

**ANÁLISIS CONCEPTUAL DE LA INTERCAMBIABILIDAD DE GASES EN LA
INDUSTRIA DEL GAS Y SU RELEVANCIA EN EL MARCO REGULATORIO
COLOMBIANO**

IVONNE CAROLINA OLARTE GÓMEZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUIMICA
ESCUELA INGENIERIA DE PETROLEOS
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA DEL GAS
BUCARAMANGA**

2017

**ANÁLISIS CONCEPTUAL DE LA INTERCAMBIABILIDAD DE GASES EN LA
INDUSTRIA DEL GAS Y SU RELEVANCIA EN EL MARCO REGULATORIO
COLOMBIANO**

IVONNE CAROLINA OLARTE GÓMEZ

**Trabajo de Grado para optar al título de
Especialista en Ingeniería del Gas**

DIRECTOR:

Julio Cesar Pérez Angulo

Especialista en ingeniería del gas

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUIMICA
ESCUELA INGENIERIA DE PETROLEOS
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA DEL GAS
BUCARAMANGA**

2017

AGRADECIMIENTOS

La presente monografía va dedicada de manera especial, a mi padre e Ingeniero de Petróleos Ariel Olarte Rodríguez, por su ayuda, apoyo constante y sus consejos los cuales fueron de gran fortaleza y ánimo durante toda la especialización y en la realización del presente estudio, además de transmitirme sus enseñanzas las cuales me permitieron crecer como persona, como ingeniera y especialista en gas.

Quiero agradecer a mis docentes, por todo el apoyo que me brindaron, pero de manera especial al Ingeniero Julio César Pérez, quien fue también mi director de tesis y estuvo disponible colaborándome durante todo el trayecto de la especialización.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN

1. FUNDAMENTOS DE LA INTERCAMBIABILIDAD DE GASES.....	18
1.1. IMPORTANCIA DE LA INTERCAMBIABILIDAD EN GASES	18
1.2. RECUENTO HISTÓRICO.....	18
1.3. CARACTERÍSTICAS ASOCIADAS A GASES NATURALES	20
1.4. PRINCIPALES PARÁMETROS DE EVALUACIÓN DE CALIDAD DEL GAS NATURAL EN COLOMBIA.....	23
1.5. PRINCIPALES PROPIEDADES CARACTERÍSTICAS ASOCIADAS A INTERCAMBIABILIDAD DE GASES	26
1.6. EFECTOS RELEVANTES DE LA INTERCAMBIABILIDAD DE GASES ..	29
2. PROBLEMAS COMUNES AL APLICAR INTERCAMBIABILIDAD DE GASES EN EQUIPOS DE COMBUSTIÓN	33
2.1. DIAGNÓSTICO GENERAL EN COLOMBIA.....	33
2.1.1. Reservas de gas natural	33
2.1.2. Producción de gas natural.....	34
2.1.3. Escenarios de oferta de gas natural.....	35
2.1.4. Demanda de gas natural	35
2.2. CALIDAD DEL GAS EN COLOMBIA.....	38
2.3. PROBLEMAS ASOCIADOS A LA INTERCAMBIABILIDAD EN EQUIPOS QUE TRABAJAN CON GAS.....	40
2.3.1. Composición y calidad del gas.....	43
2.3.2. Operabilidad y estabilidad	44
2.3.3. Naturaleza de emisiones.....	44
2.3.4. Flexibilidad del combustible	45
3. MÉTODOS PARA LA EVALUACIÓN DE INTERCAMBIABILIDAD DE GASES EN COLOMBIA.....	46
3.1. CONTEXTUALIZACIÓN HISTÓRICA DE MÉTODOS.....	46
3.2. MÉTODOS DE ÍNDICE SIMPLE	48
3.2.1. Índice de Wobbe superior	48

3.2.2.	Índice de Willien	49
3.2.3.	Índice de Knoy	50
3.2.4.	Índice de Schuster.....	51
3.3.	MÉTODOS DE ÍNDICES MÚLTIPLES	51
3.3.1.	Índice de la AGA	52
3.3.2.	Índice de Weaver	54
3.4.	MÉTODOS GRÁFICOS	56
3.4.1.	Método de Delbourg.....	57
3.4.2.	Diagrama de Gilbert-Priggs.....	61
3.4.3.	Diagrama de Holmqvist.....	61
3.4.4.	Método de Dutton.....	61
3.5.	OTROS MÉTODOS.....	63
3.5.1.	Método Sommers-Ruhrgas	64
3.6.	SELECCIÓN DEL MÉTODO APROPIADO PARA EVALUACIÓN DE INTERCAMBIABILIDAD DE GASES EN COLOMBIA	64
3.6.1.	Selección de métodos de índice simple	65
3.6.2.	Selección de métodos de índices múltiples.....	67
3.6.3.	Selección de métodos gráficos	68
3.6.4.	Selección de otros métodos	71
3.7.	MATRIZ DE CRITERIOS (CUALITATIVOS) PARA SELECCIÓN DE MÉTODO(S)	71
4.	IMPORTANCIA DE LA INTERCAMBIABILIDAD DE GASES EN EL CONTEXTO COLOMBIANO.....	73
4.1.	ESTÁNDARES INTERNACIONALES.....	73
4.2.	PANORAMA NORMATIVO EN COLOMBIA.....	75
4.2.1.	Resoluciones emitidas por entes vinculados a operación, regulación y vigilancia de la cadena del gas natural	76
4.2.2.	Resoluciones emitidas por otros entes.....	80
4.3.	CASO DE ESTUDIO: CAMPOS CUSIANA-CUPIAGUA Y GUAJIRA.....	81
4.4.	RELEVANCIA DE LA INTERCAMBIABILIDAD DE GASES EN CONTEXTO COLOMBIANO.....	86

5. CONCLUSIONES.....	87
6. RECOMENDACIONES.....	88
BIBLIOGRAFÍA	
ANEXOS	

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. CLASIFICACIÓN DE GASES SEGÚN FAMILIAS	27
TABLA 2. COMPOSICIONES TÍPICAS GAS NATURAL Y GNL.....	39
TABLA 3. FENÓMENOS ASOCIADOS DE ACUERDO A MÁQUINA QUE OPERA CON GAS ¡ ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.	
TABLA 4. MÉTODOS PARA EVALUACIÓN DE INTERCAMBIABILIDAD DE GASES	47
TABLA 5. ÍNDICES SIMPLES DE INTERCAMBIABILIDAD	48
TABLA 6. ÍNDICES MÚLTIPLES DE INTERCAMBIABILIDAD	51
TABLA 7. ÍNDICE DE AGA PARA CADA TIPO DE GAS	53
TABLA 8. ÍNDICES PROPUESTOS POR WEAVER	54
TABLA 9. MÉTODOS GRÁFICOS DE INTERCAMBIABILIDAD.....	56
TABLA 10. COEFICIENTES REQUERIDOS PARA CÁLCULOS DE DELBOURG	58
TABLA 11. OTROS MÉTODOS DE INTERCAMBIABILIDAD	63
TABLA 12. GASES NATURALES CONSIDERADOS INTERCAMBIABLES POR EL MÉTODO SRG	64
TABLA 13. VENTAJAS-DESVENTAJAS ÍNDICE DE WOBBE SUPERIOR	65
TABLA 14. VENTAJAS-DESVENTAJAS ÍNDICE DE WILLIEN	65
TABLA 15. VENTAJAS-DESVENTAJAS ÍNDICE DE KNOY.....	66
TABLA 16. VENTAJAS-DESVENTAJAS ÍNDICE DE SCHUSTER	66
TABLA 17. VENTAJAS-DESVENTAJAS ÍNDICE DE LA AGA	67
TABLA 18. VENTAJAS-DESVENTAJAS ÍNDICE DE WEAVER	68
TABLA 19. VENTAJAS-DESVENTAJAS MÉTODO DE DELBOURG	69
TABLA 20. VENTAJAS-DESVENTAJAS DIAGRAMA DE GILBERT-PRIGGS	69
TABLA 21. VENTAJAS-DESVENTAJAS DIAGRAMA DE HOLMQVIST.....	70
TABLA 22. VENTAJAS-DESVENTAJAS MÉTODO DE DUTTON	70
TABLA 23. VENTAJAS-DESVENTAJAS MÉTODO DE SOMMERS-RUHRGAS	71
TABLA 24. MATRIZ CUALITATIVA PARA EVALUACIÓN DE INTERCAMBIABILIDAD DE GASES NATURALES EN COLOMBIA	72
TABLA 25. PRINCIPALES PROPIEDADES DE CUSIANA-CUPIAGUA Y GUAJIRA	81
TABLA 26. CÁLCULO ÍNDICE DE WOBBE SUPERIOR PARA GASES CUSIANA-CUPIAGUA Y GUAJIRA	82
TABLA 27. ESPECIFICACIONES DE CALIDAD DEL GAS NATURAL	94

LISTA DE GRÁFICAS

GRÁFICA 1. RECUENTO HISTÓRICO	20
GRÁFICA 2. SECUENCIA EN EL DESPRENDIMIENTO DE LLAMA DE UNA PRE MEZCLA LAMINAR	29
GRÁFICA 3. LLAMA DESPRENDIDA	30
GRÁFICA 4. FENÓMENO DE PUNTAS AMARILLAS.....	31
GRÁFICA 5. RETORNO DE LA LLAMA	32
GRÁFICA 6. PAÍSES EXPORTADORES DE GNL EN EL MUNDO.....	40
GRÁFICA 7. PARÁMETROS PRINCIPALES PARA EVALUACIÓN DE INTERCAMBIABILIDAD DE GASES	42
GRÁFICA 8. ÍNDICE DE WOBBE VERSUS EMISIONES NOX.....	43
GRÁFICA 9. CARTA DE INTERCAMBIABILIDAD DE KNOY	50
GRÁFICA 10. COEFICIENTE DE CORRECCIÓN K1 PARA EL IW (GASES SEGUNDA FAMILIA)	59
GRÁFICA 11. COEFICIENTE DE CORRECCIÓN K2 PARA EL IW (GASES SEGUNDA FAMILIA)	59
GRÁFICA 12. COEFICIENTE DE CORRECCIÓN U PARA EL POTENCIAL DE COMBUSTIÓN (GASES SEGUNDA FAMILIA).....	60
GRÁFICA 13. COEFICIENTE MEDIO DE CORRECCIÓN PARA HIDROCARBUROS SUPERIORES AL METANO (GASES SEGUNDA FAMILIA)	60
GRÁFICA 14. DIAGRAMA DE INTERCAMBIABILIDAD DE GASES DE DELBOURG.....	60
GRÁFICA 15. TETRAEDRO DE DUTTON PARA EVALUACIÓN DE INTERCAMBIABILIDAD MEDIANTE MEZCLAS EQUIVALENTES	62
GRÁFICA 16. DIAGRAMA DE DUTTON CON LÍMITES USADOS EN EL REINO UNIDO	63
GRÁFICA 17. RELACIÓN PCS E ÍWS.....	83
GRÁFICA 18. RELACIÓN GR E ÍWS	84
GRÁFICA 19. MÉTODO DE DUTTON APLICADO EN GASES COLOMBIANOS	85

