, que oscilan alrededor del 70% de la energía del proceso. El calor necesario para regenerar una solución absorbente está relacionado con la entalpía de la reacción, que depende de la carga de la solución a regenerar y su concentración durante el proceso cíclico. Si no se lleva a cabo la regeneración del absorbente esta tecnología es inviable, debido a que impide el proceso cíclico. Otros inconvenientes son: el uso de solventes químicos corrosivos, degradación, formación de subproductos y la pérdida del solvente debido a las bajas presiones de vapor. En este tipo de proceso se utilizan compuestos alcalinos que reaccionan químicamente con los gases ácidos selectivamente, y algunos de estos compuestos

presentan activadores que permiten promover la transferencia de masa en la absorción [9]. En la Tabla 2 se presentan algunos de los solventes químicos más utilizados a nivel industrial, para capturar CO_2 utilizando el proceso de absorción química.

En general, los procesos con aminas son muy utilizados debido a su gran capacidad de remoción, bajo costo, flexibilidad en el diseño y operación del proceso. En el caso de las alcanolaminas, presentan un grupo hidroxilo que reduce la presión de vapor e incrementa la solubilidad en el agua, y un grupo amino con la basicidad necesaria para la absorción del gas ácido en solución.

Lionel Dubois y colaboradores [10] evaluaron por separado los rendimientos de absorción y regeneración de diferentes tipos de alcanolaminas primarias, secundarias, terciarias y con impedimentos estéricos como disolventes, mediante pruebas de detección a pequeña escala en un sistema gas-líquido. En términos de re-

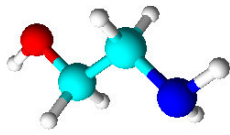
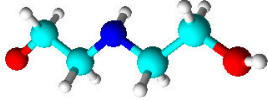
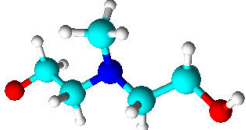
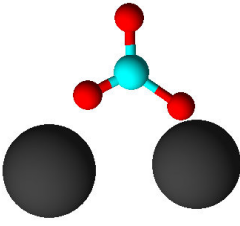

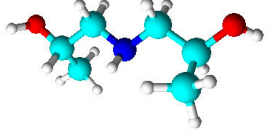
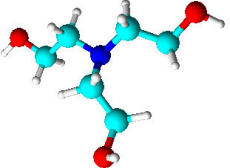
generación las aminas MDEA y AMP (30 % masa) presentan mayor viabilidad y menor costo energético en comparación con las aminas primarias (MEA) y secundarias (DEA), sin embargo, se presenta un efecto contrario en la capacidad de absorción.

Y para el caso de los procesos de calcinación-carbonatación, el sorbente que se utiliza es la caliza; en donde la carbonatación genera una reacción exotérmica entre los reactivos produciendo CaCO_3 y la calcinación genera un proceso inverso, que permite la desorción de CO_2 y CaO en presencia de calor [11].

2.2. ADSORCIÓN

La adsorción de gases es considerado un método prometedor para la captura de CO_2 en procesos de post-combustión. Este proceso logra la separación específica de una o varias especies, debido a la diferencia de afinidad entre las moléculas hacia la superficie de sólido. Se presentan dos tipos de adsorción: fisisorción, la cual se establecen interacciones débiles de

Tabla 2. >> Solventes químicos comerciales para procesos de absorción.

Aminas primarias	Aminas secundarias	Aminas terciarias	Otros
 Monoetanolamina (MEA)	 Dietanolamina (DEA)	 Metildietanolamina (MDEA)	
 Diglicolamina (DGA)	 Diisopropanolamina (DIPA)	 Trietanolamina (TEA)	Carbonato de potasio K_2CO_3

tipo Van der Waals con la superficie, y la quimisorción con la formación de enlaces covalentes con la superficie. En el proceso de adsorción de CO_2 se establecen dos etapas: la adsorción, que determina la eficiencia de la captura, y desorción que requiere el mayor consumo de energía durante la regeneración del adsorbente, la cual determina la viabilidad económica del proceso [12, 13].

Se han investigado diferentes materiales adsorbentes tales como carbones activados, arcillas, zeolitas, entre otros. Kim y colaboradores [14] estudiaron la captura de CO_2 usando como adsorbente un sólido mesoporoso, denominado MCM-48 (SiO_2), el cual fue funcionalizado con aminas monoméricas y poliméricas con y sin impedimento estérico. En ese trabajo se evidenció que la concentración de grupos aminos unidos a la superficie favorecía significativamente la adsorción de CO_2 , permitiendo la regeneración del adsorbente, sin embargo el principal inconveniente es el incremento en el costo del proceso.

A pesar de que zeolitas o carbones activos son capaces de adsorber físicamente una cantidad importante de CO_2 a temperatura ambiente, presentan una disminución en su capacidad y selectividad de adsorción al incrementar la temperatura y por la presencia de agua y otros gases como N_2 y CH_4 . Shamik Chowdhury *et al.* [15] evaluaron una serie de nanocompuestos de TiO_2 mesoporosos con óxido de grafeno (GO), con diferentes relaciones de masa de GO y TiO_2 para captura de CO_2 . Al evaluar la capacidad de adsorción de CO_2 se logró capturar 1,88 mmol/g a temperatura ambiente. Este material TiO_2 /GO presentó una mayor eficiencia en comparación con otros adsorbentes comúnmente utilizados; además de presentar menor calor de adsorción

y selectividad de CO_2/N_2 , útil para captura de CO_2 en gases de combustión secos. Esto permite enfocar la exploración de otros materiales que permitan una mayor adsorción de CO_2 .

Otra alternativa para la captura de CO_2 ha sido la inmovilización covalente de aminas en la superficie de un óxido sólido, evitando problemas asociados con los procesos de absorción química, como son los altos costos de regeneración, corrosión de equipos y pérdidas de aminas por evaporación. Una de las aminas más utilizadas es la PEI (polietilendiamina) debido a la alta concentración por masa de adsorbente que se logra. Este tipo de adsorbentes no requieren que las corrientes de gases de combustión estén secas, ya que el agua aumenta la adsorción, mediante la formación de bicarbonatos. Los estudios realizados con sílices (SiO_2) de tipo SBA-15, que contienen la tetraetilpentamina (TEPA) y/o la dietilamina (DEA), permiten un aumento de alrededor de un 20 % en la eficiencia de la adsorción. Por lo tanto este tipo de adsorbentes presentan una viabilidad para la captura de CO_2 en corrientes gaseosas con baja presión, es decir corrientes de post-combustión, con capacidades de adsorción entre 0,089 y 0,22 g de CO_2 /g de adsorbente [17].

Otro de los materiales en proceso de investigación son nanoestructuras unidimensionales como los nanotubos, nanoláminas y nanobarras, dado que presentan interesantes propiedades ópticas, magnéticas y químicas como resultado de su tamaño nanométrico. Algunas de las propiedades más relevantes son la alta movilidad de los electrones, la alta superficie específica y los efectos de confinamiento cuántico. Por ejemplo, el dióxido de titanio es uno de los compuestos utilizados para crear nanoestructuras, usados en fotocatalisis, célu-

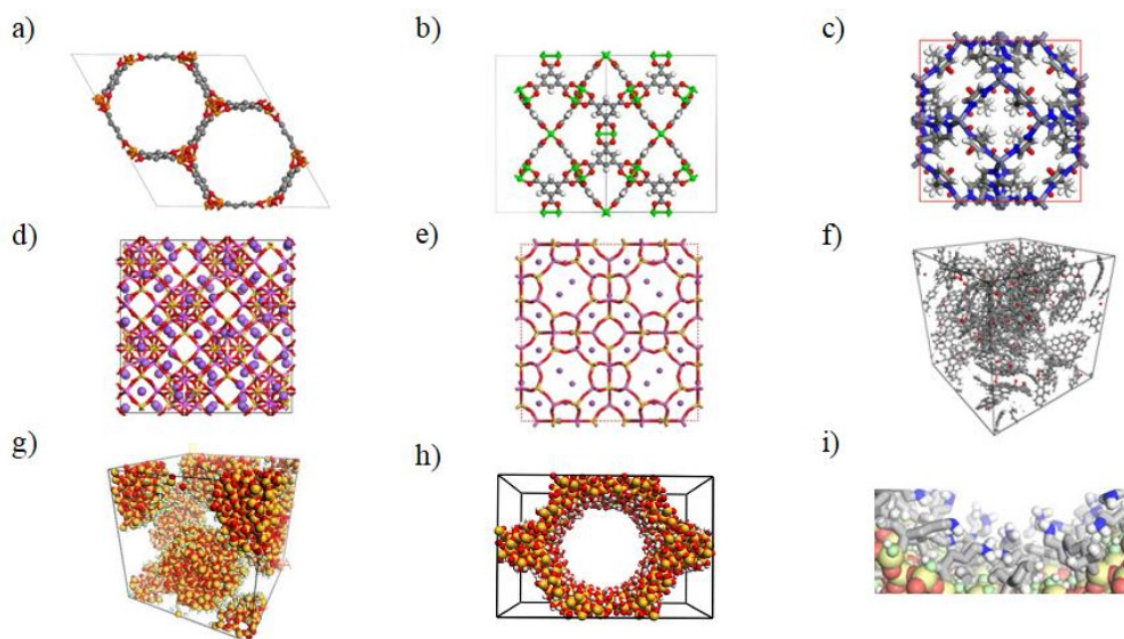


Figura 2. >> Algunos adsorbentes para captura de CO_2 . a) Mg-MOF-74, b) CuBTC, c) ZIF-8 d) Zeolita 13X, e) Zeolita LTA-4A, f) modelo carbón activado, g) modelo de sílice, h) MCM-41, i) Sílices funcionalizadas con compuestos aminosilanos [16].

las solares y dispositivos médicos, entre otros, debido a su alta estabilidad química, bajo costo, alta relación de área-volumen y alta actividad superficial [18].

Los nanotubos de óxido de titanio (TiNTs) son una opción viable para la captura de CO_2 , dado que estos compuestos presentan una gran área superficial, gran porosidad y reactividad superficial. Además, debido a la estabilidad hidrotérmica de su estructura tubular con poros grandes, ha permitido su funcionalización con aminas para favorecer la adsorción [18]. Algunas técnicas para la síntesis de los TiNTs con morfología nanotubular, han permitido obtener áreas específicas hasta $500 \text{ m}^2/\text{g}$. Dentro de esas técnicas se incluyen procesos de sol-gel, oxidación anódica, electrodeposición, deposición sonoquímica, tratamiento hidrotérmico y tratamientos químicos de partículas finas. Uno de los métodos químicos que presenta una

vía sencilla para la producción homogénea de TiNTs, es el método planteado por Kasuga, el cual permite obtener nanotubos de alta pureza, morfología controlada y capacidad de producción a gran escala, a través del tratamiento hidrotérmico de nanopulvo o nanopartículas de TiO_2 en una solución de NaOH , formando como fase cristalina la anatasa con alta área superficial [19], lo cual favorece la adsorción de CO_2 .

Algunos trabajos han estudiado la capacidad de captura de CO_2 en procesos de post-combustión de gas natural usando nanotubos de TiO_2 (TiNTs). En donde se han analizado el efecto de los parámetros de síntesis en las propiedades texturales (área superficial, volumen de poro y diámetro de poro) y su capacidad de adsorción de CO_2 . Se evidenció que la capacidad de adsorción de CO_2 es altamente influenciada por el aumento en el área superficial de TiNTs [20].

Fujiao Song y colaboradores [21] funcionalizaron con las aminas EDA, PEI y TEPA la superficie de nanotubos de TiO_2 (TiNTs) y observaron que la amina TEPA presentó la mayor capacidad de captura usando corrientes de gas natural. Además, se observó que la capacidad de captura crecía con el incremento de la temperatura (30, 50 y 70 °C). Al evaluar la regeneración del adsorbente, solo se presentó una disminución de la adsorción del 5 % después de 10 ciclos de reuso.

2.3. MEMBRANAS

El uso de membranas para la separación de componentes se basa en la diferencia de difusión de los gases en los poros. La velocidad de difusión o permeación depende principalmente de la presión diferencial entre ambos lados de la membrana, de su espesor, del tamaño y la solubilidad de las moléculas que lo atraviesan. En este proceso, la diferencia de presión parcial se utiliza como fuerza impulsora y generalmente se favorece la separación cuando la corriente de alimentación se encuentra a alta presión y existe una gran diferencia entre el coeficiente de permeación [22]. Las membranas pueden ser clasificadas dependiendo del material: orgánicas (tipo polímeros) e inorgánicas (metálicas, cerámicas y zeolitas), pero las membranas orgánicas presentan limitación a altas temperaturas.

A continuación se presentan los procesos donde se pueden utilizar las membranas:

Membranas orgánicas:

- Separación de CO_2 con alta presión y CH_4 .
- Separación de CO_2 y N_2 como parte del proceso post-combustión. En este caso se requieren de etapas posteriores de reciclaje para que el procedimiento sea rentable, de-

bido a que las membranas presentan bajas presiones del flujo y selectividad.

Membranas inorgánicas:

- Para la pre-combustión se utilizan membranas metálicas que realizan la captura a partir de aleaciones Pd.
- En pre-combustión y oxi-combustión se utilizan membranas transportadoras de iones, conductoras de protones y conductoras de oxígeno.

Roda Bounaceur y colaboradores [23] realizaron un trabajo basado en la potencial identificación y las posibles limitaciones del uso de membranas para la recuperación de CO_2 , evidenciando que solo es económicamente viable la tecnología cuando existe una relación de recuperación y composición del filtrado no mayor al 0,8. Para el caso particular de centrales eléctricas de carbono, con un 10% de CO_2 en el gas de combustión, el uso de membranas no es lo suficientemente selectiva para obtener un rendimiento de captura significativo. Sin embargo, en el caso que la selectividad de CO_2/N_2 es menor de 50 y que las corrientes presentan un 20% de CO_2 , el uso de membranas presenta recuperaciones considerables.

2.5 COMBUSTIÓN QUÍMICA DE BUCLES

Este es un método novedoso que permite obtener eficiencias de gas a vapor muy inferiores a las tecnologías de captura ya conocidas, con una disminución en los costos de alrededor del 60% en comparación con los procesos que involucran aminas. La principal ventaja es que el aire y el combustible no se mezclan, evitando separar el CO_2 de las corrientes de gases de escape. Cuenta con un sistema de combustión con transportadores de oxígeno, que tiene dos reactores uno para aire y el otro para combusti-

ble, por lo que no es necesaria una combustión directa. Sin embargo su principal desventaja es el poco nivel de confianza que se tiene actualmente debido a la falta de madurez de la tecnología [24].

DISCUSIÓN

El progreso económico de los países industrializados y subdesarrollos está íntimamente relacionado con el crecimiento de la demanda energética. Por lo tanto, mientras no se generen nuevas tecnologías eficientes en términos económicos y ambientales, se continuará incrementando el uso de combustibles energéticos de tipo fósil para generar la energía requerida. Por consiguiente es necesario controlar las emisiones de gases como el CO₂, generadas en los procesos de combustión, y una de las iniciativas para reducirlas es la implementación de tecnologías de captura, secuestro y almacenamiento.

Los métodos actuales de captura presentan ciertas limitaciones operativas, en el caso de los procesos de absorción las principales desventajas se presentan debido a las condiciones de corriente de los gases de escape: un gran volumen, bajas presiones y presencia de impurezas que derivan en una inversión económica elevada en equipos. Para el caso de las membranas presentan limitaciones cuando se trabajan a bajas presiones debido a que la fuerza de separación necesaria del gas sería baja; además este proceso resulta en un mayor gasto energético y menor porcentaje de remoción del CO₂ frente a la absorción química. Una alternativa para los procesos de adsorción sería el uso de nanomateriales, que presentan un potencial para la captura de CO₂. En la actualidad la

mayoría de los procesos de combustión cuentan con una infraestructura energética basada en combustión con aire, en la cual la opción de captura en el proceso de post-combustión presenta gran relevancia para disminuir los focos emisores de CO₂.