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. DOCUMENTO CREG-062:2008	94
ANEXO B. RESOLUCIÓN 084:2008.....	105
ANEXO C. RESOLUCIÓN 071:1999	109

GLOSARIO

CALOR: energía manifestada por un aumento de temperatura que procede de la transformación de otras energías

CATALIZADOR: sustancia presente en una reacción química, en contacto físico con los reactivos, la cual acelera la reacción sin actuar en ella

COMBUSTIÓN: proceso químico de oxidación rápida acompañado de desprendimiento de energía en forma de calor y luz, para que se dé el proceso es necesario un combustible, un comburente y calor. La combustión completa e incompleta radica su diferencia en que, en la combustión completa (sí existe suficiente oxígeno) todo el metano se transforma en CO_2 y H_2O , mientras que en la combustión incompleta, se produce CO_2 , H_2O y otras sustancias como hollín debido a que la reacción no se realiza completamente

COMBUSTIÓN COMPLETA E INCOMPLETA: su diferencia radica en que, en la combustión completa (si existe suficiente oxígeno) todo el metano se transforma en CO_2 y H_2O , mientras que en la combustión incompleta, se produce CO_2 , H_2O y otras sustancias como hollín debido a que la reacción no se realiza completamente.

COMISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA Y GAS: CREG, entidad adscrita al Ministerio de Minas y Energía encargada de regular los monopolios en la prestación de los servicios públicos domiciliarios de energía eléctrica, gas combustible y servicios públicos de combustibles líquidos, además de incentivar la competencia y atender oportunamente necesidades de usuarios y empresas

CONDICIONES ESTÁNDAR: 60°F, 1 atm

CONSEJO NACIONAL DE OPERACIÓN DE GAS NATURAL: CNO Gas, órgano asesor del Ministerio de Minas y Energía, CREG y empresas del servicio público de gas natural, encargada de asesorar y recomendar para asegurar operación integrada, confiable, segura y económica del Sistema Nacional de Transporte de Gas Natural

DEGRADACIÓN TÉRMICA: degradación causada por calor

ENERGÍA DE ACTIVACIÓN: energía mínima necesaria para que se produzca una reacción química

GAS ASOCIADO: gas que se extrae junto con petróleo crudo que contiene grandes cantidades de hidrocarburo, mientras que el gas no asociado se encuentra en la etapa de extracción, libre

GAS DE AGUA: gas de síntesis que contiene monóxido de carbono e hidrógeno

GAS DE AJUSTE: gas combustible para el cual se encuentra configurado un equipo de combustión para operar satisfactoriamente

GAS DE EFECTO INVERNADERO: GEI, gases presentes en la atmósfera terrestre los cuales absorben y emiten radiación en determinadas longitudes de ondas del espectro de radiación infrarroja emitido por la superficie de la Tierra, atmósfera y nubes; los principales GEI son vapor de agua, dióxido de carbono, metano, óxido nitroso, clorofluorocarbonos y ozono

GAS DE HORNO DE COQUE: derivado del proceso de coquización, es un gas residual con alto contenido de hidrógeno y poder calorífico medio que contiene una cantidad importante de polvo y contaminantes corrosivos

GAS MANUFACTURADO: gases producidos a partir de carbón, coque, derivados del petróleo crudo, transformación de gases naturales o de gases licuados del petróleo. Se conoce también como gas de ciudad

GAS NATURAL LICUADO: gas natural que ha sido procesado para ser transportado en estado líquido

GAS NATURAL SINTÉTICO: producto manufacturado a partir de conversión o regeneración de hidrocarburos de petróleo que resulta similar al gas natural en la mayoría de los aspectos y, puede sustituir o alternarse fácilmente con gas natural de un gasoducto

GAS SUSTITUTO: gas combustible con el cual se pretende reemplazar el gas de ajuste sin que haya necesidad realizar ningún ajuste sobre el equipo de combustión

HIDRATOS DE METANO: acumulaciones cristalinas formadas por gas natural y agua, el cual a altas presiones y bajas temperaturas forma sólidos similares al hielo

HIDROCARBUROS PESADOS: aquellos hidrocarburos con composiciones mayores a C7+

IGNICIÓN: inicio de una combustión

INTERCAMBIABILIDAD: capacidad de sustituir un combustible gaseoso por otro en un equipo de combustión, de manera que sin realizarle ningún ajuste, no se presenten diferencias desde el punto de vista de la seguridad operacional, la eficiencia, el desempeño o las principales características de las emisiones al medio ambiente

INYECTOR: dispositivo que sirve para introducir a presión un gas en una cavidad

MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA: MME, entidad encargada de dirigir la política nacional en minería, hidrocarburos e infraestructura energética del país;

administra, orienta, regula recursos naturales no renovables, vela por la protección de recursos naturales del medio ambiente para asegurar conservación, restauración y desarrollo sostenible

MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNO: motor que funciona mediante la liberación de energía que se produce al explotar en combustible en el interior del cilindro

PODER CALORÍFICO: cantidad de energía por unidad de masa o unidad de volumen de materia que se puede desprender al producirse una reacción química de oxidación; existen dos tipos, el poder calorífico inferior y superior

POTENCIA TÉRMICA: potencia que demanda una máquina térmica en condiciones de uso

PROCESAMIENTO DEL GAS NATURAL: etapa en la que se remueven impurezas del gas natural, además de inertes, para ser acondicionado a la normativa estipulada por cada país

QUEMADOR: dispositivo que sirve para regular la salida de combustible en una instalación

QUEMADOR ATMOSFÉRICO: dispositivo para quemar combustible gaseoso y producir calor mediante una llama a presión ambiente

QUEMADOR DE AIRE FORZADO: quemador de aire de combustión total bajo presión con ayuda de un ventilador que puede tener un impulsor de aire, o un compresor

QUEMADOR DE LABORATORIO: quemador tipo Bunsen, es un instrumento utilizado en laboratorios científicos para calentar, esterilizar o proceder a la combustión de muestras o reactivos químicos. Es un quemador de gas natural o de gases licuados de petróleo, siendo la llama el producto de la combustión de una mezcla regulable de aire con uno de estos gases

RECURSO ENERGÉTICO: sustancia de la cual se puede obtener energía a través de diversos procesos, existen dos tipos principales, recursos no renovables (combustibles fósiles) y recursos renovables

REGLAMENTO ÚNICO DE TRANSPORTE: RUT, resolución 071 emitida por la CREG de 1999, la cual establece las especificaciones de calidad del gas natural entregado al transportador por parte de un remitente en un punto de entrada al sistema nacional de transporte

VELOCIDAD DE DEFLAGRACIÓN: velocidad a la que se desplaza el frente de llama (o zona de reacción) hacia la zona de gases sin quemar (gases de premezcla) en una llama plana y estable, sin pérdidas de calor

RESUMEN

TÍTULO: ANÁLISIS DE LA INTERCAMBIABILIDAD DE GASES EN LA INDUSTRIA DEL GAS Y SU RELEVANCIA EN EL MARCO REGULATORIO COLOMBIANO*

AUTORA: IVONNE CAROLINA OLARTE GÓMEZ **

Palabras claves: Intercambiabilidad de Gases Naturales, Combustión, Reglamento Único de Transporte.

DESCRIPCIÓN:

El presente estudio busca analizar conceptualmente la intercambiabilidad de gases y su incidencia en la industria del gas, se abordará partiendo de la base del concepto global, identificando características y efectos de la intercambiabilidad de gases. Se determinarán los problemas más comunes que se puedan presentar al aplicar el tema en equipos de combustión tomando en cuenta casos de otros países que han aplicado el concepto y, se fundamentarán cada una de las metodologías (simples, múltiples y gráficas) para la evaluación de intercambiabilidad de gases tomando en cuenta diferentes aspectos de cada una de ellas (ventajas y desventajas) y dependiendo de las propiedades físico químicas de los gases seleccionar la de mayor aplicabilidad en el caso colombiano.

Con base en la situación actual, cualquier metodología que llegue a ser seleccionada, resultará conveniente para introducir el concepto de intercambiabilidad de gases ya que es relevante, poco conocido en el sector del gas natural y debe ser implementado por el Consejo Nacional de Operación de Gas Natural y la Comisión de Regulación de Energía y Gas en su Marco Regulatorio Colombiano, específicamente en el Reglamento Único de Transporte, CREG 071 de 1999, para ser aplicado por los diferentes entes de la industria del gas.

* Monografía de Especialización.

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos, Director: Julio Cesar Pérez Angulo, Especialista en Ingeniería del gas.

ABSTRACT

TITLE: NATURAL GAS INTERCHANGEABILITY ANALYSIS IN GAS INDUSTRY AND THE IMPACT IN THE COLOMBIAN REGULATORY FRAMEWORK*

AUTHOR: IVONNE CAROLINA OLARTE GÓMEZ **

Key Words: Natural Gas Interchangeability, Combustion, Single Transport Regulation.

DESCRIPTION:

The present study aims to analyze conceptually the natural gas interchangeability and the incidence in the natural gas industry; it will be approached from the base of the global concept, identifying characteristics and effects of natural gas interchangeability.

It will be defined some common problems that could be present in combustion equipment, including cases of another countries which has already applied the concept. Each methodology (simple, multiple and graphics), will be explained in order to evaluate the natural gas interchangeability taking into consideration the advantages and disadvantages, and selecting the best option which can be applied in Colombia, depending in the physicochemical properties of gases.

Taking into account the current situation, any selected methodology, would be convenient for introducing the concept of natural gas interchangeability because its relevancy, a little unknown in the natural gas sector and it would be implemented by the Natural Gas Operation Organism and the Gas and Energy Regulator Organism for the Colombian regulatory framework, specifically in the Single Transport Regulation, CREG 071-1999, for being applied by the different entities in the natural gas industry.

* Specialization Monograph.

** Physic-chemist Engineering Faculty. Petroleum Engineering School, Director: Julio Cesar Perez Angulo, Specialist in gas engineering.

INTRODUCCIÓN

Las principales fuentes de gas natural en Colombia, poseen diferencias en sus especificaciones debido a las características de fluidos en los yacimientos y tipos de procesos para tratar el gas [1]. Actualmente, se desea un combustible que además de ser económico, genere menor impacto posible al medio ambiente, asegure una combustión eficiente y evite que se presente problemas de combustión incompleta o daños en los equipos.

Existe el término de intercambiabilidad de gases el cual se define como *“habilidad para sustituir un combustible gaseoso por otro perteneciente a la misma familia, en una aplicación de combustión, sin cambiar la seguridad operativa, la eficiencia, garantizando la seguridad del usuario y desempeño en términos de emisiones contaminantes dentro del rango permisible [4, 6, 22].* Este término en Colombia no es muy relevante para la industria del gas, y aunque entidades como la Comisión de Regulación de Energía y Gas y, Consejo Nacional de Operación de Gas Natural tienen injerencia con el tema, no ha trascendido debido a que falta mostrar su importancia y estrategias claras para su aplicación.

En el presente estudio, se pretende de manera general, realizar un análisis conceptual de la intercambiabilidad de gases en la industria del gas y determinar su relevancia en el marco regulatorio colombiano. El estudio presenta cuatro capítulos distribuidos de la siguiente manera: i) se describen las principales variables, características y efectos asociados a la intercambiabilidad de gases, ii) se identifica los problemas y fenómenos más comunes asociados a la intercambiabilidad en equipos que trabajen con gas natural como combustible, iii) se analiza y fundamenta las diferentes metodologías (índice simple, índices múltiples y gráficas) para la evaluación de intercambiabilidad de gases, dependiendo de las propiedades físico químicas de los gases y se recomienda la(s) mejor(es) para aplicar en el caso de Colombia, iv) se estudia y sustenta la relevancia de la implementación de la intercambiabilidad de gases en el marco regulatorio colombiano (específicamente en el Reglamento Único de Transporte).

1. FUNDAMENTOS DE LA INTERCAMBIABILIDAD DE GASES

Este capítulo hace un recuento histórico de la intercambiabilidad de gases desde sus bases en 1927. Asimismo, se hablará de la importancia del tema, y se nombrarán las características y efectos más importantes.

1.1. IMPORTANCIA DE LA INTERCAMBIABILIDAD EN GASES

La importancia de la intercambiabilidad de gases radica en su misma definición, que es, “habilidad para sustituir un combustible gaseoso por otro perteneciente a la misma familia, en una aplicación de combustión, sin cambiar la seguridad operativa, la eficiencia, garantizando la seguridad del usuario y desempeño en términos del incremento de emisiones contaminantes dentro del rango permisible” [4, 6, 22]. Lo que quiere decir es que dos gases, llegan a ser intercambiables si al remplazar uno por otro, sus características de operación del aparato doméstico, comercial o industrial no varían significativamente. Para alcanzar una intercambiabilidad perfecta, los gases deben tener composición idéntica, lo cual llega a ser imposible en la práctica, pero a nivel industrial se exige que los artefactos donde se lleve a cabo la combustión, operen dentro de unos límites permisibles sugeridos, haya una ignición confiable, una combustión completa, para que su funcionamiento sea satisfactorio y no se presenten problemas de combustión incompleta, daños en equipos u operación riesgosa. La intercambiabilidad del gas garantiza que cualquier equipo a gas utilizando un gas sustituto debe seguir cumpliendo con estándares de desempeño a los cuales fue originalmente aprobado. La intercambiabilidad de gas se considera un subconjunto de la especificación de la calidad del gas, garantizando que el gas suministrado a los usuarios finales se queme de manera segura y eficiente [1, 4, 11, 14, 18].

Se llegan a considerar gases totalmente intercambiables, aquellos en donde su potencia de entrada al artefacto se mantenga en un valor razonablemente constante, se garantice una combustión completa, estabilidad de llama, adecuado encendido de quemadores sin necesidad de realizar ningún ajuste en el artefacto [1].

Los principales objetivos de la intercambiabilidad son:

- Conocer cuáles son las variaciones en la composición del gas (admisibles dentro de una misma familia)
- Prever como aminorar cualquier situación inadmisible en el funcionamiento del aparato con el uso de un gas de reemplazo ó el de ajuste [1, 9]

1.2. RECUENTO HISTÓRICO

Las bases de la intercambiabilidad de gases fueron desarrolladas alrededor de 1927 por Goffredo Wobbe, científico, ingeniero de gas e inventor italiano. Sus estudios generaron una nueva propuesta para la definición de la calidad del gas natural apoyándose en el parámetro “Índice de Wobbe” (capítulo 3); Wobbe

determina la relación entre potencia térmica de un quemador, peso específico del gas utilizado, poder calorífico bruto y concluye que no todos los gases combustibles son iguales [6, 16, 18].

Con el avance de la ciencia y la tecnología, se han profundizado los estudios de los fenómenos del flujo de gas y de combustión, generándose alternativas para evaluar la intercambiabilidad como las metodologías de índices simples, múltiples, de gráficas y otros (capítulo 3); la intercambiabilidad ha sido una preocupación a nivel mundial desde la década de 1930, cuando el gas natural reemplazó el uso de gases manufacturados a partir de carbón y petróleo en aplicaciones de iluminación vial y otras aplicaciones domésticas [12, 18].

En 1932, la Asociación Americana de Gases AGA, completó un proyecto de investigación de 6 años, sobre intercambiabilidad de gases manufacturados y mezclas de gases combustibles, cuyos poderes caloríficos superiores eran menores a 700 BTU/ft³.

En la década de 1940, con el incremento de la demanda de gas natural en Estados Unidos, la necesidad de tener a disposición reservas de gas para satisfacer picos de demanda y suplir fugas por fallas en líneas de transporte se hizo de mayor importancia, por eso la AGA junto con el Comité para Uso de Mezclas Gaseosas (Committee on Mixed Gas Research), iniciaron una investigación entre 1942-1943 con el objetivo de desarrollar un método que predijera con confianza qué gases podrían sustituir al gas natural o mezcla de gases de alto poder calorífico (superior a 800 BTU/ft³). Con este estudio y trabajos anteriores se concluyó que cuando el poder calorífico y la densidad relativa del gas sustituto causa una disminución en la potencia térmica, existe una tendencia al desprendimiento y al retroceso de la llama [9, 14].

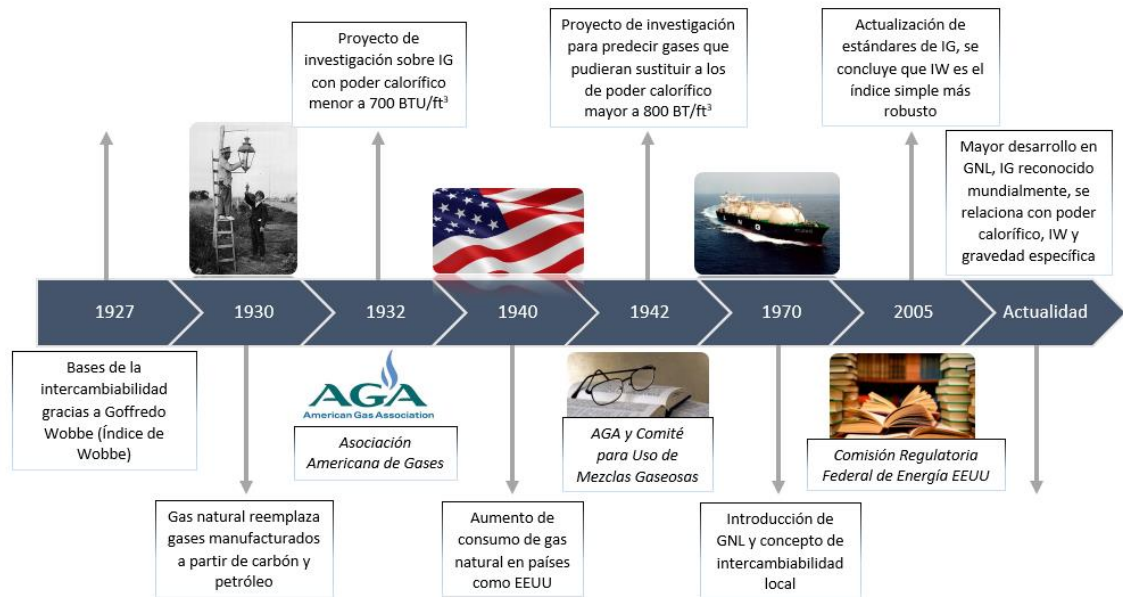
Otros factores que han contribuido a llevar al máximo interés el tema de la intercambiabilidad de gases y que ha direccionado las actividades técnicas de los gases son:

- En la década de 1930, la introducción del gas natural y cuestiones de intercambiabilidad con gases producidos localmente
- En la década de 1940, desarrollo de enfoques nivelados de suministros (incluyendo gases manufacturados y sistemas de aire propanado) e intercambiabilidad con suministros bases de carga
- En la década de 1970, introducción de gas natural licuado importado en áreas de mercado local e intercambiabilidad con proveedores locales
- Finalmente, en el 2005 la Comisión Regulatoria Federal de Energía de Estados Unidos, actualizó los estándares de intercambiabilidad de gases, y concluyó que el Índice de Wobbe es el índice simple más robusto para medir la intercambiabilidad, y que una variación de la composición puede dañar los equipos y violar normas ambientales [14]

Actualmente, los quemadores modernos presentan una alta sensibilidad a la composición del gas y son menos tolerantes a fluctuaciones de la composición, luego de que el equipo haya sido calibrado para funcionar con una calidad de gas determinada. También, la intercambiabilidad se ha hecho más evidente en los últimos años, debido al aumento del transporte transfronterizo de gas, agotamiento de campos maduros, sustitución por la producción en diferentes zonas geográficas y rápido desarrollo del mercado del gas natural licuado. Además, los últimos estudios realizados por la Asociación Australiana de Gases denotan el concepto de intercambiabilidad de gases, relacionándolo con propiedades físicas del gas como poder calorífico, densidad relativa e índice de Wobbe [4, 12]. En el capítulo 3, junto con los métodos (simples, múltiples, diagramas y otros), se evidenciará los avances de estudios de intercambiabilidad a lo largo de los años.