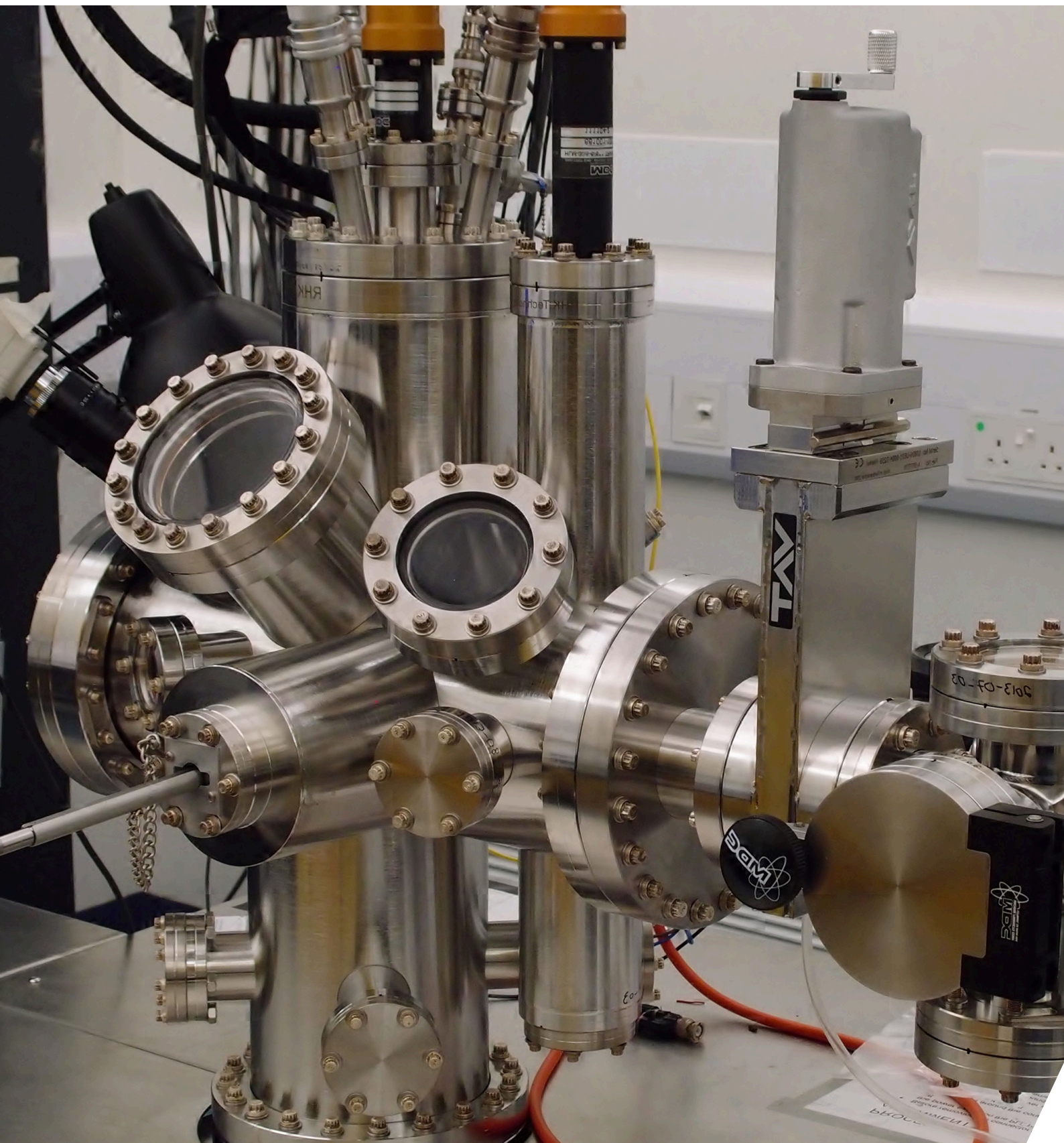
CONCLUSIONES

- En este trabajo de revisión sobre las tecnologías de captura de CO₂ en procesos de postcombustión, se presenta de manera general los diferentes procesos y sus principales ventajas. Es importante tener en cuenta las condiciones del proceso como temperatura y presión, para seleccionar la tecnología adecuada para el tipo de gas a tratar, en el caso particular de la absorción química es importante realizar una adecuada selección del disolvente para incrementar los rendimientos de captura.
- El estudio e impacto de las aplicaciones nanotecnológicas pueden presentar aplicaciones muy variadas, pero resultan ser una estrategia retardadora para la captura de gases contaminantes en la industria Oil & Gas.
- De los métodos de captación de CO₂ que existen actualmente a nivel industrial, el método de absorción con soluciones con aminas, es el proceso tradicional para tratamiento de gases y migrar hacia otra tecnología requiere inicialmente una alta inversión en infraestructura, equipos, etc. Sin embargo, otras tecnologías presentan ventajas adicionales que permitiría incrementar la eficiencia del retiro de contaminantes, y en el caso de usar un proceso que involucre la fisisorción y la químisorción, puede ser una alternativa viable para incrementar los rendimientos y selectividad de estos procesos.

REFERENCIAS

- [1] Energy Information Administration, 2017, International Energy Outlook Executive Summary, 14.
- [2] Dumitru Cebrucean, Viorica Cebrucean, Loana Lonel. 2014, CO₂ Capture and Storage from Fossil Fuel Power Plants. Energy Procedia, 63, 18-26.
- [3] Akash Sood, Savita Vya, 2017, Carbon Capture and Sequestration-A Review, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 83, 1-10.
- [4] I. Sreedhar, Tanisha Nahar, A. Venugopal and B. Srinivas, 2017, Carbon Capture by Absorption-Path Covered and Ahead, 76, 1080-1107. Akira Kishimoto, Yasuki Kansha, Chihiro Fushimi,
- [5] Atsushi Tsutsumi, 2011, Energy Recuperative CO₂ Gas Separation in Post-Combustion Capture, Ind. Eng. Chem. Res. 50,10128-10135.
- [6] Pen-Chi Chiang, Shu-Yuan Pan, 2017, Post-combustion Carbon Capture, Storage, and Utilization, Springer Singapore, 1.
- [7] Mondal P, Dang G.S, Garg M.O. 2011, Syngas Production through Gasification and Cleanup for Downstream Applications-Recent Developments, Fuel Processing Technology, 92, 1395-1410.
- [8] Patrick J. Robinson, William L. Luyben, 2010, Integrated Gasification Combined Cycle Dynamic Model: H₂S Absorption/Stripping, Water-Gas Shift Reactors, and CO₂ Absorption/Stripping, Ind. Eng. Chem. Res, 49, 4766-4781.
- [9] José D. Figueroa, Timothy Fout, Sean Plasynski, Howard McIlvried, Rameshwar D. Srivastava, 2008, Advances in CO₂ Capture Technology-The U.S Department of Energy's Carbon Sequestration Program, International Journal of Greenhouse Gas Control, 2,9-20.
- [10] Lionel Dubois, Diane Thomas, 2013, Postcombustion CO₂ Capture by Chemical Absorption: Screening of Aqueous Amine(s)-Based Solvents, Energy Procedia, 37, 1648-1657.
- [11] Borja Arias, Gemma S. Grasa, Mónica Alonso, J. Carlos Abanades, 2012, Post-combustion Calcium Looping Process with a Highly Stable Sorbent Activity by Recarbonation, Energy & Environmental Science, 6, 7353-7359.
- [12] Mofarahi, Masoud & Khojasteh, Yaser & Khaledi, Hiwa & Farahnak, Arsalan, 2008, Design of CO₂ absorption plant for recovery of CO₂ from flue gases of gas turbine Energy, Elsevier, vol. 33(8), pages 1311-1319.
- [13] Abu Zahra, M.R.M, Jansens, P.J, 2009, Carbon Dioxide Capture from Flue Gas: Development and Evaluation of Existing and Novel Process Concepts, Institutional Repository.
- [14] Kim, W. G.; Kang, H. U.; Jung, K. M.; Kim, S. H, 2008, Synthesis of Silica Nanofluid and Application to CO₂ Absorption, Sep. Sci. Technol, 43, 3036– 3055.
- [15] Chowdhury S, Balasubramanian R, 2016, Three-Dimensional Graphene-Based Porous Adsorbents for Postcombustion CO₂ Capture, Industrial & Engineering Chemistry Research. 55(29), 7906-7916.
- [16] Daniel Bahamon, Santiago Builes, Mohammad Abu Zahra, Lourdes F. Vega, 2018, 14th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, GHGT-14, Australia.
- [17] Spigarelli BP, Kawatra SK, 2013, Opportunities and challenges in carbon dioxide

- capture. Journal of CO₂ Utilization,1,69-87.
- [18] Lee K, Mazare A, Schmuki P, 2014, One-Dimensional Titanium Dioxide Nanomaterials: Nanotubes. Chemical Reviews.114(19),9385-9454.
- [19] Kasuga T, Hiramatsu M, Hoson A, Sekino T, Niihara K, 1998,Formation of Titanium Oxide Nanotube, Langmuir.;14(12),3160-3163.
- [20] Ayala Blanco E, García Sánchez CE, Martínez Ortega F, 2018., Adsorción de CO₂ en procesos de post-combustión de gas natural mediante nanotubos de óxido de titanio, XXVI CONGRESSO IBERO-AMERICANO DE CATÁLISE Portugal.
- [21] Song F, Zhao Y, Zhong Q. Adsorption of carbon dioxide on amine-modified TiO₂ nanotubes. Journal of Environmental Sciences. 2013;25(3):554-560.[21]Bel aissaoui B, [22] Willson D, Favre E, 2012, Post-combustion Carbon Dioxide Capture using Membrane Processes: A Sensitivity Analysis, Procedia Engineering, 44,1191-1195.
- [23] Bounaceur R, Lape N, Roizard D, Vallieres C, Favre E, 2006,Membrane processes for post-combustion carbon dioxide capture: A parametric study. Energy., 31(14)2556-2570.
- [24] Raúl Perez Vega, 2016, Captura de CO₂ en la combustión de carbón con transportes sólidos de oxígeno, Universidad de Zaragoza, España.



Construcción de Sistemas de Presión en el Intervalo de Medio y Alto Vacío

Carlos Mauricio Villamizar Mora^{1*}
Jonathan Javier Duarte Franco¹

1. Grupo de Investigación en Fluidos y Energía, Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas, Bucaramanga, Colombia.

* cvillamizar@cdtdegas.com

RESUMEN

El trabajo en presiones de vacío es desarrollado en el campo de la industria y la investigación. Los sistemas de vacío son utilizados para generar estos valores de presión en diferentes intervalos, los cuales están clasificados según la norma ISO 3529. En el presente artículo, inicialmente se muestran las generalidades a la hora de construir un sistema de vacío, tomando como referencia compañías líderes en el desarrollo de tecnologías y componentes para el intervalo de medio y alto vacío. Posteriormente se procede a plantear una metodología donde se abordan factores como factores de selección y diseño concernientes a cámaras de vacío, materiales, sistemas de bombeo, entre otros. Finalmente, se muestran las características principales y consideraciones en el diseño y construcción de los sistemas de vacío, así como las diferentes tecnologías de medición.

Palabras clave: *Vacío, sistema de vacío, presión absoluta, vacuómetro, bomba de vacío.*

ABSTRACT

The work in vacuum pressures is developed in the field of industry and research. Vacuum systems are used to generate these pressure values at different intervals, which are classified according to ISO 3529. In this article, the generalities are initially shown when building a vacuum system, referring to leading companies in the development of technologies and components for the medium and high vacuum range. Subsequently, we proceed to propose a methodology where factors such as selection and design factors concerning vacuum chambers, materials, pumping systems, among others are addressed. Finally, an informative article on the main characteristics and considerations in the design and construction of vacuum systems is obtained.

Keywords: *Vacuum, vacuum system, absolute pressure, vacuum gauge, vacuum pump.*

INTRODUCCIÓN

El vacío es, según la norma ISO 3529 (Vacuum Technology – Vocabulary), “Si se trata de un gas enrarecido o el medio ambiente correspondiente a dicho estado, asociado con una presión o una densidad de masa por debajo del nivel atmosférico”. Es decir, el vacío es un estado en el cual la presión es menor que el nivel de presión atmosférica local o estándar.

A nivel industrial, la aplicación de los sistemas de vacío resulta relevante y útil en los procesos de químicos y de manufactura. Sectores productivos como alimentos y materiales, servicios de laboratorio especializados en hidrocarburos, procesos como evaporación, destilación, filtración, liofilización, fusión, deposición, soldadura y sinterización, requieren el uso de presiones absolutas en los niveles de medio y alto vacío. Para la realización de estos procesos, es necesaria la construcción de sistemas que permitan alcanzar dichos intervalos de presión.

La construcción de sistemas que trabajen en vacío se ha desarrollado a nivel mundial partiendo desde aplicaciones investigativas y posteriormente siendo implementados en el sector industrial, representando así una ayuda en los métodos de procesamiento [1]. En el presente artículo se dará una revisión a los componentes que se integran en la construcción de sistemas de presión en el intervalo de medio y alto vacío.

METODOLOGÍA

La metodología que se abordará en el artículo para la construcción de sistemas de presión en el intervalo de medio y alto vacío es la siguiente:

INTERVALOS DE PRESIÓN DE OPERACIÓN

Sea cual sea el proceso que se vaya a ejecutar, la primera consideración es el intervalo de presión o rango de vacío en que operará el sistema. Es importante esta selección ya que los instrumentos o herramientas presentan características de operación y tratamiento para cada región. Por ejemplo, no es lo mismo un proceso como la producción de lámparas incandescentes que emplea rangos de presión alrededor de 1×10^{-2} Pa, a otro proceso como lo es la investigación de materiales que logra presiones de hasta 1×10^{-10} Pa.

Según ISO 3529-1, ver Tabla 1, en la práctica se distinguen alcances en que se mide el vacío, hay algunas variaciones en los límites de los intervalos, normalmente se utilizan estos rangos típicos.

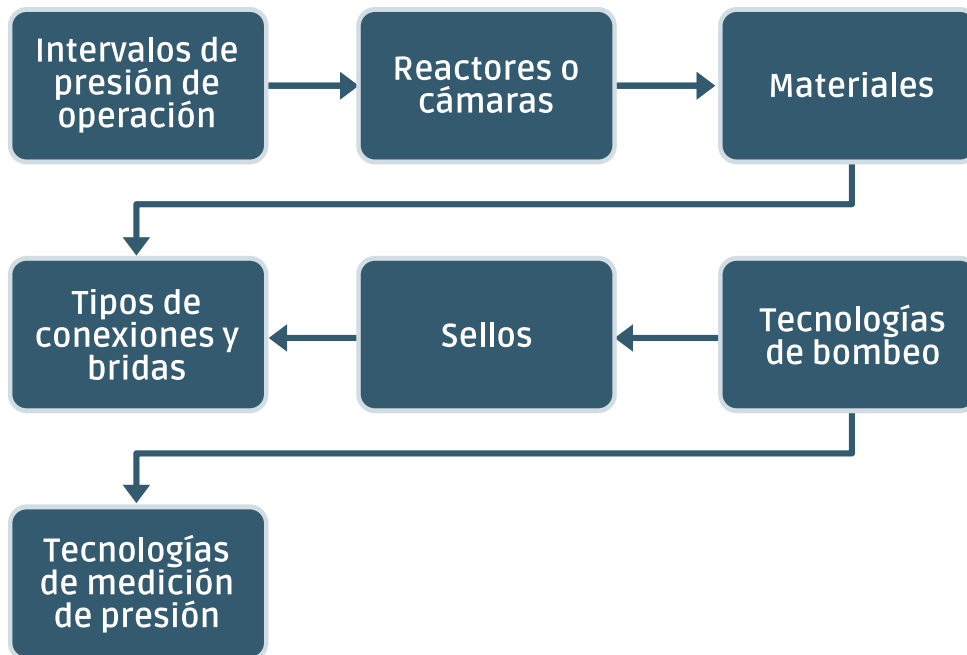
Tabla 1. >> Intervalos de vacío reconocidos [17].