En la gráfica 1, se detalla el resumen del recuento histórico,

Gráfica 1. Recuento histórico



1.3. CARACTERÍSTICAS ASOCIADAS A GASES NATURALES

➤ Calor específico

Cantidad de calor que es necesario para entregar a la unidad de masa de un producto para aumentar su temperatura [25].

➤ Composición

Generalmente se compone de un 70% de metano cuando se encuentra como gas asociado; cuando se encuentra como gas no asociado su porcentaje es mayor a un 90% [5].

➤ Densidad absoluta

Masa de un producto contenida en la unidad de volumen, medida a condiciones estándar [25].

➤ Densidad relativa

Relación existente entre peso específico de una cantidad de gas con respecto a la del aire, ambos expresados a las mismas condiciones estándar de presión y temperatura. Puede oscilar entre 0,55-0,65 dependiendo de la composición del gas [5].

$$G_r = \frac{\rho_{gas}}{\rho_{aire}} \text{ (Ec. 1)}$$

Siendo,

ρ_{gas} = Densidad del gas

ρ_{aire} = Densidad de referencia (aire)

➤ Factor de compresibilidad del gas

Parámetro que diferencia el comportamiento de los fluidos en estado líquido del estado gaseoso. Se introduce en la Ecuación de Estado de Gas Ideal para modelar el comportamiento de los gases reales, los cuales pueden llegar a comportarse como ideales a determinadas condiciones de presión y de temperatura [5].

$$Z = \frac{PV}{nRT} \text{ (Ec. 2)}$$

Siendo,

P = Presión

V = volumen

R = Constante de los gases

T = Temperatura absoluta

n = número de moles

$$Z = \frac{v_{real}}{v_{ideal}} \text{ (Ec. 3)}$$

v_{real} = volumen específico de gas real v_{ideal} = volumen específico de gas ideal

➤ Índice de Wobbe superior

Aunque no refleja los indicadores de calidad del gas, es un parámetro indicativo para medir la intercambiabilidad de gases. Es un buen indicador para medir el desempeño de dos gases con composición similar. Además, cuando se quiere mezclar gases combustibles y aire (en una reacción de combustión), se controla el índice de Wobbe para asegurar que la combustión sea eficiente y satisfactoria en el quemador [5, 10, 12].

$$IWS = \frac{PCS}{\sqrt{G_r}} \text{ (Ec. 4)}$$

Siendo,

PCS = Poder calorífico superior del gas G_r = Densidad relativa del gas

➤ Número de metano

Parámetro principal para identificar la calidad del gas natural como combustible en motores de combustión interna. Se caracteriza como el índice de resistencia a la detonación de los combustibles gaseosos basados en dos gases de referencia, metano e hidrógeno. Si el NM es muy bajo, la detonación puede dañar el motor o reducir la eficiencia y, aumentar las emisiones nocivas del motor. El NM debe ajustarse para evitar la detonación. Su escala está fundamentada en el porcentaje molar del metano e hidrógeno [1, 10].

➤ Peso específico

Relación existente entre el peso de una sustancia y el volumen que ocupa en unas condiciones de referencia de presión y temperatura dadas [5].

$$\gamma = \frac{mg}{V} = g * \rho_{gas} \text{ (Ec. 5)}$$

Siendo,

m = masa de la sustancia g = gravedad

➤ Peso molecular del gas

Masa promedio de una molécula de una sustancia. Sumatoria de varios pesos moleculares de átomos para formar el peso molecular del gas [5].

➤ Poder calorífico

Cantidad de calor que emite la combustión de una cierta cantidad de combustible a condiciones estándar [5].

➤ Volumen específico

Volumen ocupado por una masa de gas. Para el gas ideal, se considera el inverso de la densidad [5].

$$v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho_{gas}} \text{ (Ec. 6)}$$

1.4. PRINCIPALES PARÁMETROS DE EVALUACIÓN DE CALIDAD DEL GAS NATURAL EN COLOMBIA

Los siguientes parámetros están referidos a la norma emitida por la Comisión de Regulación de Energía y Gas, Reglamento único de Transporte.

➤ Contenido de ácido sulfhídrico

Compuesto gaseoso, incoloro, tóxico e inflamable que se encuentra normalmente en el gas natural cuando se extrae de los depósitos de gas. Se debe evitar en el gas natural tratado ya que causa riesgo potencial para la salud humana al ser tóxico, también, puede conducir a fisuración de tensiones metálicas en tuberías, puede actuar como catalizador venenoso en instalaciones petroquímicas, y además, la combustión de un gas que contenga H₂S puede dar lugar a formación de SO₂ que es un compuesto ácido que al tener contacto con el agua libre es perjudicial para el medio ambiente. Según el Reglamento Único de Transporte su máximo contenido total debe ser de 6 mg/m³ ó 0,25 grano/100 PCS [7, 10].

➤ Contenido de azufre

Como contenido total de azufre, se incluye el H₂S, sulfuro de carbonilo, mercaptanos y cualquier otra especie de azufre en el gas. Causa problemas como riesgo potencial para la salud humana, también puede bloquear o tapar perforaciones de tuberías, puede promover a una pérdida por corrosión, puede formar sulfuro de hierro (el cual puede encenderse automáticamente a presión atmosférica y temperatura específica cuando se expone al aire). Según el Reglamento Único de Transporte su máximo contenido total debe ser de 23 mg/m³ ó 1 grano/100 PCS [7, 10].

➤ Contenido de dióxido de carbono

Su contenido de emisiones genera efectos en el medio ambiente y salud humana. Según el Reglamento Único de Transporte su máximo contenido total debe ser de 2% [7].

➤ Contenido de inertes

Se consideran la sumatoria de contenidos de CO₂, N₂ y O₂; ninguno de ellos proporciona contenido de calor al gas natural, pero si tienen efectos en el gas como: el CO₂ es un compuesto ácido que en presencia de agua puede formar

ácido carbónico corrosivo en presencia del agua, el cual puede destruir o dañar irreversiblemente alguna sustancia que entre en contacto, además, se deben eliminar para prever condensaciones y corrosiones, como también, cumplir con normas de seguridad. Según el Reglamento Único de Transporte su máximo contenido total debe ser de 5%. [1, 7, 10].

➤ Contenido de líquidos

Según el Reglamento Único de Transporte el contenido de líquidos debe ser libre ya que debe prevenirse la formación de erosiones y corrosiones en los gasoductos, además, el agua puede llegar a formar hidratos de metano lo cual puede obstruir tuberías de transporte de gas [7].

➤ Contenido de nitrógeno

Según el Reglamento Único de Transporte su máximo contenido total debe ser de 3%, ya que se pueden generar emisiones de NO_x (gases compuestos por óxido nítrico NO y dióxido de nitrógeno NO₂), las cuales al tener un carácter ácido, contribuyen con el SO₂ a la formación de lluvia ácida y contaminación al medio ambiente, además de ser tóxico y generar problemas en la salud humana [7].

➤ Contenido de oxígeno

Aunque no se suele encontrar en cantidades significativas en campos de extracción de gas, su presencia atribuye a contaminación durante la cadena del gas natural (procesamiento, transporte, almacenamiento y distribución). En combinación con agua libre y/u otros componentes como CO₂, H₂S y O₂, puede llegar a causar corrosión. Bajo algunas condiciones, el oxígeno se combina con H₂S y forma azufre, lo que conduce a problemas operativos. Según el Reglamento Único de Transporte su máximo contenido total debe ser de 0,1% [7].

➤ Contenido de polvos y material en suspensión

Según el Reglamento Único de Transporte su máximo contenido total debe ser de 1,6 mg/m³ ó 0,7 grano/1000 PCS. El máximo tamaño de las partículas debe ser de 15 micrones para evitar obstrucciones en las tuberías de transporte de gas natural [7].

➤ Contenido de vapor de agua

Se debe eliminar el vapor de agua para prevenir erosión y corrosión de los gasoductos. Un contenido excesivo de vapor podría afectar el funcionamiento de las tuberías. Según el Reglamento Único de Transporte su máximo contenido total de agua debe ser de 97 mg/m³ ó 6 lb/MPCS [7, 10].

➤ Impurezas del gas natural

Se deben eliminar para prever condensaciones y corrosiones, además de seguir normas de seguridad. Los más importantes son, compuestos de azufre (entre ellos H_2S), vapor de agua, compuestos inertes (entre ellos CO_2 , N_2 , O_2), y metales pesados (como el mercurio); además pueden generar emisión de partículas sólidas, hollín y humos [10].

➤ Metales pesados

Entre ellos se considera, el mercurio, cadmio, arsénico, cromo, talio, plomo. Se considera como cualquier elemento químico metálico con densidad relativamente alta y tóxica a bajas concentraciones. Tienden a depositarse en áreas bajas de tuberías, instalaciones o aparatos, creando bloqueos [10].

➤ Poder calorífico inferior

Cantidad de calor producido por la combustión completa de una unidad de masa o volumen de gas sin que condense el vapor de agua que contienen los productos de la combustión; representa aproximadamente el 90% del poder calorífico superior de un gas natural. Según el Reglamento Único de Transporte el PCI debe ser de $35,4 \text{ MJ/m}^3$ ó 950 BTU/ft^3 [1, 5, 7].

➤ Poder calorífico superior

Cantidad de calor producido por la combustión completa de una unidad de masa o volumen de gas suponiendo que condense el vapor de agua que contienen los productos de la combustión. Según el Reglamento Único de Transporte el poder calorífico superior debe ser de $42,8 \text{ MJ/m}^3$ ó 1150 BTU/ft^3 [1, 5, 7].

➤ Punto de rocío de hidrocarburos

No debe superar los $7,2^\circ\text{C}$ ó 45°F a cualquier presión y para todos los pisos térmicos de Colombia [6, 7].

➤ Remoción de condensados

Es necesaria la remoción de hidrocarburos pesados con el fin de prevenir erosiones y corrosiones de los gasoductos, además de ajuste en el poder calorífico del gas natural.