100 kPa – 100 Pa	Bajo Vacío
100 Pa – 0,1 Pa	Medio Vacío
0,1 Pa – 0,0001 Pa	Alto Vacío (HV)
Debajo de 0,0001 Pa	Ultra Alto Vacío

REACTORES O CÁMARAS

Un reactor o cámara de vacío es un contenedor del cual se extrae el aire y otros gases mediante una bomba de vacío. Hay diferentes configuraciones ya estandarizadas dentro de las cuales están tipo caja, esfera, cilindro, D, campana de vidrio, entre otros. Estas configuraciones

Figura 1. >>
Metodología.



pueden alcanzar valores entre medio y alto vacío, pero difieren en su uso dependiendo de la aplicación. Kurt J. Lesker, compañía norteamericana especializada en la manufactura y fabricación de estos componentes, describe las características de cada configuración empleada en sistemas de vacío que se resumen en la Tabla 2.

MATERIALES

Algunos de los materiales que son comúnmente empleados para la construcción de reactores o cámaras en sistemas de vacío son el vidrio, el acero inoxidable y el aluminio. Los materiales que representan una opción económica, maquinado fácil y manipulación como el cobre, latón, algunos polímeros y otros cerámicos porosos son empleados de forma estratégica en

ambientes de medio o bajo vacío. La Tabla 3 describe las ventajas y desventajas de cada uno de estos materiales [3].

TIPOS DE CONEXIONES Y BRIDAS

Según Kurt J. Lesker, las bridas son elementos semipermanentes que permiten la unión entre partes que:

- Son frecuente u ocasionalmente des-ensambladas,
- Son livianos como para ser trasladados con el equipo disponible,
- No pueden ser soldados debido a la sensibilidad al calor o los reemplazos que necesitan. [3]

Enseguida, se listan los requisitos a la hora de

Tabla 2. >> Características de los tipos de cámaras empleados en sistemas de vacío [18].






Tipo de cámara	Características	Ilustración
Caja	Tienen un lado plano, emplean paredes gruesas o abrazaderas grandes para soportar la presión atmosférica. Fácil y rápido acceso a su interior.	
Esférica	Los puertos ubicados alrededor de la cámara permiten con el centro de la cámara o con puntos focales. Para un volumen requerido emplean menor área superficial.	
Cilíndrica	Poseen delgadas paredes, pueden ser empleadas en orientación vertical u horizontal. Al interior de las cámaras verticales se accede mediante cámaras secundarias de carga-bloqueo ubicadas en un puerto lateral. Las cámaras horizontales poseen domos o bridas con sellos de juntas tóricas que son del mismo diámetro del cilindro.	
Campanas de metal	Son una cámara cilíndrica con un domo soldado en uno de sus extremos, mientras que el otro tiene una brida metálica.	
Campanas de vidrio	Son empleadas en aplicaciones de laboratorio. El material permite visibilizar lo que ocurre al interior de la cámara.	

Tabla 3. >> *Ventajas y desventajas de algunos materiales empleados en tecnologías de vacío.*

Vidrio	Acero	Aluminio
<p>Se emplea usualmente el vidrio blando de soda y el de borosilicato (Pyrex).</p> <p>Ventajas</p> <ul style="list-style-type: none"> - Bajo costo de adquisición de las partes. - Permite observar lo que sucede en el interior. - Químicamente inerte. - Fácil limpieza. <p>Desventajas</p> <ul style="list-style-type: none"> - Frágil. - Vulnerables a choques térmicos. - No es horneable. 	<p>Se usa la serie 300 de Acero Inoxidable.</p> <p>Ventajas</p> <ul style="list-style-type: none"> - Resistente a la corrosión. - Soldable. - Permite su horneado. <p>Desventajas</p> <ul style="list-style-type: none"> - Deformación una vez se superan los 500 °C. - Elevado costo de materia prima. - El hidrógeno limita la llegada a la presión última. 	<p>Se comercializan las series 5000 y 6000.</p> <p>Ventajas.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Puede ser soldable. - Empleado en aplicaciones de alto vacío. - Resistencia a la corrosión y ambientes corrosivos. <p>Desventajas.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Se requiere de un recubrimiento en las piezas de otros materiales. - Bridas de aluminio caras respecto a las de acero.

seleccionar un sistema de bridas para una aplicación de vacío:

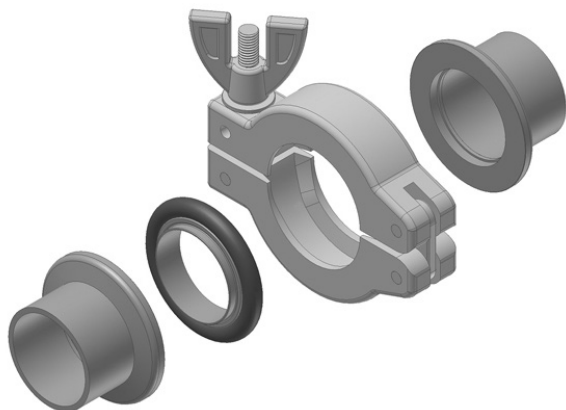
- Tipo de material del sello.
- Compatibilidad del material de la brida con los otros elementos del sistema de vacío.
- Presión última de trabajo.
- Temperatura de operación.
- Organizaciones internacionales y algunos fabricantes han diseñado sistemas de bridas que satisfacen las necesidades de las aplicaciones de alto vacío. A continuación, se muestran algunos tipos de bridas empleadas en sistemas de vacío.

BRIDAS ISO

La Organización Internacional de Estándares (ISO), publicó sus normas dimensionales para bridas de vacío con sello de anillo, las cuales están divididas en dos grupos, las ISO 2861 también llamadas ISO-KF y las ISO 1609 son relacionadas como ISO-MF o ISO-K.

Una brida ISO 2861, son de diámetros de brida pequeños suelen emplearse en aplicaciones de tubería y en aplicaciones de alto vacío [4], también se les conoce como ISO-KF, devengando la sigla KF del alemán Kleinflansch que traduce

Figura 2. >> Conexión de bridas KF [4].



“brida pequeña”.

El ensamblaje consta de dos bridas idénticas y rotables, un anillo de centrado con sello y una abrazadera, tal y como se ve en la Figura 2.

La función del anillo de centrado o junta tórica es mantener centradas y espaciadas las bridas, sostener el sello de anillo y limitar la compresión de este mismo. La abrazadera junta las bridas y también ejerce una fuerza de sello.

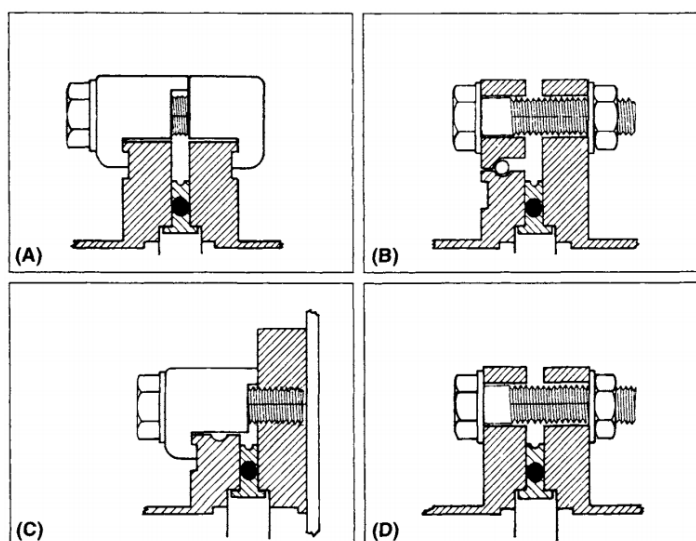
Las bridas ISO 1609 o ISO-MF, están diseñadas

para diámetros de brida desde 2,5 pulgadas hasta 12 pulgadas, su montaje involucra un anillo centrador para el sellado. Para sujetarlas, utilizan múltiples fijaciones, la sigla MF es debido a “Multi Fastener Flange” [5]. La Figura 3 muestra las técnicas de sujeción para las bridas ISO 1609.

BRIDAS DE BORDE DE CUCHILLA (CF)

Este sistema de bridas fue introducido en 1960 con el nombre de ConFlat®, una serie de bridas de sello metálico especiales para Ultra Alto Vacío. Están disponibles en el mercado debido a los numerosos fabricantes que existen, al mismo tiempo las bridas pueden ser intercambiadas sin importar quien haya sido el fabricante. La unión de bridas tipo ConFlat se muestra en la Figura 4. Se logra el sello gracias a que las caras de las bridas cuentan con un borde de cuchilla, el cual penetra en un sello de metal suave. La sujeción del par de bridas se logra gracias a pernos pasantes que al mismo tiempo ejercen presión para sellar, también pueden usarse pernos

Figura 3. >> Formas de sujetar las bridas ISO 1609 o ISO-MF. Se pueden emplear abrazaderas de doble gancho (A) o pueden utilizarse pernos (D). Se usan tornillos cuando se cuenta con poco espacio para la sujeción, siendo el caso de las válvulas. Para las bridas no roscadas se puede colocar una brida roscada y usar ganchos sencillos de abrazadera (C), o mediante un anillo que encaja en el borde externo de la brida (B).



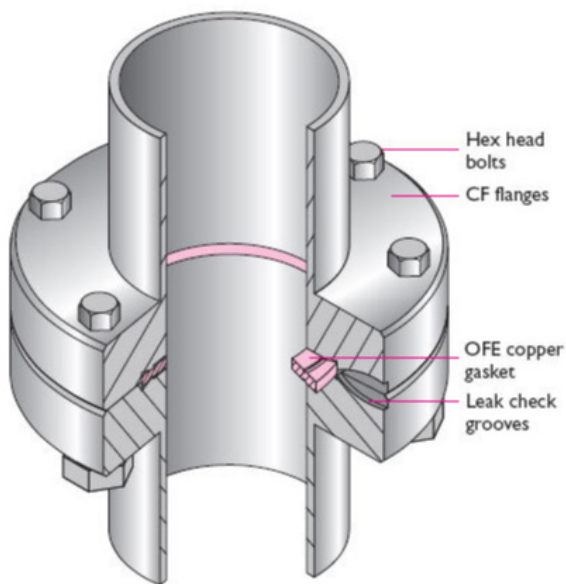


Figura 4. >> Ensamblaje de bridas metálicas o ConFlat (CF) [19].

en bridas roscadas, siendo práctico para situaciones en que no sea posible el uso de tuercas. Se tienen dos posibilidades de bridas, rotables y no rotables y pueden ser utilizadas en una misma junta [5].

La compañía Kurt J. Lesker recomienda para el caso en que se desee construir una nueva cámara de vacío, comparar todos los sistemas de bridas y escoger según los siguientes requerimientos:

- Cumplir con las condiciones de vacío requeridas.
- Coincidir con las condiciones de temperatura a las que se expondrá la cámara.
- Afectaciones por materiales o productos del proceso.
- Costo de adquisición.
- Compatibilidad con las juntas y componentes agregados de otros fabricantes.

SELLOS

Los sellos en la construcción de los sistemas de vacío ayudan a unir componentes con una mínima tasa de fuga y practicidad para su desmonte, pueden ser de metal (cobre u oro) o elastómero dependiendo de la aplicación del sistema de vacío.

SELLOS DE POLÍMEROS

Polímeros como nitrilo, poliuretano, silicona y PTFE son empleados como materiales de sello en sistemas de vacío, a la hora de seleccionar se deben tener en cuenta los siguientes factores de operación y su desempeño [6]:

- Temperatura máxima de operación.
- Tiempo de vida durante la instalación.
- Exposición química, interna y externa.
- Características de compresión.
- Permeabilidad y características de desgasificación.

Figura 5. >> Corte transversal donde se aprecia el sello metálico en bridas CF [20].



- Posibilidad de daño por radiación nuclear.
- Disponibilidad y costo.

SELLOS METÁLICOS:

Los sellos metálicos pueden ser fabricados de cobre, oro y aluminio, usualmente estos sellos son de un solo uso o “sacrificio”, ya que el sello es aplastado y a la vez deformado en ambos extremos por los bordes de cuchillas que tienen las bridas ConFlat, tal y como se muestra en la Figura 5.

A la hora de seleccionar el tipo de sello para el sistema de vacío, los sellos metálicos presentan las siguientes características [7]:

- Resistencia a altas temperaturas de hornado.
- Bajas tasas de desgasificación.
- No se produce permeación.
- Resistente a ambientes extremos, corrosivos, radioactivos, etc.
- Facilidad de ensamble.
- Sello durante un tiempo prolongado; no hay degradación del material.

TECNOLOGÍAS DE BOMBEO

Las tecnologías de bombeo empleadas en la generación de vacío están clasificadas en dos categorías: bombas de desplazamiento y bombas de unión a gas [8].

La primera categoría, bombas de transferencia de gas o de desplazamiento de gas tienen dos subcategorías, bombas de desplazamiento positivo o bombas cinéticas de vacío. En las bombas de desplazamiento, el gas bombeado es atrapado, comprimido y eyectado hacia la atmósfera u otra estación de bombeo [9]. Las bombas cinéticas desplazan gas al acelerar este mismo en la dirección del bombeo, ya sea con un sistema mecánico de bombeo o con una corriente de vapor la cual es condensada al final de la sección de bombeo [10].

La segunda categoría, bombas de unión a gas, empleada en sistemas de UHV juntan el gas a un sustrato activo mediante la captación o condensado del gas a una temperatura adecuada. Este tipo de bombas presentan limitación debido a la capacidad de absorción del gas y deben ser regeneradas en ciertos intervalos dependiendo del proceso [10]. La quimisorción es ejecutada técnicamente por bombas getter, bombas criogénicas, bombas de criosorción.

En la Figura 6, adaptada de información de la empresa Pfeiffer, se muestra un mapa conceptual de las bombas de vacío y su clasificación dependiendo del principio de operación.

Las bombas de vacío pueden ser divididas también en tres categorías:

- Bombas primarias (respaldo): Intervalos de bajo y medio vacío.
- Bombas de refuerzo: Intervalos de bajo y

Figura 6. >> Principio de operación de las bombas de vacío. Adaptado de [10].

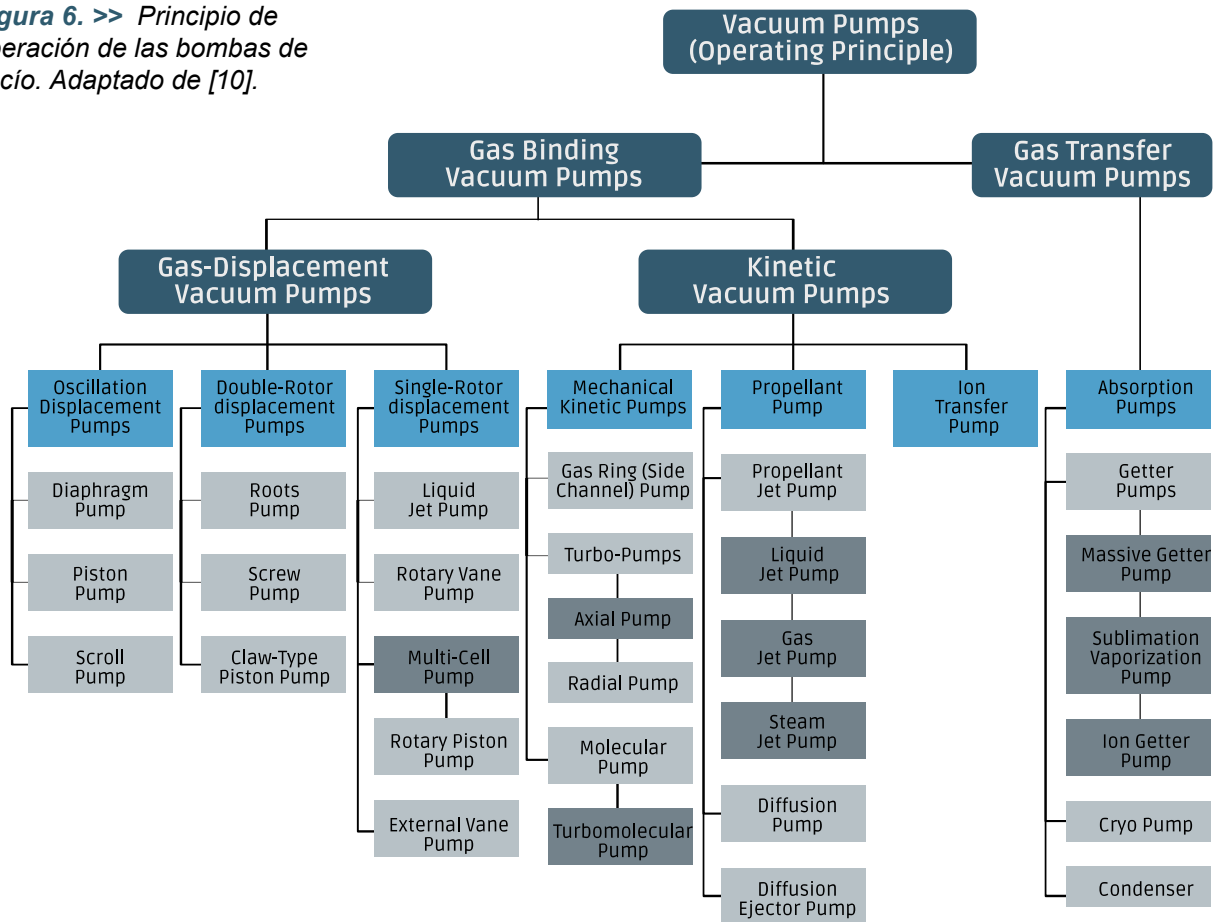
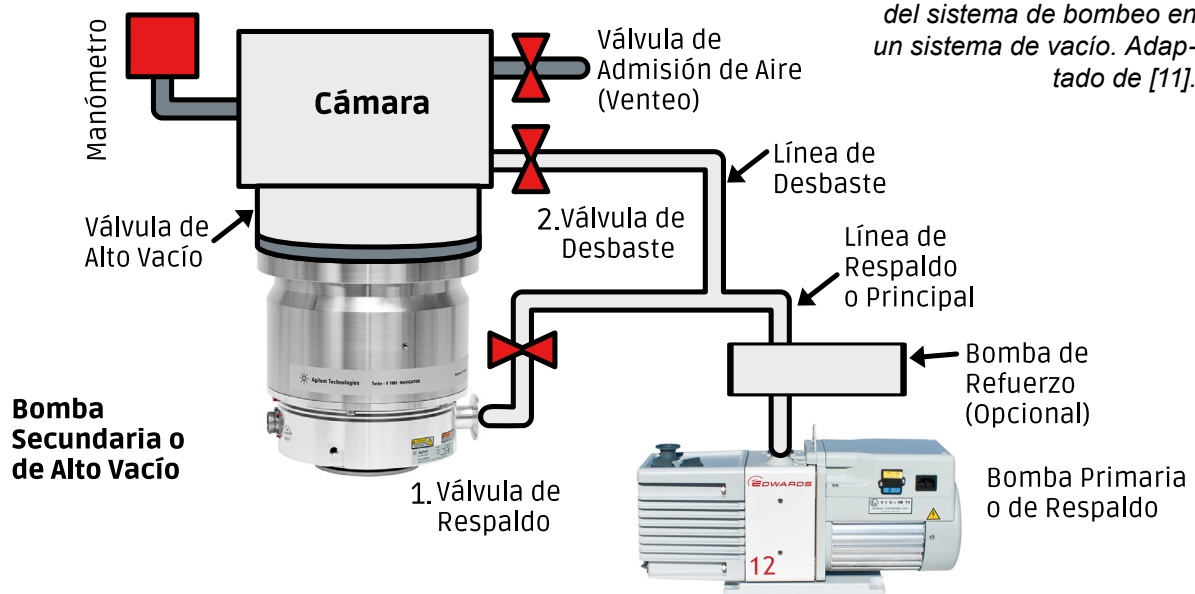


Figura 7. >> Configuración del sistema de bombeo en un sistema de vacío. Adaptado de [11].



medio vacío.

- Bombas secundarias (Alto vacío): Intervalos de alto vacío y ultra alto vacío.

Se emplean las bombas de desplazamiento como bombas primarias y también como bombas de refuerzo, esto debido a que su presión última está en el intervalo de la presión inicial que requieren las bombas cinéticas o bombas secundarias. La Figura 7 muestra la configuración del sistema de bombeo conectado a una cámara de vacío. El juego de válvulas permite el funcionamiento de las bombas en serie o que opere la bomba secundaria directamente conectada a la cámara. [11]

A la hora de seleccionar un sistema de bombeo, los factores a tener en cuenta se muestran en la Tabla 4.

TECNOLOGÍAS DE MEDICIÓN DE PRESIÓN

Los manómetros de vacío o vacuómetros son dispositivos para la medición de presiones de vacío o subatmosféricas. Los vacuómetros son empleados para monitorear y controlar la presión en un sistema. [13]. Al llevar a cabo la medición de presión, existen dos puntos de referencia. Por un lado, el instrumento puede medir con respecto a la presión absoluta, empleando como punto de partida en su escala el vacío perfecto (0 psia), es decir, con cero como punto cero. O la segunda, cuando se toma la presión con respecto a la presión manométrica pues se ocupa como punto inicial la presión atmosférica (0 psig) [14].

Las tecnologías de vacío miden presión p de una forma directa de acuerdo a la ecuación que la define al medir la fuerza ejercida en un área $p=F/A$ empleados en bajo y medio vacío,

Tabla 4. >> Características de operación para seleccionar las bombas que conforman el sistema de bombeo del sistema de vacío [12].

Nivel de vacío	Máxima presión de vacío que una bomba puede alcanzar.
Razón de aire extraído	También expresado como eficiencia verdadera volumétrica.
Caballos de fuerza	Cantidad de fuerza requerida para operar la bomba.
Temperatura	Temperatura de operación al realizar la extracción del fluido gaseoso.
Costo	Cada tecnología tendrá coste propio dependiendo del nivel de vacío.
Configuración del sistema de bombeo	Paralelo, en serie o mixto.
Seguridad	Requisitos de seguridad y reglamentarios de dicho sistema de bombeo.

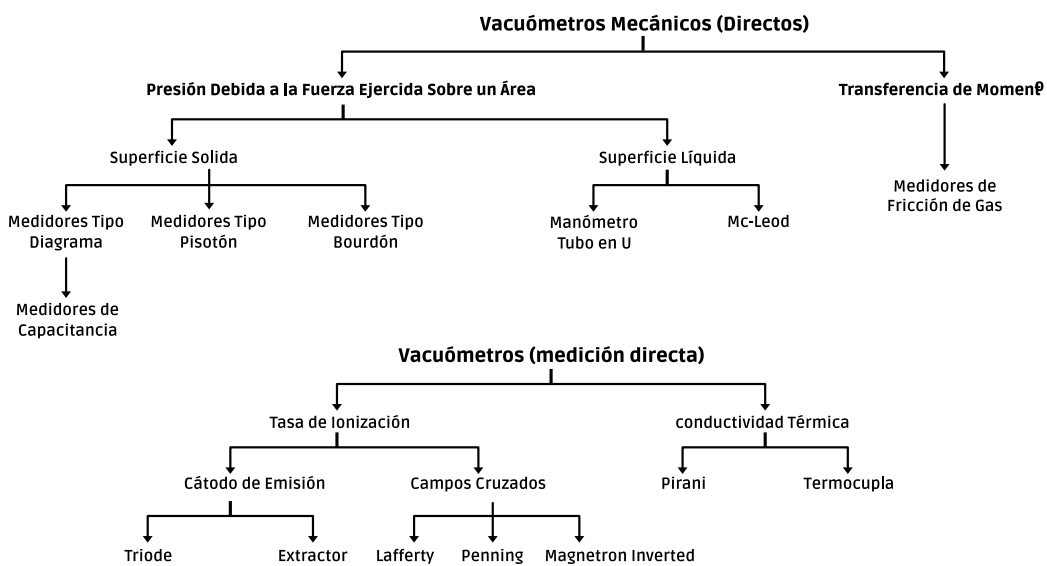


Figura 8. >> Clasificación de vacuómetros dependiendo de su principio físico de medición. Adaptado de [15].

o indirectamente al medir una magnitud física proporcional a la presión, y son adecuados en intervalos desde medio hasta ultra alto vacío. Entre las magnitudes usadas por diferentes tecnologías para inferir la presión se encuentran la densidad del número de partículas, la conductividad térmica y la probabilidad de ionización [15]. En la Figura 8, se muestra la clasificación de los manómetros de vacío típicos, de acuerdo a su principio de medición.

El intervalo de presión medido en la tecnología de vacío está comprendido por alrededor de 15 potencias de 10. Se requeriría acomodar distintas tecnologías de medición de presión para lograr cubrir todo el rango de vacío [16]. La Figura 9 detalla los intervalos aproximados de operación de algunos vacuómetros de vacío.

A la hora de seleccionar una tecnología de medición, se deben tener en cuenta los siguientes requisitos [5]:

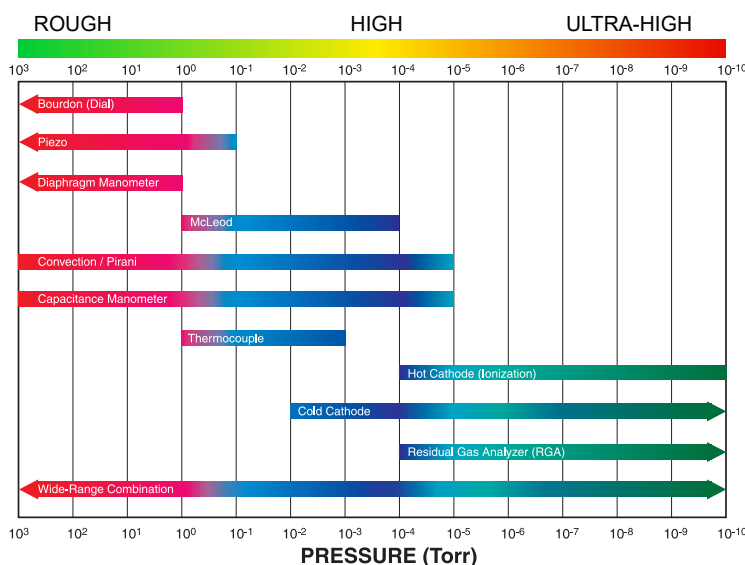


Figura 9. >> Intervalos de presión para diferentes tipos de manómetro de vacío [21].

- Intervalo de operación de vacío.
- Tipo de método de medición.
- Punto de referencia de la toma de presión.

CONCLUSIONES

- La selección de tecnología de vacío para intervalos de medio y alto vacío requiere un análisis detallado de factores como presión final de operación, temperatura máxima, características del material, compatibilidad entre materiales, material de sello, exposición a niveles radioactivos o corrosivos, y método de medición.
- Materiales como acero inoxidable, aluminio y vidrio son empleados para la manufactura de elementos como cámaras de vacío, y se encuentran presentes en formas en D, cilíndricas, esféricas, de campana, etc.
- Se debe procurar que todos los elementos seleccionados posean un mismo intervalo de operación.
- Los sistemas de bridas dan la posibilidad de efectuar ensamblajes entre partes que pueden ser intercambiadas o para una fácil remoción de los dispositivos.
- Las tecnologías de medición de presión, presentes en el mercado, tienen ligado su precio a la presión última que logran medir o generar respectivamente. Se dividen en dos grupos, las de medición directa y las de medición indirecta.
- Es común que se empleen mínimo dos bombas en los sistemas de medio y alto vacío. La primera bomba cumple con la función de disminuir la presión desde la atmósfera, conocida como bomba de respaldo, y la segunda permite alcanzar los valores inferiores del rango de presión para el sistema de bombeo.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por el Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA) a través del Convenio Especial de Cooperación n°. 0233 de 2018. El Centro Industrial del Diseño y la Manufactura (CIDM) y el Centro Industrial y del Desarrollo Tecnológico (CIDT) participaron en el Plan de Transferencia del proyecto.

REFERENCIAS

- [1] Ppi Pumps PVT. Why Vacuum Technology is Important in Various Industries?. Disponible en: <http://www.ppipumps.com/why-vacuum-technology-is-important-in-various-industries.html>
- [2] Danielson, P. Normandale Community College. Choosing the Right Vacuum Materials, Abril-2013. Disponible en: <http://www.normandale.edu/departments/stem-and-education/vacuum-and-thin-film-technology/learning-in-a-vacuum---what-to-expect/articles/choosing-the-right-vacuum-materials>
- [3] Kurt J. Lesker Company. Flange Systems Overview. Disponible en: https://www.lesker.com/newweb/flanges/flanges_technicalnotes_overview_1.cfm
- [4] VACOM. KF Components. Disponible en: <https://www.vacom.de/en/products/standard-components/flange-systems/476-kf-components>
- [5] Hoffman D, Thomas J, Singh B. 1997. Handbook of Vacuum Science and Technology, Elsevier Science & Technology Books
- [6] VAT. Vacuum Sealing Technology. Disponible en: <https://cas.web.cern.ch/sites/cas.web.cern.ch/files/lectures/platjadaro-2006/sonderegger.pdf>

- [7] Technetics Group. Metal Seals. High-performance sealing solutions that are engineered to increase performance in critical applications. Disponible en: <https://technetics.com/products/sealing-solutions/metal-seals/>
- [8] Lonestar Turbo Systems. Vacuum Pumps. What are The Different Uses of Vacuum Pumps? What You Need to Know. Disponible en línea: <http://www.lonestarmafc.com/different-uses-vacuum-pumps-need-know/>
- [9] Pramod K. 2018. Vacuum Science, Technology and Applications. CRP Press.
- [10] Pfeiffer Vacuum. Know How. Vacuum Pumps- Working Principles and Properties. Disponible en: <https://www.pfeiffer-vacuum.com/en/know-how/vacuum-generation/>
- [11] Vac Aero International Inc. An Introduction to Vacuum Pumps. Enero 13 de 2016. Disponible en: <https://vacaero.com/information-resources/vacuum-pump-technology-education-and-training/1039-an-introduction-to-vacuum-pumps.html>
- [12] Ppi Pumps PVT. Achieve High Vacuum for Industrial Processes Using High Tech Vacuum Pumps. Disponible en: <http://www.ppipumps.com/achieve-high-vacuum-for-industrial-processes-using-high-tech-vacuum-pumps.html>
- [13] Engineering 360. Vacuum Gauges and Instruments Information. 2019. Disponible en: https://www.globalspec.com/learn-more/manufacturing_process_equipment/vacuum_equipment/vacuum_gauges
- [14] Solar Atmospheres, Inc. Understanding Vacuum and Vacuum Measurement. 2016. Disponible en: <https://solarmfg.com/wp-content/uploads/2016/02/Understanding-Vacuum-9.pdf>
- [15] Jousten K. Handbook of Vacuum Technology. (2 ed.), Wiley-Vch.
- [16] Yoshimura N. 2008. Vacuum Technology Practice for Scientific Instruments. Springer
- [17] ISO/IEC 3529:1981, Vacuum technology – Vocabulary
- [18] Kurt J. Lesker Company. Vacuum Chambers. Disponible en: <https://www.lesker.com/newweb/vacuumchambers.cfm>
- [19] Fti Controlling pressure and vacuum. CF vacuum components. Disponible en : <https://www.ftipv.com/cf-vacuum-components/>
- [20] Atlas Technologies. CF components aluminium and titanium flanges. Disponible en: <https://www.atlasuhv.com/products/aluminum-titanium-flanges/cf-flange-alss/>
- [21] Kurt J. Lesker Company. Measuring Pressure. Disponible en: https://www.lesker.com/newweb/gauges/gauges_technical-notes_1.cfm

Implementación de una Red LPWAN de Sensores para el Monitoreo de Condiciones Ambientales

William Alexis Porras Calderón^{1*}
Oscar Yazit Salah García¹

1. Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico de Gas.
Parque Tecnológico UIS Guatiguará. Km 2 vía El Refugio.