➤ Temperatura de entrega

Según el Reglamento Único de Transporte su máxima temperatura de entrega es de 49°C ó 120°F ; y su mínima temperatura de entrega es de $4,5^\circ\text{C}$ ó 40°F [7].

1.5. PRINCIPALES PROPIEDADES CARACTERÍSTICAS ASOCIADAS A INTERCAMBIABILIDAD DE GASES

La intercambiabilidad de gases, no es una propiedad característica de un combustible que se pueda determinar de manera general, también depende de características técnicas del equipo de combustión, análisis comparativo de propiedades, fenómenos y parámetros operacionales [19].

➤ Altura del cono azul

En combustibles gaseosos, la altura del cono azul se ha utilizado como criterio para examinar la intercambiabilidad de gases en una misma familia, para predecir emisiones de monóxido de carbono y estabilidad de llama.

Cuando dos gases de composición química diferente funcionan en un quemador atmosférico, no existirán problemas de intercambiabilidad si la altura del cono azul permanece inalterada. Sin embargo, la altura del cono azul se ve afectada por las condiciones de la presión atmosférica [12].

➤ Composición de los gases

Para que ocurra intercambiabilidad, los gases deben tener una composición similar ó pertenecer a la misma familia.

➤ Elevación

La operación de equipos a elevadas alturas puede ser afectada debido al efecto de la reducción de la presión atmosférica en las densidades de los gases. Por lo que los equipos son diseñados para una tasa de entrada de gas a condiciones del nivel de mar, la densidad del aire se reduce con la altitud y con ello, la concentración de oxígeno.

Quiere decir que a elevadas alturas, menor oxígeno en la zona de combustión, por lo tanto menor gas puede ser quemado de forma completa en un tiempo dado, con lo cual el flujo de gas combustible debe ser restringido. Tradicionalmente, las tasas de entrada han sido reducidas un 4% por cada 1000 pies de elevación sobre alturas superiores a 2000 pies. Esta reducción requiere el uso de orificios más pequeños para reducir el flujo de combustible hacia el quemador.

En Estados Unidos utilizan métodos para la reducción como, la regla del 4%, códigos locales y especificaciones del fabricante [12].

➤ Índice de Wobbe superior

Determina el grado de la intercambiabilidad entre gases combustibles, aunque no refleje los indicadores de calidad de los mismos. Si varía la composición del gas, varía el IW, relación aire/gas y emisiones [10].

Se clasifica los gases en familias para que exista intercambiabilidad de gases, en la **tabla 1** se detallará su clasificación.

Primera familia → Gases manufacturados, los cuales son obtenidos a partir de destilación de hulla, cracking de naftas, reformado de gas natural ó mezclas de propano y aire. También conocido como gas de ciudad, el grupo A. Gas de coquería, el grupo B. Gases de mezcla hidrocarburo-aire, grupo C. Suelen tener bajo poder calorífico superior (entre 21,47 a 27,64 MJ/m³). Estos gases manufacturados tienen como componentes principales el hidrógeno, metano y monóxido de carbono [4, 12]

Segunda familia → Gas natural extraído de yacimientos subterráneos ó mezclas de propano y aire, suelen tener un poder calorífico superior intermedio (entre 39,1 a 54,7 MJ/m³). También se conoce el grupo H como gas natural y grupo L como gas de refinería [4, 12]

Tercera familia → Gas licuado del petróleo, en donde pertenecen butano y propano comerciales; son subproductos del gas natural y/o refino del petróleo, suelen tener un alto poder calorífico superior (entre 72,9 a 87,3 MJ/m³) [4]

Tabla 1. Clasificación de gases según familias

FAMILIA DE GASES Y GRUPOS	Índice de Wobbe superior a 15°C y 1013,25 MJ/m ³	
	Mínimo	Máximo
PRIMERA FAMILIA		
Grupo A	22,4	24,8
Grupo B	22,36	27,64
Grupo C	23,84	24,07
Grupo D	19,13	22,12
Grupo E	21,47	22,93
SEGUNDA FAMILIA		
Grupo H	45,7	54,7
Grupo L	39,1	44,8
Grupo E	40,9	54,7
TERCERA FAMILIA		
Grupo B/P	72,9	87,3
Grupo P	72,9	76,8
Grupo B	81,8	87,3

Fuente: SEDIGAS [23].

- Poder comburívoro o aire teórico

Mínima cantidad de aire necesaria para asegurar la combustión completa de un metro cúbico de gas [23].

- Potencia térmica de combustión

Energía que se produce del calor liberado en la combustión, se obtiene al reaccionar el combustible con el comburente. Cuando el poder calorífico y la

gravidad específica del gas sustituto causan una disminución en la potencia térmica, existe una tendencia hacia el desprendimiento y al retroceso de llama (el desprendimiento es más notorio para gases manufacturados, mientras que el retroceso es más crítico para las mezclas aire-butano).

Mientras que cuando el poder calorífico y la gravedad específica del gas sustituto causan un incremento en la potencia térmica, existe una tendencia hacia las puntas amarillas y combustión incompleta [9].

➔ Temperatura de ignición

Es la temperatura mínima a presión de 1 atm. que debe alcanzar la mezcla combustible-oxidante para que se inicie la combustión y se auto propague sin requerir de una fuente de calor exterior. Esta temperatura depende de la composición de la mezcla, presión y presencia de sensibilizadores, las cuales son sustancias que disminuyen el punto de ignición o de inhibidores [12].

➔ Temperatura de inflamación

Temperatura a la que sin necesidad de un punto de ignición ó llama, se inflama una mezcla estequiométrica gas-aire. La temperatura para un gas natural normalmente es de 510°C ó 950°F [23].

➔ Temperatura de rocío en los humos

La combustión de hidrocarburos e hidrógeno produce vapor, el cual se encuentra en los productos de combustión como vapor. La temperatura a la que se inicia la condensación de vapor de agua en los productos de combustión se conoce como temperatura de rocío. La importancia en su determinación es que se debe evitar la condensación en los conductos de evacuación de humos para prevenir el deterioro de los materiales constitutivos de estos por causa de la humedad [12].

➔ Velocidad de deflagración

Determina la estructura y la estabilidad de la llama. El incremento de la velocidad de deflagración causa que la llama se acorte hacia el puerto del quemador. En casos extremos, puede acarrear que la llama ingrese al quemador causando el fenómeno de retrollama.

Por otro lado, al disminuir la velocidad de deflagración, causa que la llama se separe del quemador, fenómeno de desprendimiento. En caso extremo, si la velocidad de deflagración es demasiado baja, la llama se desprende y se puede extinguir [12].

➔ Velocidad de propagación de la llama

Ocurre cuando la mezcla aire-gas se encuentra dentro de los límites de inflamabilidad y, la combustión se propaga con una cierta velocidad.

Para el gas natural, normalmente la máxima velocidad inicial de propagación de la llama es de 35 cm/s, donde su límite inferior de inflamabilidad es 4,7% y el límite superior de inflamabilidad es de 13,7% [23].

1.6. EFECTOS RELEVANTES DE LA INTERCAMBIABILIDAD DE GASES

➔ Combustión incompleta

Parte del gas combustible no reacciona completamente con el oxígeno, como consecuencia se generan subproductos de la combustión diferentes al CO₂ y vapor de agua, como monóxido de carbono, hidrógeno, carbono y combustibles sin quemar [21].

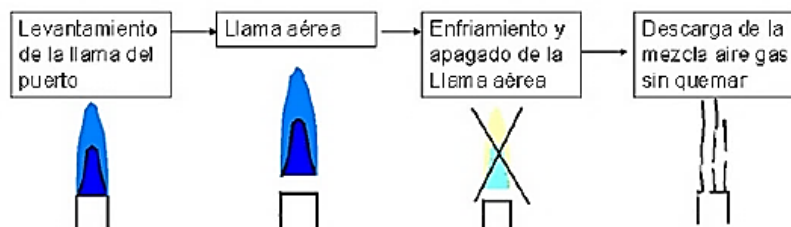
➔ Desprendimiento

La estabilidad de la llama de un quemador de gas es función de la velocidad de propagación de la llama y de la velocidad de salida de la mezcla aire-gas. Si la velocidad de salida es inferior a la de propagación, se produce un retroceso de la llama, y si es superior se tiene un desprendimiento de llama que generalmente trae consigo su extinción. Se produce cuando la velocidad de salida de la mezcla aire-gas por los orificios de la cabeza del quemador es superior a la velocidad de propagación de la combustión, se corrige disminuyendo la presión de alimentación o cambiando el inyector o interponiendo un obstáculo a la salida de la mezcla aire-gas [23].

También puede darse este fenómeno si existe un exceso de aire primario, en este caso deben ajustarse las lumbreras del quemador. Tienen tendencia al desprendimiento los quemadores que se encuentran alimentados por gas natural, butano propano o sus mezclas con aire debido a su baja velocidad de propagación [7].

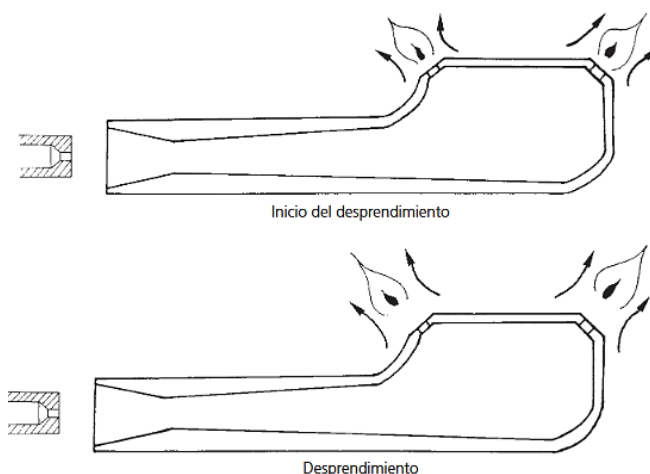
En las siguientes gráficas 2 y 3, se detallan los procesos de desprendimiento de la llama y su secuencia,

Gráfica 2. Secuencia en el desprendimiento de llama de una pre mezcla laminar



Fuente: AMELL ARRIETA, Andrés Adolfo [2].