Piedecuesta, Santander, Colombia.

* wporras@cdtdegas.com

RESUMEN

Con la creciente tendencia de conectar cualquier elemento a internet y tener un control total de cualquier entorno en tiempo real, lo que en la industria se conoce como Industrial Internet of Things (IIOT), la Corporación CDT de Gas busca implementar tecnologías IIoT a sus servicios, ofreciendo a sus clientes soluciones innovadoras y competitivas en el mercado, brindando facilidades de monitoreo, prevención y reacción oportuna en diferentes entornos. Inicialmente se propone la implementación de una red inalámbrica de largo alcance que permita la monitorización de condiciones ambientales a través de sensores de material particulado de 2,5 micras de diámetro (PM 2.5), monóxido de carbono (CO), temperatura y humedad. La monitorización de estas variables se realizará únicamente con la intención de generar un flujo de datos con el fin de probar la efectividad de la conexión y el intercambio de datos de extremo a extremo de la red. A lo largo del artículo se evidenciará el desarrollo de la implementación de la red tras haber realizado previamente una revisión bibliográfica referente a las comunicaciones inalámbricas y medición de condiciones ambientales.

Palabras clave: *Internet de las cosas, LoRa, LPWAN, Redes inalámbricas, Calidad del Aire.*

ABSTRACT

With the growing tendency to connect any element to the Internet and control any environment in real time, which in the industry is known as Industrial Internet of Things (IIOT), The "Corporación CDT de Gas" seeks to implement IIoT technologies in its services, offering its clients innovative and competitive solutions in the market, providing facilities for monitoring, prevention and timely reaction in different environments. Initially, the implementation of a long-range wireless network that allows the monitoring of environmental conditions through sensors of particulate material of 2.5 microns in diameter (PM 2.5), carbon monoxide (CO), temperature and humidity is proposed, the monitoring of these variables will be carried out solely with the intention of generating a data flow in order to test the effectiveness of the connection and the exchange of data from end to end of the network. Throughout the article, the development of the implementation of the network will be evidenced after having previously carried out a bibliographic review regarding wireless communications and measurement of environmental conditions.

Keywords: *Internet of Things, LoRa, LPWAN, Wireless Networks, Air Quality.*



INTRODUCCIÓN

El monitoreo y control de magnitudes físicas de un entorno dado son, y han sido, tareas cruciales que han permitido el desarrollo de soluciones integrales a las necesidades que presentan los diferentes sectores económicos. Desde el siglo XIX se han desarrollado sistemas que realizan tareas de adquisición de datos, envío y recepción de información en comunicación con una estación central [7], ubicada a una distancia no muy alejada de los puntos de medición, de aquí nace el concepto de telemetría y ha brindado muchos beneficios, principalmente a la industria, ya que permite centralizar las mediciones de muchas estaciones, y gracias a la automatización, ejecutar una acción en función de las mediciones obtenidas.

Actualmente existe la posibilidad de centralizar todas las mediciones obtenidas en servidores conectados a internet y poder observar dichas mediciones desde cualquier lugar del mundo, por consiguiente, se ha creado una tendencia de conectar todo a internet con el fin de tener control de todo nuestro entorno, y esto es lo que conocemos hoy en día como Internet de las cosas (IoT), este concepto ha tomado gran fuerza, debido a que su fin es precisamente conectar cualquier objeto a Internet, permitiendo obtener en tiempo real mediciones o estados de dichos objetos, llevar un registro histórico de los datos obtenidos y predecir el comportamiento de dichos datos, mediante algoritmos y procesamiento, permitiendo reaccionar oportunamente a condiciones desfavorables por medio de actuadores.

La Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas (CDT de Gas), ha visto en la telemetría y el IoT una gran oportunidad para ofrecer

a sus clientes soluciones integrales, con todas las ventajas y prestaciones descritas anteriormente. Es por ello que el CDT de Gas ha decidido incursionar en el mundo del IoT, a través de las redes LPWAN (Low-Power Wide-Area Network), redes que se irán describiendo a lo largo del artículo.

Como primer contacto con esta tecnología se ha propuesto realizar una red de sensores que monitoree condiciones ambientales, realizando mediciones de temperatura, humedad relativa, material particulado menor a 2.5 micras (PM 2.5) y monóxido de carbono (CO), usando el protocolo de comunicación LoRa, uno de los tantos protocolos de comunicación en las redes LPWAN.

El objetivo principal de este proyecto es el de implementar toda la infraestructura de red, realizar pruebas de comunicación de extremo a extremo y lograr la visualización de los datos en una interfaz gráfica web, por ello los datos de calidad del aire serán usados únicamente como flujo de datos para las pruebas de conectividad de la red.

MARCO TEÓRICO

Este artículo presenta el diseño e implementación de una infraestructura de red de sensores LPWAN usando comunicación inalámbrica LoRa, que monitoree concentraciones de contaminantes del aire. Inicialmente se realiza una revisión bibliográfica de toda la terminología y temática relacionada con la red a implementar, la cual se describe a continuación.

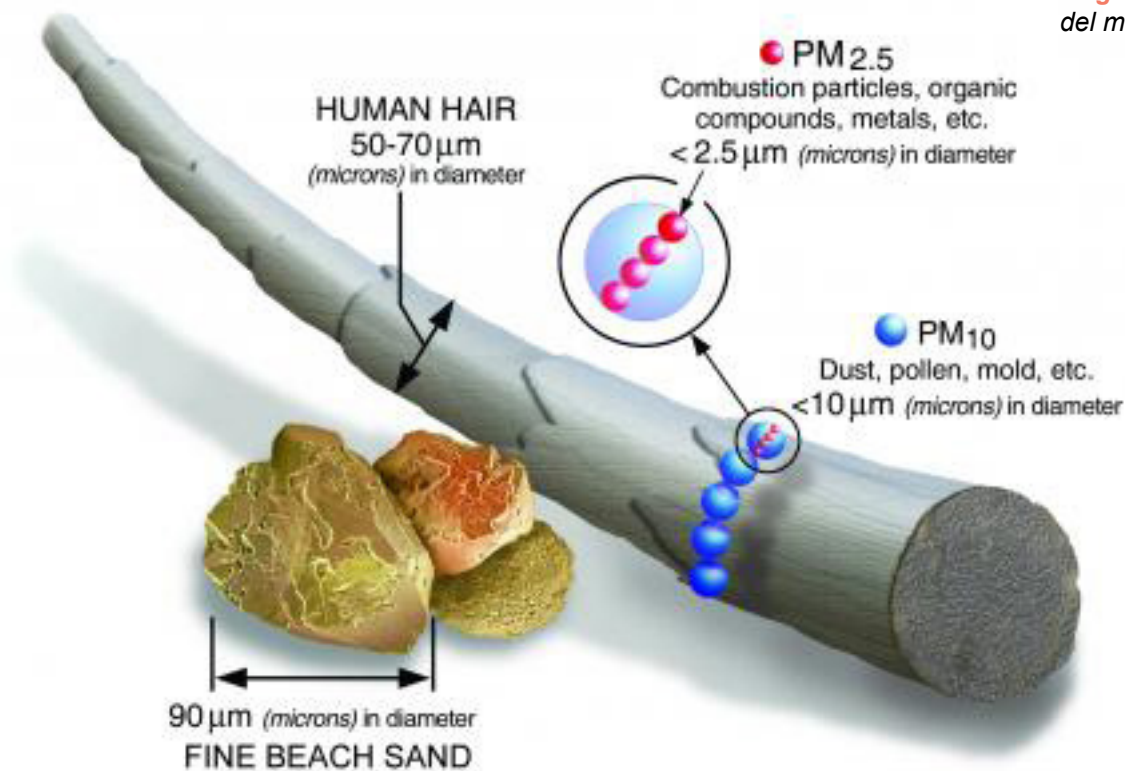


Figura 1. >> Diámetro del material particulado.
Fuente: EPA [9].

1. CALIDAD DEL AIRE

La calidad del aire está asociada a la concentración de contaminantes presentes en el aire que a diario respiramos, contaminantes altamente perjudiciales para la salud, que pueden generar afectaciones en el sistema respiratorio e incluso pueden generar problemas cardiacos si las concentraciones de los contaminantes son muy altas.

Los contaminantes más perjudiciales encontrados en el aire son [9]:

- **Material particulado (PM):** Son partículas finas inhalables, con diámetros inferiores o iguales a 10 micrómetros, lo suficientemente pequeñas para poder filtrarse fácilmente en los pulmones. Son producidas principalmente por vehículos pesados que utilizan
- diésel como combustible, que al momento de combustión generan partículas muy finas compuestas por metales pesados. El contaminante con mayor potencial de afectación, es el material particulado menor a 2,5 micras (PM 2.5).
- **Monóxido de carbono (CO):** Es un gas incoloro e inodoro que puede ser dañino si se inhala en grandes cantidades. El CO se libera cuando algo se quema. Las mayores fuentes de CO para el aire exterior son automóviles, camiones y otros vehículos o maquinarias que usan combustibles fósiles. Respirar aire con una alta concentración de CO reduce la cantidad de oxígeno que puede transportarse en el torrente sanguíneo a órganos críticos como el corazón y el cerebro.
- **Dióxido de Nitrógeno (NO₂):** Son gases altamente reactivos conocidos como óxidos de nitrógeno (NO_x). El NO₂ se genera principal-

mente en el aire por la quema de combustible, a partir de las emisiones de los automóviles, camiones, autobuses y plantas de energía. Las exposiciones prolongadas a concentraciones elevadas de NO₂ pueden contribuir al desarrollo del asma y potencialmente aumentar la susceptibilidad a las infecciones respiratorias.

Un estudio de la Organización Mundial de la Salud, revela que, una de cada ocho muertes ocurridas a nivel mundial, es ocasionada por la contaminación del aire. En Colombia, el Departamento Nacional de Planeación estimó que, durante el año 2015, la contaminación del aire estuvo asociada a 10 527 muertes y 67,8 millones de síntomas y enfermedades [4].

Es por ello que se han generado alertas para controlar, evaluar y monitorear las concentraciones de estos componentes.

2. RED INFORMÁTICA

Una red informática está comprendida por dos o más dispositivos conectados entre sí, que comparten recursos de hardware (impresoras, sistemas de almacenamiento, sistemas de audio, etc.) y software (archivos, aplicaciones, programas, etc.).

2.1. TIPOS DE REDES

2.1.1. SEGÚN SU UTILIZACIÓN:

Redes compartidas: Son aquellas redes en las que un gran número de usuarios pueden ingresar a ellas.

Redes exclusivas: Son aquellas redes que conectan dos o más puntos de manera exclusiva.

Principalmente por motivos de seguridad, velocidad o limitaciones de red.

2.1.2. SEGÚN SU PROPIEDAD:

Redes privadas: Son redes con acceso limitado a dispositivos específicos los cuales previamente fueron autorizados para acceder a la red.

Redes públicas: Son redes abiertas a cualquier dispositivo que lo solicite.

2.1.3. SEGÚN SU UBICACIÓN Y COBERTURA DE SERVICIO:

Redes de área local (LAN): Son redes de dispositivos conectados a cortas distancias, por ejemplo, una oficina.

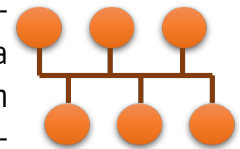
Redes de área metropolitana (MAN): Son redes más extensas que las anteriores, están formadas por varias LAN conectadas entre sí.

Redes de área amplia (WAN): cubren una zona extensa, a menudo incluso todo un país o continente.

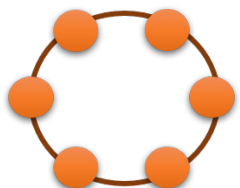
2.2. TOPOLOGÍAS DE RED

La topología de red hace referencia a forma geométrica en que los dispositivos de la red están conectados entre sí.

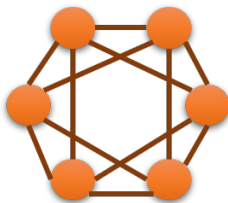
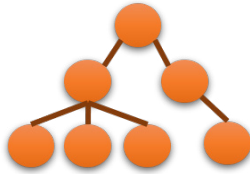
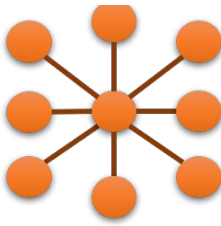
- **Configuración en bus:** todos los ordenadores de la red están conectados a un único canal de comunicaciones.



- **Configuración en anillo:** los ordenadores se comunican en forma circular, de manera que cada uno está conectado al siguiente y al anterior.



- **Configuración en estrella:** todos los ordenadores están conectados a un mismo servidor central y las comunicaciones se realizan a través de él.
- **Configuración en árbol:** similar a una serie de estrellas interconectadas entre sí.
- **Configuración en malla:** en este tipo de red, todos los ordenadores están conectados entre sí punto a punto, lo que permite que cada equipo pueda comunicarse en paralelo con otro en caso necesario.



tipo de ondas para transmitir datos análogos o digitales a través del espectro electromagnético, más específicamente en el rango de las radiofrecuencias (8 kHz – 300 GHz).

Una característica importante de las ondas electromagnéticas dentro del rango de las radiofrecuencias es que son radiaciones no ionizantes, adicionalmente los entes gubernamentales regulan la potencia de propagación de este tipo de ondas, con el fin de evitar un impacto negativo en la salud de los seres vivos. La distancia de comunicación que permite un enlace inalámbrico es limitada debido a las pérdidas por espacio libre, línea de vista, potencia de transmisión y sensibilidad del receptor.

3.1. ZONA DE FRESNEL

Es una zona de forma elíptica generada alrededor de la línea de vista directa entre un enlace de comunicación inalámbrica punto a punto. Cualquier objeto dentro de la zona de Fresnel de un enlace puede degradar la señal por reflexión.