Gráfica 3. Llama desprendida



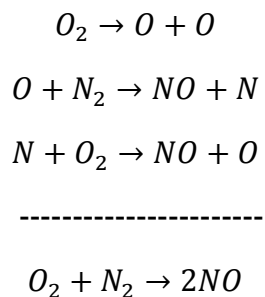
Fuente: SEDIGAS [23].

➤ Emisiones de monóxido de carbono

Puede resultar por una combustión incompleta en los gases de exhosto. Su presencia puede generar problemas de salud y seguridad debido a que es un gas altamente tóxico. Su incremento puede resultar del exceso de aire, ya que este exceso puede aplacar el proceso de combustión y en consecuencia el CO es completamente oxidado a CO₂ [12].

➤ Emisiones de óxidos de nitrógeno

Los óxidos de nitrógeno son generados durante la combustión de hidrocarburos por una variedad de mecanismos; son creados a través de oxidación del nitrógeno introducido con la combustión. Su mecanismo térmico consiste de las siguientes acciones elementales,



La energía de activación para esta reacción es alta (0,137 MBTU/lb-mole), y como consecuencia la reacción es dependiente de la temperatura, ocurriendo a temperaturas mayores de 2176°C ó 3950°F [12].

➤ Estabilidad de llama

Se conoce como el aseguramiento de que la mezcla de gas/aire que sale por los orificios de la cabeza del quemador avance a una velocidad determinada y, que su combustión la cual se produce a otra velocidad en sentido opuesto (velocidad de propagación), sean aproximadamente iguales para que la llama quede en equilibrio en la cabeza del quemador [7].

➤ Fenómeno de puntas amarillas

Fenómeno relevante para determinar el desempeño de la combustión; el color de la llama puede cambiar de azul a amarillo. Los quemadores de gases naturales están ajustados para producir una llama principalmente azul, sin embargo, un cambio en el radio de equivalencia puede tornar la punta de la llama en amarilla.

En algunos equipos, las puntas amarillas son deseadas con fines decorativos. Las partículas de carbono (en ciertos casos) pueden escaparse de la llama y formar hollín, el cual puede no quemarse totalmente y causar depósitos que afecten el desempeño de los equipos, además de su vida útil [2].

El fenómeno es común para mezclas de gases combustibles donde se exceden con un 50% propano, 40% butano, 20% hidrocarburos saturados [9].

En la gráfica 4, se observa un quemador ajustado apropiadamente mostrando una llama azul, mientras que el otro quemador ajustado inadecuadamente se muestra con presencia de puntas amarillas.

Gráfica 4. Fenómeno de puntas amarillas



Fuente: CORTÉS TORRES, Jaime Hernán [9].

Otros factores que inciden sobre la aparición de la llama amarilla son:

- ✓ Dimensiones de las llamas para un caudal dado de gas, la tasa de aireación primaria (suficiente para hacer desaparecer el límite amarillo de las llamas)
- ✓ Caudal de gas, para los orificios de dimensiones dadas la tasa de aireación límite, aumenta con el caudal de combustible pero tiende hacia un límite más allá del cual es independiente del caudal de combustible y de la atmósfera que rodea la llama

➤ Formación de hollín

Fenómeno que aparece cuando hay combustión incompleta y se caracteriza por un depósito de carbón en las superficies que hacen contacto con las llamas o los productos de la combustión [21].

Algunos problemas que genera el hollín son los siguientes:

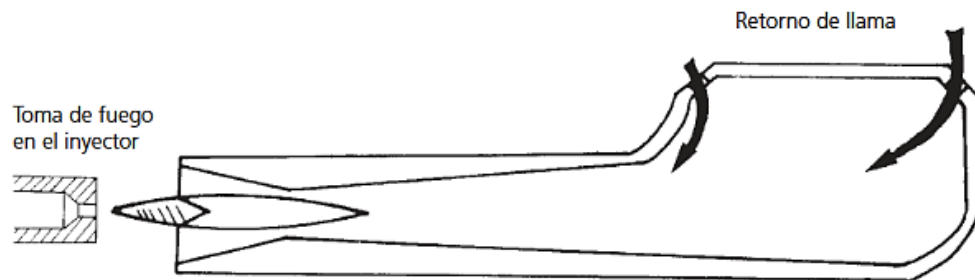
- ✓ Depósitos sobre los recipientes
- ✓ Disminución de la transferencia de calor desde la llama a la sustancia a calentar
- ✓ Generación de enfermedades pulmonares
- Retrollama

Se produce cuando la llama se propaga al interior del quemador y se debe a que la velocidad de salida de la mezcla aire-gas es menor que la velocidad de propagación de la combustión, se corrige aumentando la presión de alimentación o cambiando el inyector. Tiene tendencia al retorno los quemadores alimentados con gas ciudad [23].

Ocurre cuando se rompe el equilibrio en el frente de llama, al ser la velocidad de deflagración local mayor que la componente perpendicular de la velocidad de flujo aire y gas. El frente de llama viaja por el interior del mezclador, pudiéndose llegar a prender fuego en el inyector al establecerse en el orificio de descarga del gas combustible una llama de difusión. Generalmente ocurre cuando se presentan cambios bruscos en el caudal de la corriente de aire y gas que circula por el mezclador, es un fenómeno típico cuando se utiliza hidrógeno o mezclas de este con hidrocarburo, debido a la alta velocidad de deflagración laminar el hidrógeno [2].

En la gráfica 5, se detalla el proceso de retroceso de la llama,

Gráfica 5. Retorno de la llama



Fuente: SEDIGAS [23].

2. PROBLEMAS COMUNES AL APLICAR INTERCAMBIABILIDAD DE GASES EN EQUIPOS DE COMBUSTIÓN

Este capítulo menciona problemas e implicaciones comunes que se pueden presentar en máquinas que trabajan con gas como combustible (gases que no son intercambiables), además de saber qué sucede con el desempeño de los artefactos y la seguridad de los usuarios. Es de vital importancia saber que problemas pueden presentarse, ya que los fabricantes de gasodomésticos, diseñadores, instaladores y demás agentes que intervienen en la cadena del gas deben tener en cuenta cómo asegurar la intercambiabilidad de gases con los que trabajan las máquinas y así su funcionamiento sea correcto.

La intercambiabilidad de gases es un tema de gran importancia para las industrias, dado que ellas deben satisfacer las necesidades de sus clientes y, asegurar la calidad del gas natural que reciben los gasodomésticos, entre otros equipos que utilicen gas como combustible. Para obtener una intercambiabilidad deseada, a nivel industrial se exige que todas las máquinas que trabajan con gas, se encuentren diseñadas para operar dentro de un rango particular de especificaciones, todo esto para que exista una combustión completa, una buena estabilidad de llama y una ignición confiable. En caso de que el gas se encuentre fuera del rango sugerido, tendría que quemarse y conduciría a una serie de problemas que pueden ir desde una combustión de mala calidad hasta daños en los equipos o funcionamientos peligrosos [1, 4].

2.1. DIAGNÓSTICO GENERAL EN COLOMBIA

A continuación se presenta el análisis de la oferta y demanda de gas natural en el país, para el período 2016 – 2025, así como la evolución de las reservas de gas natural y su disponibilidad de corto y mediano plazo, a partir de la información más actualizada posible del año 2016 [24].

2.1.1. Reservas de gas natural. Las reservas probadas remanentes de gas están concentradas en tres cuencas principalmente; Llanos Orientales que comprende el 58% de las totales, la Guajira que contiene el 23% y le siguen en su orden Valle Inferior con 12% y Valle Medio con 2,5%. Las reservas probables y posibles, se localizan mayoritariamente en las mismas tres cuencas donde se concentraron las probadas; la mayor cantidad de reservas probables se presenta en la cuenca de la Guajira y equivalen a 35,7%, en tanto que las posibles se reparten entre el Valle Interior con 47,7% y 39,3% en los Llanos Orientales.

Para el año 2016 se calculó la relación reservas versus producción dando 8 años, si se mantiene la tasa de producción del año 2016 durante el período de análisis. Es decir si no se incorporan nuevas reservas en el año 2024, se iniciaría el déficit de gas natural para el país.

2.1.2. Producción de gas natural. La principal oferta proviene de los campos de la cuenca de los Llanos Orientales, esencialmente Cusiana, Cupiagua y Floreña, campos que proyectan una participación del 39% de la oferta total nacional, hasta alcanzar una participación del 56% en el año 2024 y del 51% en el 2025, año en el que el campo Cusiana inicia una fuerte declinación. Los campos de la cuenca de La Guajira (Chuchupa, Ballenas) participan con el 28% de la oferta nacional en el año 2016, participación que se reduce al 20% en el año 2019, al 15% en el 2021 y al 9% al final del 2024. Durante los últimos años, la cuenca del Valle Inferior del Magdalena ha tenido una importante participación en la oferta total nacional, gracias al aumento de producción de los campos: La Creciente, Nelson y el Difícil y a la entrada del campo Clarinete; adicionalmente en la declaración de producción de 2016, la empresa CALAMARI LNG S.A. E.S.P. informó sobre la disponibilidad de 400 GBTUD de gas natural importado a través de la planta ubicada en Cartagena (desde diciembre de 2016 hasta diciembre de 2024), lo cual permite que la cuenca del Valle Inferior del Magdalena participe con el 38% de la oferta total nacional en el 2017, alcanzando valores del 45% a finales de 2024. El resto de la oferta está dada por volúmenes menores en parte de la cuenca de los Llanos Orientales, Valle Superior del Magdalena, Valle Medio del Magdalena, Catatumbo y Cordillera Oriental. Los campos de la cuenca Caguán-Putumayo no declaran potencial de producción de gas natural.

Se observa que la oferta de gas natural se soporta principalmente en los Llanos Orientales (Cusiana, Cupiagua, Gibraltar, otros Llanos), los campos de La Guajira (Chuchupa, Ballenas y Riohacha) y, La Creciente, Clarinete, Nelson, Palmer, El Difícil entre otros ubicados en el Valle Inferior del Magdalena, y el resto de campos pequeños ubicados en las demás cuencas. La cuenca de La Guajira presenta una fuerte declinación, proceso que de alguna forma es contrarrestado por la oferta de las cuencas de los Llanos Orientales y Valle Inferior del Magdalena. No obstante, para el año 2025 además del ya mencionado descenso de los campos de La Guajira, se suma el campo Cusiana que inicia su proceso natural de agotamiento, por lo cual la importación se constituye en la alternativa prioritaria en caso de no incorporar nuevas reservas de gas natural.