El radio máximo de la zona de Fresnel de un enlace de comunicación está dado por:

3. COMUNICACIÓN INALÁMBRICA

Las comunicaciones inalámbricas son posibles gracias a las ondas electromagnéticas, ondas que se propagan a través del espacio libre transportando energía a la velocidad de la luz [3]. Se aprovecha el principio de propagación de este

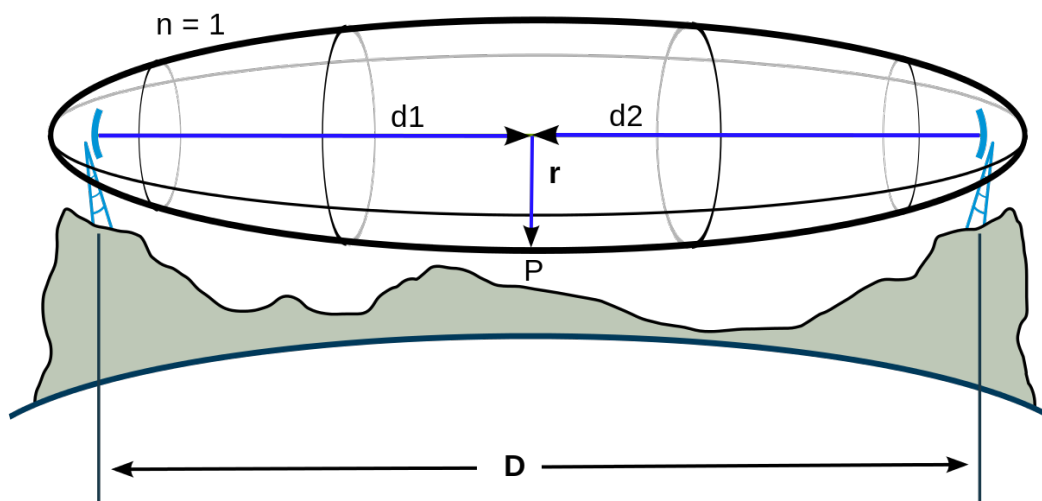


Figura 2. >> Zona de Fresnel. Fuente: Josiah McClurg.

$$r = 8,657 \sqrt{\frac{D}{F}}$$

Donde,

- r = radio, en metros (m).
- D = distancia, en kilómetros (km) (d1=d2, D=d1+d2).
- F = frecuencia de transmisión, en Giga hercios (GHz).

Una obstaculización inferior al 40% del área de la zona de Fresnel no genera afecciones significantes a la señal, mayor al 40% las pérdidas son considerables.

4. RED LPWAN

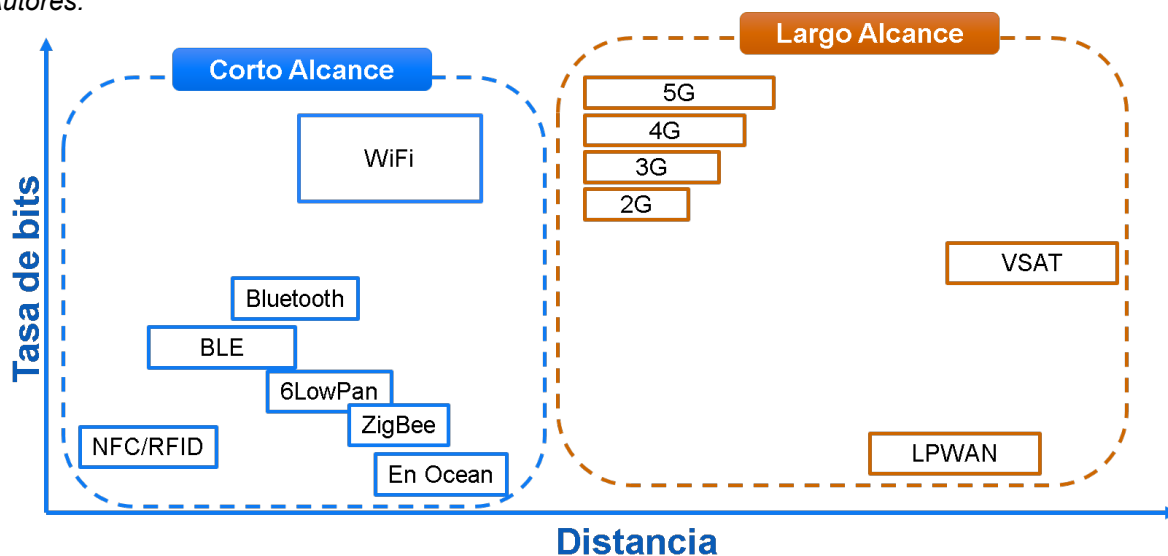
Del inglés Low-Power Wide-Area Network, es un tipo de red de telecomunicaciones inalámbricas, diseñada para permitir comunicaciones de hasta más de 10 kilómetros de distancia con lí-

nea de vista y con una tasa de transferencia de datos baja, entre los 100 bps y los 200 kbps [8].

4.1. CARACTERÍSTICAS

- **Largo alcance.** La distancia de comunicación entre dispositivos varía desde unos pocos kilómetros en áreas urbanas hasta más de 10 km en entornos rurales.
- **Bajo consumo de energía.** Redes optimizadas para un bajo consumo de energía, los módulos de comunicación (transceptores) LPWAN pueden funcionar con baterías pequeñas y económicas durante años.
- **Bajo costo.** Los protocolos de bajo consumo de recursos y su largo alcance combinado con una topología en estrella o malla, reducen la complejidad en el diseño de hardware e infraestructura de red y reducen los costos de implementación.
- **Tasa de bits y ciclo de trabajo.** El ambiente o entorno en donde se implementan las redes LPWAN se caracterizan por que la variación de las mediciones obtenidas fluctúa gradualmente en el transcurso del tiempo,

Figura 3. >> Comparativa de tecnologías inalámbricas.
Fuente: Autores.



gracias a ello es posible reducir la tasa de bits de la red y el ciclo de trabajo de los nodos sensores a alrededor del 1%.

- **Escalabilidad.** Una red LPWAN debe ser escalable, ya que este tipo de redes, usualmente, presentan un crecimiento considerable en un lapso de tiempo corto, por ende, todos sus dispositivos de red, principalmente el gateway y el servidor, deben ser capaces de soportar el incremento de flujo de información o brindar la facilidad de acoplar nuevos dispositivos que permitan escalar la red.

Estas características diferencian a las redes LPWAN de otras tecnologías inalámbricas como Wi-Fi, Bluetooth, redes celular (GSM-3G-4G) y Zigbee [5].

4.2. ARQUITECTURA DE RED LPWAN

La arquitectura de una red LPWAN se basa en topología tipo estrella, es decir, muchos dispositivos finales, también llamados nodos, se comunican directamente con un dispositivo central, el cual tiene funciones de enrutamiento para direccionar toda la información suministrada por los nodos, a una estación base o servidor, esta estación le brinda al administrador de red la capacidad de instrumentar, monitorear y ejecutar acciones ante eventos y fenómenos en un entorno especificado.

4.2.1. COMPONENTES DE LA RED

Hay tres componentes básicos en una red de sensores:

- Un conjunto de dispositivos, llamados **nodos**, equipados con sensores, módulos de procesamiento y módulos de comunicación, normalmente inalámbrica, distribuidos en un área específica.
- Uno o más puntos centrales de agrupamiento

de información, normalmente conocido como **gateway**.

- Una **estación base** compuesta por un conjunto de recursos informáticos en el punto central, o más allá, para controlar estados de los dispositivos, manejar correlación de datos, tendencias de eventos, consulta de estados, minería de datos, etc.

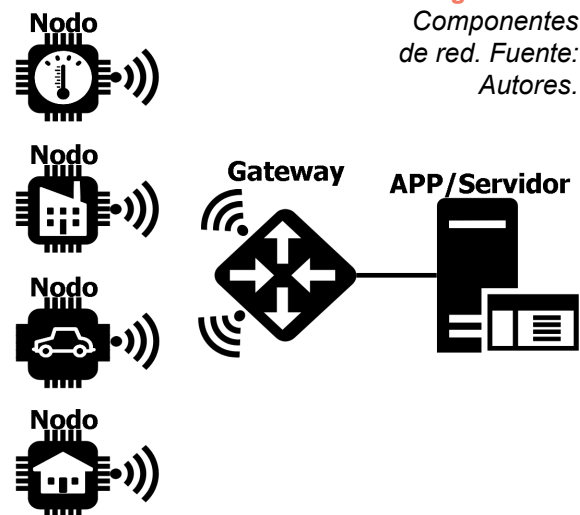
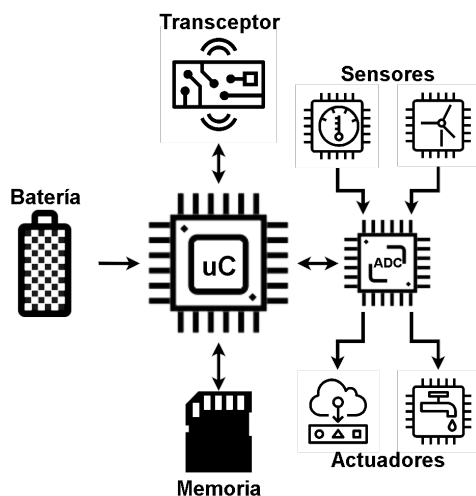


Figura 2. >>
Componentes de red. Fuente: Autores.

4.2.1.1. NODO SENSOR

Los nodos sensores se encargan de medir variables físicas en un entorno determinado con gran detalle, además, realizan procesamiento de datos, ejecutan alguna acción mediante actuadores y se comunican, normalmente de manera inalámbrica, con el Gateway a través de un transceptor. En su arquitectura más básica, se componen de un microcontrolador, una fuente de alimentación, una memoria interna o externa, un módulo de comunicación o transceptor y una variedad de sensores y actuadores.

Figura 5. >> Estructura de nodo sensor. Fuente: Autores.



4.2.1.2. GATEWAY

Para poder visualizar los datos obtenidos por los nodos sensores a través de un aplicativo, primero se debe centralizar toda la información y establecer un medio de comunicación entre los nodos sensores y el aplicativo. Para esto sirve el gateway o nodo central.

El gateway periódicamente realizará consultas para comprobar el estado de la red y recogerá la información recolectada por los sensores, para posteriormente enviarlas hacia un servidor a través de protocolos como TCP/IP.

4.3. TECNOLOGÍAS DE COMUNICACIÓN LPWAN

Las tecnologías de comunicación más usadas en las redes LPWAN son LoRa, Sigfox y NB-IoT. Éstas fueron diseñadas para permitir desplegar una red de sensores con las características anteriormente descritas en las redes LPWAN, todas ellas difieren una de la otra en cuanto a su funcionamiento y método de implementación.

Las principales diferencias entre estas tecnologías se presentan en la Tabla 1 y la Figura 4.

4.3.1. LORA (LONG RANGE)

LoRa es una de las tecnologías de comunicación inalámbrica usadas en las redes LPWAN,

Tabla 1. >> Comparación de tecnologías de comunicación LPWAN. Adaptado de [8].

	Sigfox	LoRa	NB-IoT
Modulación	BPSK	CSS	QPSK
Frecuencia	433, 868, 915 MHz	433, 868, 915 MHz	LTE Frecuencia licenciada
Ancho de banda	200 Hz	125-250-500 kHz	200 kHz
Tasa de bits	100 bps	50 kbps	200 kbps
Mensajes/día (máx)	140 (UL), 4 (DL)	Ilimitado	Ilimitado
Tamaño máximo del <i>payload</i>	12 bytes (UL), 8 bytes (DL)	243 bytes	1600 bytes
Distancia	10 km (urbano), 40 km (rural)	5 km (urbano), 20 km (rural)	1 km (urbano), 10 km (rural)
Inmunidad a la interferencia	Muy alto	Muy alto	Baja
Tasa de bits adaptable	No	Sí	No
Redes privadas	No	Sí	No

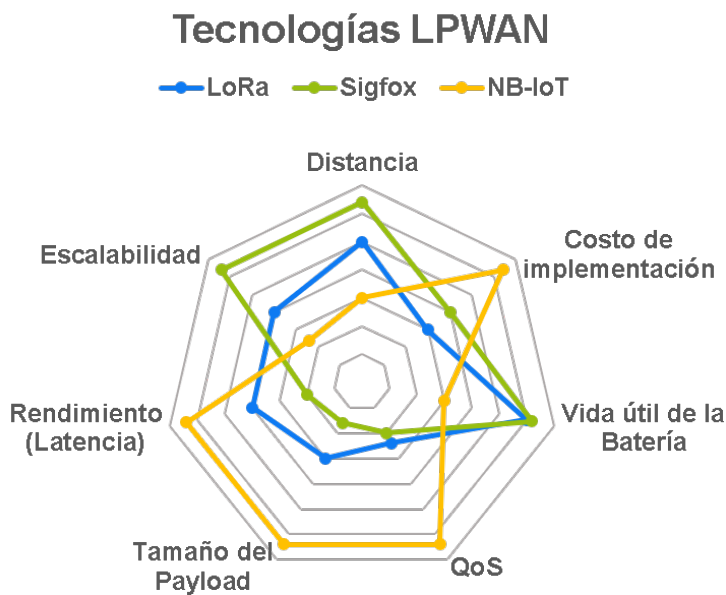


Figura 6. >> Tecnologías de comunicación de redes LPWAN. Adaptado de [8].

para dispositivos de bajo consumo energético y comunicaciones a largas distancias (mayor a 5 km).

Dentro de la terminología del protocolo de comunicación LoRa encontramos dos términos principales en los cuales se establecen los procedimientos, protocolos y estándares para permitir una comunicación con las características de una red LPWAN, ellos son: LoRa y LoRaWAN. Siendo LoRa la capa física del protocolo de comunicación y LoRaWAN el stack de protocolos a nivel de enlace de datos.

4.3.1.3. LORA (CAPA FÍSICA)

LoRa es la capa física de la tecnología de comunicación, lo que hace referencia a todo método de conversión de señales digitales o análogas a señales físicas que puedan ser transmitidas por un medio de comunicación físico, en este caso en específico, datos binarios transmitidos como ondas electromagnéticas no ionizantes a través del espacio libre (medio), viajando a la velocidad de la luz [1].

LoRa también comprende todo método de modulación, demodulación y encriptación de los datos para establecer una comunicación segura de transmisor a receptor. La modulación LoRa está basada en la modulación Chirp Spread Spectrum (CSS).

CSS es una técnica de modulación de espectro ensanchado que utiliza pulsos llamados chirridos o chirps para codificar la información. Un chirp es un tono en donde la frecuencia aumenta (up-chirp) o disminuye (down-chirp) en el tiempo.

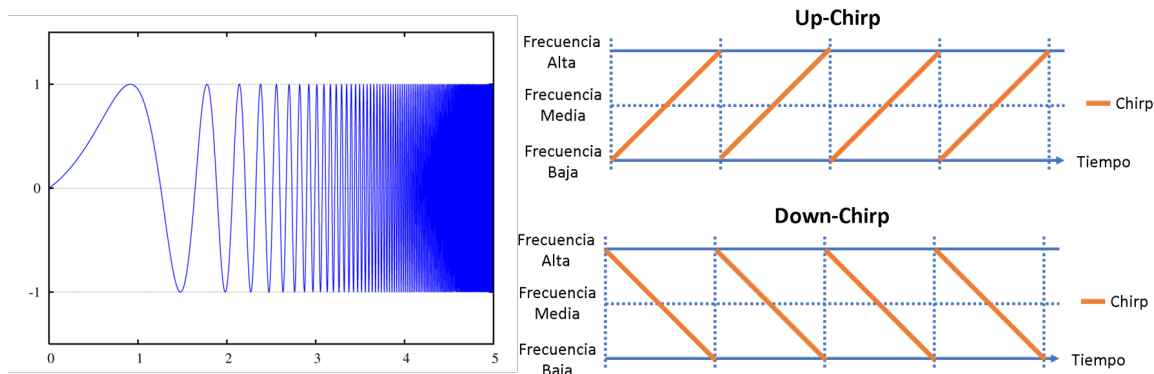
4.3.1.3.1. ANCHO DE BANDA

Como se muestra en la Tabla 1, LoRa usa tres anchos de banda, 125 kHz, 250 kHz y 500 kHz. Cada chirp generado durante la comunicación usa la totalidad del ancho de banda.

4.3.1.3.2. FACTOR DE PROPAGACIÓN (SF - SPREADING FACTOR)

El factor de propagación es la duración del chirp en el aire. LoRa opera con factores de propaga-

Figura 7. >> Chirp. Fuente: Autores.



ción del 7 al 12, donde, SF7 es el tiempo más corto en el aire y SF12 el más largo.