De acuerdo con la información antes mencionada, la máxima capacidad de producción con oferta nacional ocurrió en enero de 2016, mes en el que se dispuso de 1366 GBTU y que al entrar en operación la planta de regasificación en la Costa Atlántica (en diciembre de 2016), se tendrá una disponibilidad de aproximadamente 1726,47 GBTUD.

Igualmente en los últimos años se ha mencionado sobre descubrimientos de gas natural en el offshore colombiano como los anuncios de hallazgos con el pozo Orca - 1, en el bloque Tayrona (aguas de La Guajira) y Kronos en el del bloque Fuerte Norte, cerca del golfo de Morrosquillo, también en el Caribe, sin disponer

de un potencial real que permita cuantificar los volúmenes de gas natural y por estar localizados en aguas profundas y ultraprofundas, en caso de materializarse las reservas, su desarrollo y puesta en funcionamiento puede tomar por lo menos unos seis años. Por tal razón, la oferta declarada en 2016, no muestra hallazgos, salvo los logrados en el Valle Inferior del Magdalena, que si bien no son de gran magnitud su aporte supera los 80 GBTUD, permitiendo desplazar la curva en el tiempo. Sobresale la oferta proveniente de la planta de regasificación que motiva la diferencia.

2.1.3. Escenarios de oferta de gas natural. La declaración de producción certificada por los agentes productores en el año 2016, es considerada como la oferta base para la realización de los balances y a partir de ésta se han definido dos escenarios que incluyen la importación de Venezuela y el resultado de incorporación de reservas probables, posibles y nuevos recursos.

- *Escenario bajo:* declaración de producción de 2016 (Resolución MinMinas 31132 de 30 de marzo de 2016)
- *Escenario medio:* escenario bajo + importaciones de Venezuela, toma como punto de partida el escenario bajo y se suman las cantidades importadas vía gasoducto desde Venezuela y que fueron estimadas por ECOPETROL entre 39 GBTUD hasta 150 GBTUD
- *Escenario alto:* escenario medio + desarrollo de reservas probables y reservas posibles y la incorporación de nuevos recursos, tanto convencionales como no convencionales. Éste escenario está conformado por el escenario medio, adicionado por una fracción de las reservas probables y posibles

Adicionalmente se supone la incorporación de gas natural proveniente de recursos “*yet to find*” a partir de enero de 2024 ubicados en el offshore colombiano y de recursos no convencionales provenientes de carbón a partir de enero de 2025 en la cuenca de Cesar Ranchería.

2.1.4. Demanda de gas natural. La estimación de demanda total de gas natural del país se realizó a partir de las proyecciones individuales de este energético en los distintos sectores de consumo y que comprenden residencial, comercial (terciario), industrial, petroquímico, petrolero (ECP), transporte (GNV) y termoeléctrico.

- *Sector Residencial:* en la actualidad, el servicio de gas natural cubre a más de 7,9 millones de hogares, y mantiene un consumo promedio relativamente estable por hogar que se aproxima a los 17 m³ mensuales, en las diferentes zonas. En consecuencia, el aumento de demanda depende del crecimiento demográfico y del incremento en la cobertura en cada una de las regiones del país.

Las proyecciones indican que las mayores tasas de crecimiento se presentan en las zonas de Noroeste, Caldas-Quindío-Risaralda y Sureste, en tanto que, la Región Costa ya está alcanzando su nivel de saturación con lo cual el crecimiento de usuarios es bajo, al igual que en Noreste. En el escenario medio, los resultados de la estimación indican una tasa de crecimiento del sector residencial de 3,2%, lideradas por el crecimiento en consumo y cobertura en regiones como Centro, Noroeste y Suroeste.

- *Sector Comercial:* la demanda comercial regional considera una tasa de crecimiento anual promedio de 2,48% entre 2015 y 2029. Las regiones con mayor dinamismo son Noreste y Centro, con 3,4% y 2,65% respectivamente. La región de mayor contribución corresponde a Centro, con casi el 50% del total del sector, seguida de la Costa.
- *Sector Petroquímico:* la demanda de gas natural del sector petroquímico está concentrada en dos regiones: Costa y Noroeste, con una participación de 95% y 5% respectivamente. La proyección de demanda de gas natural con destino a la petroquímica, la cual parece mantenerse en alrededor de 20 GBTUD. No se tiene conocimiento de entrada de nuevos proyectos que permitan aumento de la demanda.
- *Sector Industrial:* el gas natural es uno de los principales energéticos utilizados por el sector industrial, y dentro de la estructura de consumo de 2016 este sector ocupó el segundo lugar, con una participación de 28%, precedido por el sector eléctrico.

La demanda proyectada en el escenario medio para el período 2015 – 2029 presenta un crecimiento medio anual de 2,3%, pasando de 262,3 GBTUD en 2015 a 374,6 GBTUD en 2029 con un aumento de la demanda de 111,3 GBTUD. Regionalmente, Centro y Costa se mantienen como las de mayor participación relativa, llegando a 60% en el año 2024.

- *Sector Transporte Vehicular:* el escenario medio crecerá al 3,2% al pasar de 87 GBTUD en 2015 a 135 GBTUD en 2029. Regionalmente se estima que Tolima Grande, Noroeste y CQR serán las de mayor crecimiento con 5,1%, 4,6% y 4,5%, correspondientemente, mientras que Noroeste, Suroeste y Centro muestran los menores aumentos con 1,7%, 1,8% y 2,1% respectivamente. No obstante la región Centro será la de mayor participación relativa en todo el horizonte de análisis, seguida de la Costa.
- *Sector Termoeléctrico:* el cálculo de la demanda de gas natural del sector termoeléctrico depende principalmente de los aportes hidrológicos, así como de la senda de expansión de la capacidad de generación eléctrica en el largo plazo. La demanda de gas natural para el sector termoeléctrico seguirá aumentando, debido al incremento de generaciones de seguridad (evitar contingencias locales en los Sistemas Regionales de Transporte), en particular en la Región Caribe. La proyección de demanda del sector petrolero corresponde a los consumos previstos de las refinerías de

Cartagena y Barrancabermeja, consumos de la región Centro destinados a la generación de electricidad y consumos destinados a la producción petrolera.

En resumen se tiene que a nivel nacional, se estima que la demanda de gas natural en el escenario medio alcanzará un crecimiento promedio año de 2,2% entre 2015 y 2035, pasando de 1,060 GBTUD a 1,707 GBTUD, impulsada por el crecimiento económico, aumento de población y sustitución de algunos energéticos menos eficientes por gas natural, en cumplimiento de las recomendaciones ambientales de la reunión de París del año 2015. Cabe señalar que a los valores antes proyectados se añadió la proyección de consumo de los sistemas de compresión para la operación de transporte, el cual se consideró que corresponde a 2,5% de la suma de la demanda de los demás sectores. El crecimiento de las regiones está determinado por las características y actividades económicas que se desarrollan en las mismas. La Región Costa mantiene la mayor participación relativa a lo largo de la estimación, seguida por las regiones de Noroeste y Centro, constituyéndose en la de mayor contribución a la demanda. En la región Noreste, después del año 2020, la demanda aumenta significativamente como consecuencia de la ampliación de la refinería de Barrancabermeja y el desarrollo de extracción de petróleo con mecanismos de recuperación secundaria.

Para los años 2018 y 2019 hay una variación importante en la región Costa, resultado del aumento en generaciones de seguridad, de la conexión de nuevas cargas en 2018 y de la entrada de líneas de transmisión de electricidad desde el interior en 2019. De los siete sectores considerados, el residencial, terciario, vehicular, petroquímico e industrial crecen a una tasa relativamente estable, guiados principalmente por el crecimiento de la economía, de la población y la cobertura del servicio.

El sector que presenta un mayor aumento en sus consumos es el petrolero. Dicho aumento responde al desarrollo de proyectos de la compañía (Ecopetrol) como las ampliaciones de sus refinerías, la autogeneración de energía en la zona de los Llanos Orientales y consumos para incrementar la producción petrolera.

El sector termoeléctrico muestra variabilidad relacionada con la posibilidad simulada de que se presenten fenómenos hidrológicos secos en cualquier año del horizonte y aumentos de carga en zonas con restricciones de transporte de electricidad. El sector termoeléctrico muestra variabilidad que depende de fenómenos atmosféricos (períodos secos) y aumentos de carga en zonas con restricciones de transporte de electricidad y hacen que al final del período de proyección aumente la demanda de gas natural para responder a las necesidades del Sistema Interconectado Nacional, SIN. No obstante, en el período 2022 - 2025 se proyecta una menor demanda de gas natural originada en la entradas de proyectos de generación y de infraestructura de transporte que reducirán los requerimientos de gas natural para la generación eléctrica.

2.2. CALIDAD DEL GAS EN COLOMBIA

Con base en la producción de gas en Colombia, se tiene que las características son muy diferentes en cada una de las cuencas productoras cuyo contenido de metano va desde 75% hasta 97% y por ser en su mayoría un gas asociado a la producción de hidrocarburos líquidos van acompañados de hidrocarburos pesados, H₂S, CO₂ e inertes, los cuales alteran la composición química, las propiedades físico químicas, y por ende el índice de Wobbe.

El uso de algunos gases con estas composiciones químicas puede llegar a ser riesgoso en equipos que trabajen con gas, donde la potencia térmica nominal de estos gases sea alta. Además, de la composición del gas, la altitud también afecta la operación de los sistemas de combustión [9].

Actualmente, el gas de la Guajira (Chuchupa, Ballenas) y gas de Cusiana son importantes en Colombia, ya que cuentan con producción de gas superior a 30 GBTUD. Estos campos participan con una producción promedio de 28% y 39% del total nacional, respectivamente [21].

El gas natural de la Guajira ($G_r = 0,689 \frac{kg}{m^3}$ y $PCS = 996,1 \frac{BTU}{ft^3} @std$), y el gas natural de Cusiana ($G_r = 0,734 \frac{kg}{m^3}$ y $PCS = 1137,26 \frac{BTU}{ft^3} @std$), son dos gases que cuentan con composiciones químicas diferentes, que dada su condición de cubrir la mayor demanda del país, serán los responsables de cubrir necesidades inesperadas a lo largo y ancho de la demanda del país. Gracias a la ubicación geográfica de estos campos hoy día no se alcanza a dar una mezcla de los dos gases, pues el gas de la Guajira cubre casi toda la demanda del norte del país, mientras Cusiana cubre el centro y sur del país. En caso de que uno de estos campos tenga que cubrir necesidades de demanda del otro, se tendrá que dar una intercambiabilidad de estos gases. [9].