Cuanto mayor sea el factor de propagación, mayor será la distancia posible de comunicación, pero la cantidad de datos a transmitir serán limitados, tal y como se aprecia en la Tabla 2.

4.3.1.3.3. VELOCIDAD DE DATOS (DR - DATA RATE)

LoRa usa diferentes rangos de frecuencias, factores de propagación y anchos de banda según la ubicación en donde se implementen, cada

país establece los parámetros de transmisión para esta tecnología de comunicación. Específicamente para Colombia, las comunicaciones con tecnología LoRa se deben encontrar en el rango de frecuencias de los 915 MHz. Para la mayoría de países del continente americano como Estados Unidos y Colombia se usan las siguientes configuraciones:

4.3.1.4. LORAWAN

LoRaWAN es un conjunto de protocolos de red de baja potencia y área amplia diseñado para conectar “cosas” operadas por batería a inter-

Tabla 2. >> Configuraciones de comunicación LoRa. Adaptado de [2].

Velocidad de los datos (DR)	Configuración	bits/s	Tamaño máximo (bits)
DR0	SF10/125 kHz	980	19
DR1	SF9/125 kHz	1 760	61
DR2	SF8/125 kHz	3 125	133
DR3	SF7/125 kHz	5 470	250
DR4	SF8/500 kHz	12 500	250
DR8	SF12/500 kHz	980	41
DR9	SF11/500 kHz	1 760	117
DR10	SF10/500 kHz	3 900	230
DR11	SF9/500 kHz	7 000	230
DR12	SF8/500 kHz	12 500	230
DR13	SF7/500 kHz	21 900	230

net, cumpliendo con los requisitos clave de internet de las cosas (IoT), como comunicación bidireccional, servicios de comunicación, seguridad punto a punto, movilidad y localización.

LoRaWAN define el protocolo de comunicación y la arquitectura del sistema para la red, principalmente usando arquitectura de red tipo estrella.

El protocolo y la arquitectura de la red tienen la mayor influencia en la determinación de la vida útil de la batería de un nodo, la capacidad de la red, la calidad del servicio, la seguridad y la variedad de aplicaciones a las que da servicio la red [6].

Todo el stack de protocolos que comprende LoRaWAN es estandarizado por la entidad sin ánimo de lucro "LoRa Alliance".

4.3.1.5. CLASES DE DISPOSITIVOS LORA

4.3.1.5.1. CLASE A

Todo dispositivo LoRa debe soportar la configuración clase A, la cual consiste en comunicación bidireccional a través de tres ventanas de enlace, la primera ventana (ventana de transmisión) se utiliza para enviar datos desde el nodo hacia el servidor o APP (uplink), la segunda y tercera ventanas (ventana de recepción) se utilizan para recibir datos provenientes desde el servidor o APP (downlink), solo una de estas dos ventanas de recepción será la que reciba la información proveniente desde el servidor o la APP, si se obtuvo alguna información en la primera ventana de recepción, no habrá una segunda ventana de recepción.

La clase A es la configuración óptima para el máximo ahorro de consumo energético ya que

el nodo se encontrará la mayor parte del tiempo de funcionamiento en modo "sleep", en este modo el dispositivo no realiza ninguna comunicación a la red y sus periféricos se encontrarán desactivados. Cada cierto intervalo de tiempo el dispositivo saldrá del estado "sleep" y realizará la comunicación de las tres ventanas comentadas anteriormente.

4.3.1.5.2. CLASE B

El funcionamiento de los dispositivos clase B es igual a los dispositivos clase A, con la diferencia de que estos dispositivos generan ventanas de recepción adicionales cada cierto intervalo de tiempo para recibir datos provenientes del servidor o APP con mayor frecuencia.

4.3.1.5.3. CLASE C

Los dispositivos clase C están pensados para aplicaciones en donde el nodo se encontrará alimentado directamente a la red eléctrica local, debido a que las ventanas de transmisión y recepción estarán siempre activas y no existirá el estado "sleep", por lo cual, el consumo eléctrico será mucho mayor.

METODOLOGÍA

Para realizar la implementación de la infraestructura de red LPWAN usando comunicación LoRa se llevaron a cabo las siguientes actividades:

1. **Revisión bibliográfica y adquisición de conocimientos**

En esta etapa se revisó la documentación disponible en cuanto a calidad del aire, telecomunicaciones, redes de sensores, telemetría, redes LPWAN, comunicaciones inalámbricas y demás temas relacionados para

garantizar una correcta implementación de la red. El resumen de esta revisión bibliográfica se describe en la sección de Marco Teórico de este artículo.

2. Diseño de red, hardware y software

Partiendo de la topología básica de una red LPWAN, en la cual se usa la configuración en estrella, donde los nodos finales se comunican con un nodo centralizador y a través de un conjunto de servicios informáticos ubicados en un servidor, se realiza la visualización de la información recolectada y adicionalmente todo tipo de procesamiento de datos, se realiza el siguiente esquema de infraestructura de red.

El flujo de la información inicia en los nodos, los cuales obtendrán información de la calidad del aire, monitoreando concentraciones de PM 2.5, monóxido de carbono, temperatura y humedad. Estos datos se enviarán a través de comunicación LoRa hacia un gateway LoRa, el cual centralizará la información de todos los nodos y los enviará por TCP/IP usando el protocolo de comunicación MQTT hacia una máquina virtual en la nube. Esta máquina virtual o servidor ser-

virá como “broker MQTT” para que, mediante el sistema de publicaciones y suscripciones de este protocolo, pueda recibir la información de manera organizada, diferenciando los datos de cada uno de los nodos, adicionalmente se configuraron los servicios que permitirán la visualización y el procesamiento de los datos recolectados.

2.1. NODO

El nodo tendrá la función de servir como recolector de información, para este caso en específico, será un dispositivo capaz de medir concentraciones y niveles de material particulado de 2.5 micras, monóxido de carbono, temperatura y humedad, adicionalmente tendrá la capacidad de establecer un enlace a través de comunicación inalámbrica LoRa con un gateway para enviar toda la información obtenida.

El nodo desarrollado funcionará con configuración en clase A, con intervalos de operación cada 15 minutos, factor de propagación 8 con un ancho de banda de 125 kHz.

El nodo contará con los siguientes componen-

Figura 8. >>
 Diseño de red LPWAN.
 Fuente: Autores.

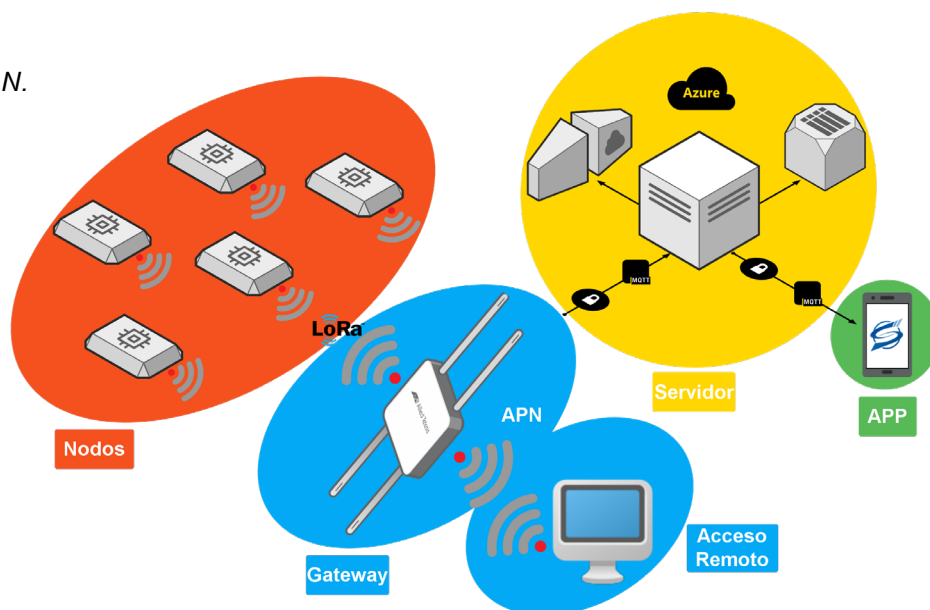
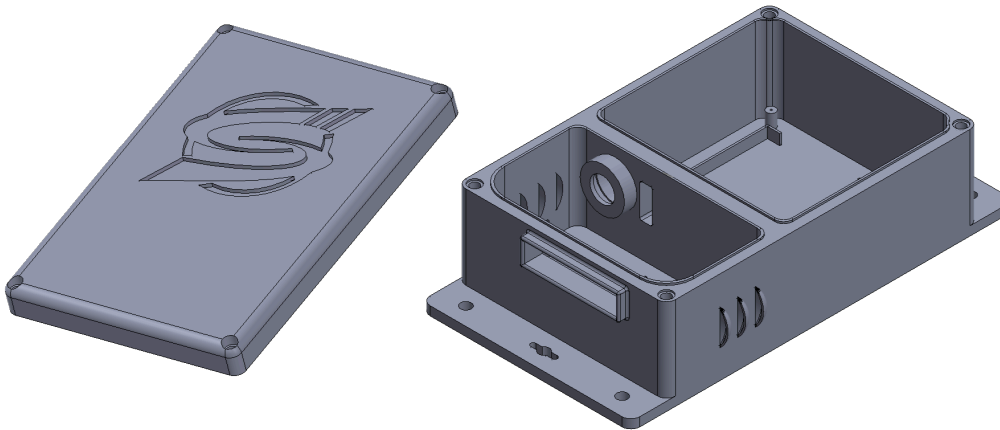


Figura 9. >> Carcasa del nodo.
Fuente: Autores.



tes:

- **Procesador:** SAM D21 – 48 MHz.
- **Memoria Flash:** 256 kb.
- **Comunicación:** UART, SPI, I2C.
- **Transceptor LoRa:** SX1276 a 915 MHz.
- **Sensores:** PM 2.5 (DN7C3CA007 Sharp), CO (ME2-CO Winsen), temperatura y humedad (SI7021 Silicon Labs).
- **Actuadores:** 2 LEDs de señalización y una pantalla OLED de 0,96 pulgadas.
- **Carcasa:** impermeable impresa en material ABS, diseñada en Solidworks.
- **Batería:** LiPo 3,7 VDC y panel solar de 6 VDC.

2.2. GATEWAY

El gateway centralizará toda la información de los nodos y la enviará hacia un servidor en Internet, este gateway tendrá las siguientes características:

- **Procesador:** ARM9 – 400 MHz.
- **Sistema Operativo:** Linux 3.12.
- **Transceptor:** SX1301 – 8 Canales – 915 MHz.
- **Alimentación eléctrica:** PoE 48 VDC 25 W.
- **Comunicación WAN:** ethernet y celular.
- **Carcasa:** IP67 Outdoor.

El gateway cuenta con servicios FTP, SSH, No-

de-Red, WEB y MQTT, los cuales permitirán el enrutamiento de los datos recibidos a través de comunicación LoRa hacia el servidor en internet por medio del protocolo TCP/IP.

2.3. SERVIDOR

Para el servidor se usa una máquina virtual en la nube con sistema operativo Ubuntu Server. En este servidor se configuran los mismos servicios que en el gateway para así establecer una comunicación bidireccional usando los mismos protocolos de comunicación.

3. ACOPLAMIENTO DE LOS COMPONENTES DE LA RED

Los nodos se comunicarán con el gateway usando el protocolo LoRa. En este protocolo se generan dos llaves encriptadas, una para la red y otra para la aplicación, además cada transceptor tiene un código único, similar a una MAC, llamado EUI. El EUI del nodo y las llaves de encriptación son registradas en el gateway de manera automática o manual dentro de la base de datos del gateway antes de realizar la comunicación. Dentro del nodo también se configura el EUI del transceptor del gateway junto con las llaves de

red y de aplicación. Al encender el nodo, este intentará establecer comunicación con el gateway enviando su EUI y las llaves registradas, con estas credenciales el gateway verifica si puede permitir la comunicación con el nodo, de esta manera se mantiene la red privada, permitiendo la comunicación de datos únicamente con dispositivos autorizados. Posteriormente a la autenticación de los nodos en la red se logran observar todos los datos recolectados por los sensores en el gateway, por lo cual se procede a establecer el enrutamiento de los datos centralizados hacia el servidor a través del protocolo TCP/IP por medio del sistema de publicaciones y suscripciones de MQTT. Finalmente, en el servidor se configura un panel de control a través de una página web para permitir la visualización en tiempo real de los datos obtenidos por el nodo. En el panel de control adicionalmente se configuran dos interruptores ON/OFF que permitirán probar la comunicación downlink encendiendo o apagando los LEDs integrados en el nodo.

RESULTADOS

Para verificar el correcto funcionamiento de la red y sus dispositivos, se realizaron pruebas de cobertura, integridad de los datos, seguridad y resistencia de los materiales en condiciones reales.

1. Prueba de cobertura

Para la prueba de cobertura de comunicación LoRa punto a punto, se ubicó el gateway en la terraza de la sede administrativa del CDT de Gas, ubicada en el barrio Provenza de la ciudad de Bucaramanga, más específicamente en las coordenadas 7.084653, -73.113639, a una altura de 10 metros res-

Figura 10. >> Gateway LoRa CDT. Fuente: Autores.



pecto al nivel del suelo. Se estableció una ruta de un radio de aproximadamente 5 kilómetros de distancia respecto a la posición del gateway.

Durante el test drive se intentaba establecer comunicación con el gateway usando diferentes configuraciones de factor de propagación y niveles de potencia de la señal, como resultado se obtuvo el mapa de calor que se puede apreciar en la Figura 10, donde se grafica la fuerza de la señal en dBm en cada punto de medición.

Las mediciones de fuerza de la señal se realizaban a dos metros del nivel del suelo a excepción de un punto a una altura de 35 metros respecto el suelo, con línea de vista directa, una obstaculización inferior al 40% y a una distancia de 1,88 Km entre el gateway y el nodo, en la cual se obtuvieron como re-

sultado potencias de señal superiores a los -80 dBm. Las mediciones cercanas a este punto a una altura de unos 2 metros y una mayor obstaculización de la zona de Fresnel debida a las edificaciones, reportaron enlaces de comunicación con potencias inferiores a los -95 dBm, por lo cual, se evidencia el gran impacto de las obstaculizaciones dentro de la zona de Fresnel en el enlace de comunicación punto a punto.

El punto más lejano en donde se logró establecer comunicación fue en el viaducto provincial, más conocido como "Puente de la novena" ubicado a 3,16 Km del gateway.

2. Prueba de permeabilidad, duración de la batería y resistencia del material del nodo

La carcasa del nodo se diseñó en el software SolidWorks y se imprimió en una impresora 3D con material ABS, dentro del diseño se implementó un sistema de empaques con O-rings para evitar el ingreso de agua o humedad al interior del nodo, los cuales pueden provocar degradación del circuito electrónico o corto circuito en las conexio-

nes internas.

La prueba consistió en ubicar el nodo en un lugar exterior a la intemperie durante un lapso de una semana (26/02/2019 – 05/03/2019) enviando datos de calidad del aire cada 15 minutos.

Durante esta semana el nodo transmitió y funcionó sin problema alguno, a pesar que hubo días de lluvia con fuertes vientos, no se presentó ninguna filtración de agua u otro agente exterior que pudiera ocasionar algún malfuncionamiento en el nodo.

A continuación, se presentan los datos obtenidos por el nodo:

Como se puede observar en las gráficas, hubo una comunicación constante sin interrupciones durante todo el periodo de prueba, a pesar de los días nublados y las lluvias que se presentaron en estas fechas.

Partiendo de la Figura 18, se observa cómo el nodo se mantuvo dentro del rango de voltaje

Figura 11. >> Mapa de calor de cobertura. Fuente: Autores.

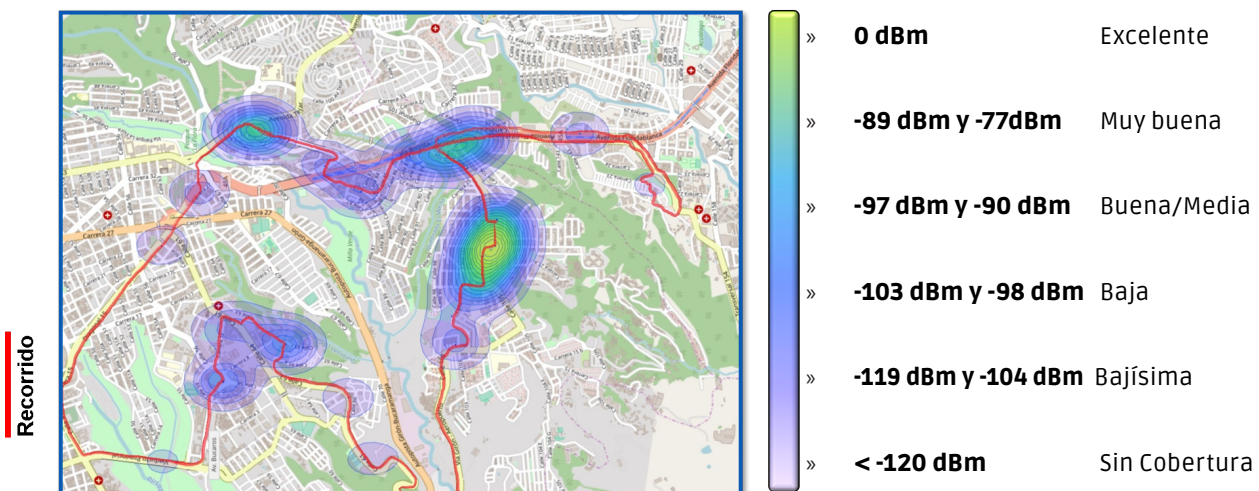


Figura 12. >>

Máxima distancia de comunicación alcanzada. Fuente: Autores.



necesario para su operación siendo 4 V el voltaje máximo de carga y 3 V el voltaje mínimo de operación.

De la Figura 15 se puede apreciar que durante las horas pico de tránsito vehicular (de 6 A.M. a 8 A.M. y de 5 P.M. a 8 P.M.) las concentraciones de monóxido de carbono fueron más elevadas, por lo cual se infiere que las emisiones de contaminación generada por los vehículos ayudan al desarrollo de afecciones respiratorias y cardiacas en los seres humanos.

Las mediciones del sensor de PM 2.5 usado parecen ir muy ligadas a la humedad y temperatura del ambiente, pero según la revisión bibliográfica las mediciones del sensor usado no son muy veraces, la tecnología de estos sensores de bajo costo aún está en desarrollo, por ello no pueden ser usados aún como medidores de referencia.

Figura 13. >> Ubicación del nodo sensor. Fuente: Autores.



CONCLUSIONES

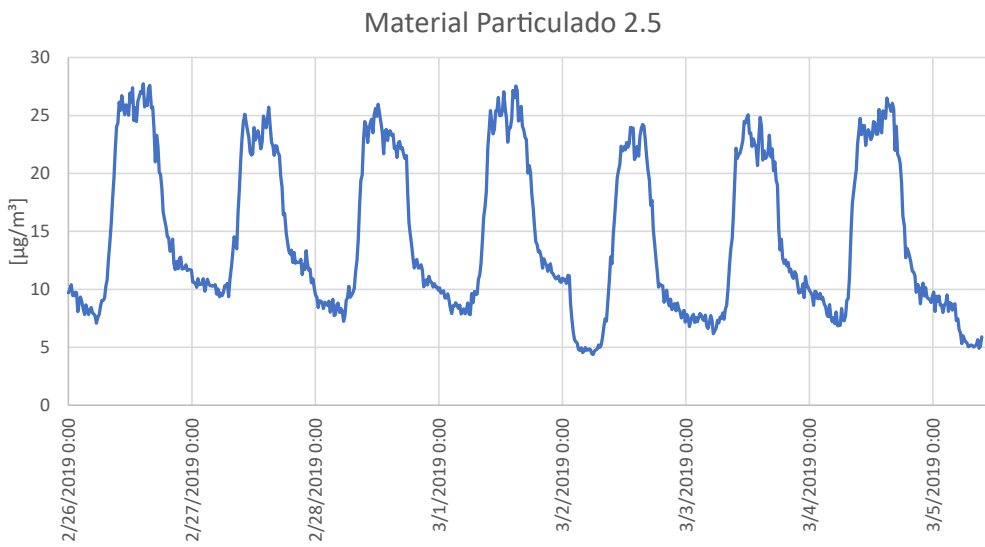


Figura 14. >>
Gráfico de PM 2.5.
Fuente: Autores.

Figura 15. >>
Gráfico de CO.
Fuente: Autores.

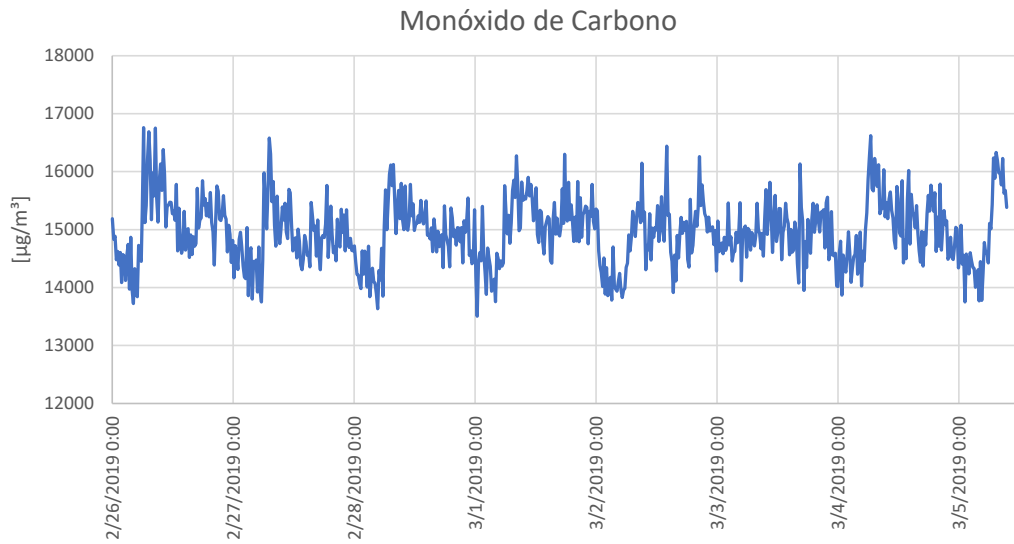


Figura 16. >>
Gráfico de Temperatura.
Fuente: Autores.

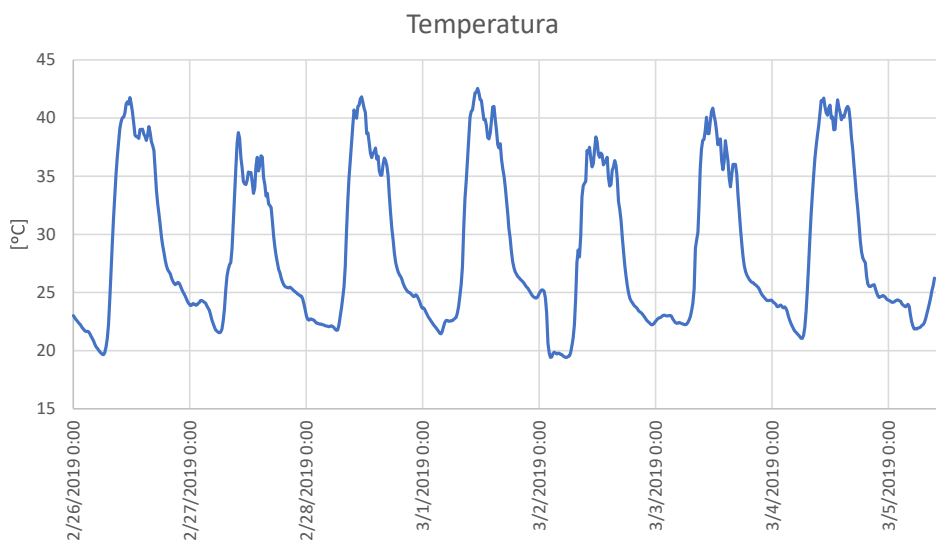


Figura 16. >>
Gráfico de Temperatura.
Fuente: Autores.

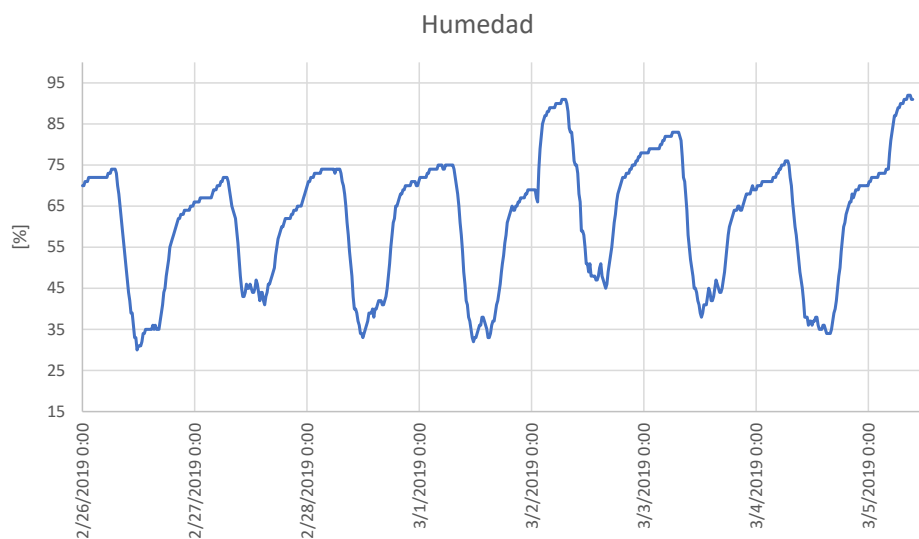
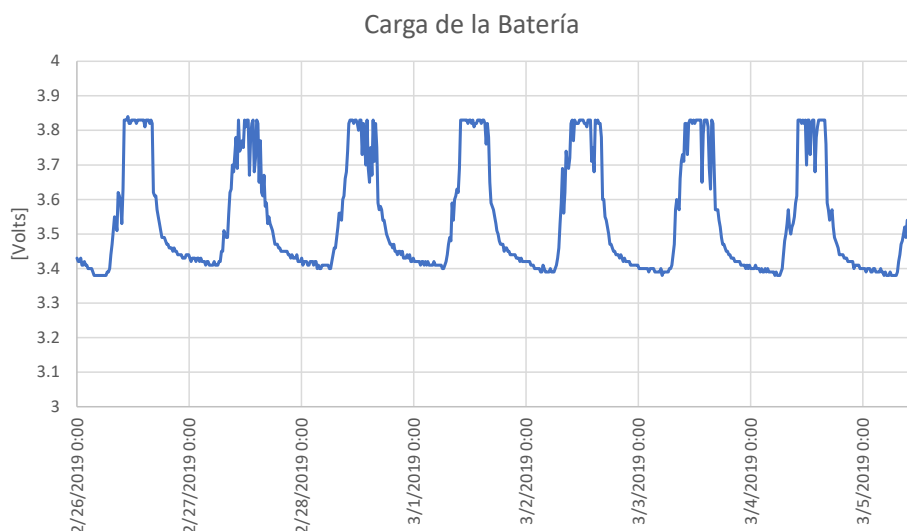


Figura 17. >>
Gráfico de Humedad.
Fuente: Autores.

Figura 18. >>
Gráfico de Carga de la Batería. Fuente: Autores.



La Corporación CDT de Gas incursiona en las redes IoT, para brindar a sus clientes soluciones integrales de telemetría, control y automatización de procesos en tiempo real.

Las redes LPWAN se encuentran en un estado de desarrollo bastante maduro, ideal para implementar en procesos industriales de telemetría, además con las nuevas herramientas de Big Data e inteligencia artificial que se están desarrollando actualmente, ir más allá de solo obtener los datos y lograr procesar estos datos para lograr beneficios adicionales, cosa que se

espera implementar en trabajos futuros.

En el momento de implementación de las redes, es importante tener en cuenta la altura de las antenas y la obstaculización del enlace, para así lograr comunicaciones con mayor cobertura.

El protocolo de comunicación LoRa permite tener un mayor control de toda la infraestructura de red, además la adaptación de la velocidad de transferencia de los datos (ADR), permite crear diferentes configuraciones de comunicación para poder incrementar aún más la cobertura

de comunicación.

Dependiendo de la solución a proponer se pueden implementar otros protocolos de comunicación que cumplan con las necesidades requeridas y superen con facilidad las limitantes del entorno donde se implementará.

Algunos de los sensores de bajo costo en el mercado actual aún no llegan a cumplir con los estándares establecidos por los entes regulatorios para validar oficialmente sus mediciones, pero con el avance tecnológico y la creciente demanda de este tipo de sensores para aplicaciones de bajo costo, las prestaciones y calidad de estos sensores está mejorando rápidamente, por lo cual, dentro de no mucho se espera que existan sensores que puedan suministrar mediciones válidas y fiables que cumplan con todos los requerimientos establecidos por los entes regulatorios.

Gracias al bajo consumo de los módulos de comunicación LPWAN y los modos Sleep y Deep Sleep de los microcontroladores usados, se logró mantener el nodo en funcionamiento con una alimentación eléctrica óptima conformada por un panel solar de 6 W y una batería LiPo de 3,7 VDC. Se podría usar un panel y una batería de menores características y menor tamaño ajustando la frecuencia de transmisión de los datos y usando sensores de menor consumo.

La impresión 3D usando material ABS para la carcasa, resistió a la prueba del nodo ubicándolo a la intemperie durante el periodo de prueba, pero es posible que durante un periodo mucho más prolongado el material se logre degradar, por ello es recomendable usar materiales más resistentes para aplicaciones en donde los dispositivos se encuentren en exteriores.

REFERENCIAS

- [1] Altgelt C. The world's Largest "Radio" Station. Octubre 20, 2005. Disponible en: <https://www.hep.wisc.edu/~prepost/ELF.pdf>. Accedido marzo 18, 2019.
- [2] Exploratory Engineering. Data Rate and Spreading Factor. 2008. Disponible en: https://docs.exploratory.engineering/lora/dr_sf/. Accedido marzo 20, 2019.
- [3] Gandía S, Melía J. 1991. La teledetección en el seguimiento de los fenómenos naturales. Universidad de Valencia.
- [4] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM. 2014. Calidad del Aire. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/web/contaminacion-y-calidad-ambiental/calidad-del-aire>. Accedido marzo 21, 2019.
- [5] La Rosa A. LPWAN como base de comunicaciones para IoT. septiembre 20, 2018. Disponible en: <https://blog.pandorafms.org/es/que-es-lpwan/>. Accedido febrero 20, 2019.
- [6] LoRa Alliance. LoRaWAN what is it? A technical overview of LoRa and LoRaWAN. Noviembre, 2015. Disponible en: <https://lora-alliance.org/sites/default/files/2018-04/what-is-lorawan.pdf>. Accedido marzo 18, 2019.
- [7] Mayo-Wells. 1963. "The Origins of Space Telemetry", Technology and Culture.
- [8] Mekkia K, Bajica E, Chaxela F, Meyerb F. 2017. A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment. ICT Express 5(1): 1-7
- [9] United States Environmental Protection Agency. 2018. Particulate Matter (PM) Basics. Disponible en: <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics#PM>. Accedido febrero 18, 2019.



Gracias

**Por las oportunidades
Las cuales hemos convertido en
Soluciones Tecnológicas
OPORTUNAS Y CONFIABLES**