De otra parte según la Unidad de Planeación Minero Energética [21], el país requiere a partir del año 2024 importar gas a través de tubería o como gas natural licuado, por lo que es de vital importancia saber cuáles tipos de gases entrarán a nuestro país. Las posibles importaciones de gas licuado pueden venir de Bolivia, Trinidad y Tobago, Estados Unidos y Venezuela (según MinMinas, en el 2016 PDVSA ofreció exportar a Colombia unos 40 MMSCFD). En diciembre de 2016, Colombia ya cuenta con el primer puerto marítimo en manejo de regasificación de gas natural, con capacidad de 170.000 m³, ubicado en la Sociedad Portuaria El Cayao, Cartagena y que será el punto de provisión de gas para suplir las necesidades internas del país. Actualmente, la planta de regasificación entrega una producción de 40 MMBTUD.

El gas natural licuado se conoce como un gas que ha sido procesado para ser transportado en estado líquido a presión atmosférica y a temperatura de -162°C, lo cual se logra reducir su volumen hasta en 600 veces.

En la tabla 2, se muestra la composición típica de un gas natural en estado gaseoso y un gas natural licuado.

Tabla 2. Composiciones típicas gas natural y GNL

	GAS NATURAL (Estado gaseoso)	GAS NATURAL LICUADO
Metano	88,86%	91,1%
Etano	4,24%	4,3%
Propano	1,14%	3%
Butano	0,424%	1,4%
Pentano	0,126%	0%
Hexano	0,081%	0%
Heptano	0,024%	0%
Octano	0,003%	0%
Nitrógeno	4,006%	0,2%
CO₂	1,096%	0%
Agua	0,01%	0%
Punto de rocío HC, °C	-10,61	-27,8
Índice de Wobbe, MJ/m³	48,53	52,84

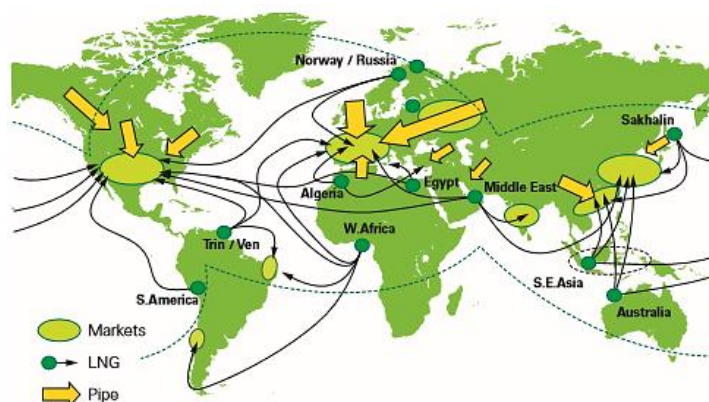
Fuente: GNL GLOBAL [13].

El gas natural licuado se considera un energético que provee un suministro seguro para los países, es por ello que ha aumentado su participación en el comercio mundial del gas, pero uno de sus inconvenientes es que para llegar a ser realmente comercializado a nivel mundial, se requiere resolver problemas de calidad e intercambiabilidad de los gases que se mezclen, más aún si se llegará a tener igual poder calorífico en los gases de mezcla. Además, se debe saber cuáles son los parámetros que rigen la intercambiabilidad y qué factores podrían llegar a verse afectados (gravedad específica, índices de combustión, etc.).

De otro modo, se sabe que las normas internacionales asociadas a la intercambiabilidad de gases varían en los diferentes mercados mundiales, por ende, las especificaciones también varían de un país a otro, así como la calidad del gas (en regiones y en máquinas), pero todo esto, debe tenerse en cuenta para que el suministro al usuario final sea confiable. Actualmente, se sabe que gran parte de gas natural licuado que se comercializa internacionalmente no se encuentra entre los rangos permitidos de especificaciones de calidad establecidos, además de que el gas natural licuado regasificado tiene un índice de Wobbe más alto que el de los gases de gasoductos y por ello debe ser tratado antes de entrar al Sistema Nacional de transporte (caso Colombia) o gasoductos principales del país [4].

Actualmente, existen 48 países (19 exportadores y 29 importadores) involucrados en el negocio de gas natural licuado a nivel mundial. En la gráfica 6, se puede ver algunos de los países exportadores de gas natural licuado y las rutas de comercio en el mundo.

Gráfica 6. Países exportadores de GNL en el mundo



Fuente: GNL GLOBAL [13].

Los 19 países exportadores de GNL, se encuentran localizados en África (5), América (3), Asia (3), Euro-Asia (1), Europa (1), Medio Oriente (4) y Oceanía (2), los cuales al 2015 su capacidad mundial de licuefacción de gas natural fue de 308,8 millones de toneladas por año. Siendo Qatar el mayor exportador del mundo con 77,4 millones de toneladas por año [13].

Actualmente en Colombia falta mayor investigación en el tema de intercambiabilidad de gases, ya que si se implementará se podría llegar a tener ventajas económicas y tecnológicas. No existen estudios que tomen en cuenta las incidencias de las condiciones atmosféricas, ni la variación en los diferentes pisos térmicos del país. Por consiguiente, se hablará de varios problemas que pueden ocurrir al no tomarse en cuenta la intercambiabilidad en equipos que operan con gas como combustible.

2.3. PROBLEMAS ASOCIADOS A LA INTERCAMBIABILIDAD EN EQUIPOS QUE TRABAJAN CON GAS

En la tabla 3, se muestra a partir de las máquinas según uso doméstico, industrial o comercial, los principales fenómenos que pueden llegar a presentarse si no se encuentra la composición del gas dentro de los límites aceptables.

Para que no se presenten estos fenómenos, es necesario establecer límites en especificaciones de intercambiabilidad de gases para dar mayor fiabilidad, disminución de emisiones, aumento de seguridad en equipos de uso final y generar menores costos para los consumidores. Además, las características de un gas pueden variar significativamente cuando se mezclan gases de diferentes fuentes o regiones.

Tabla 3. Fenómenos asociados de acuerdo a máquina que opera con gas

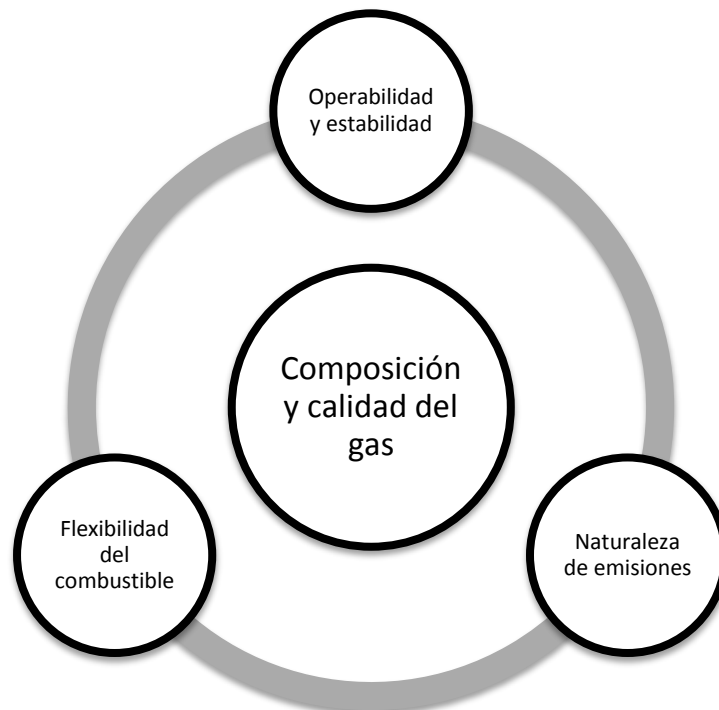
USUARIO FINAL	MÁQUINA QUE TRABAJA CON GAS		PARÁMETRO DE CONTROL	SENSIBILIDAD A LOS CAMBIOS EN LA CALIDAD DEL GAS	FENÓMENOS QUE SE PRESENTAN CUANDO LA COMPOSICIÓN ESTÁ FUERA DE LÍMITES ACEPTABLES*
DOMÉSTICO	QUEMADOR DOMÉSTICO	Estufas Calentadores Calefactores Secadoras Chimeneas	Índice de Wobbe	Alto	Formación de hollín Elevados niveles de CO Emisiones contaminantes Llama con puntas amarillas Desprendimiento/retroceso de llama Variación de potencia Daño o reducción de la vida útil (equipo o partes de la máquina) Reduce eficiencia y rendimiento de la máquina
COMERCIAL / INDUSTRIAL	QUEMADOR COMERCIAL / INDUSTRIAL	Calderas Hornos Intercambiadores de calor Calentadores	Índice de Wobbe Poder calorífico	Bajo - Medio	Dificulta cumplir requerimiento de emisiones Reduce eficiencia y rendimiento de la máquina Variaciones en el régimen de transferencia de calor
	TURBINAS DE COMBUSTIÓN		Índice de Wobbe Índice de Wobbe modificado Índice de gas Índice de combustible	Bajo - Alto	Elevados niveles de CO Emisiones contaminantes Daño o reducción de la vida útil (equipo o partes de la máquina) Reduce eficiencia y rendimiento de la máquina o motor Reduce la confiabilidad o disponibilidad
	MÁQUINAS RECIPROCANTES	Motores Compresores Bombas	Índice de Wobbe Número de metano Número de octano Relación aire/combustible Composición del gas Resistencia al knock	Alto	Emisiones contaminantes Daño o reducción de la vida útil (equipo o partes de la máquina) Combustión e ignición inestable Puede generar auto ignición y knock

Fuente: BRITISH PETROLEUM, CREG, RUBIO GAVIRIA, Lina María [4, 6, 22].

NOTA*: Las boquillas en quemadores de usuarios finales están diseñadas para operar adecuadamente con gases cuya composición este dentro de ciertos límites, los fenómenos se presentan cuando la composición no se encuentra dentro de los límites aceptables.

De otro modo, para que exista una buena evaluación y gestión de la intercambiabilidad siempre debe tenerse en cuenta los siguientes parámetros principales mostrados **en la gráfica 7**.

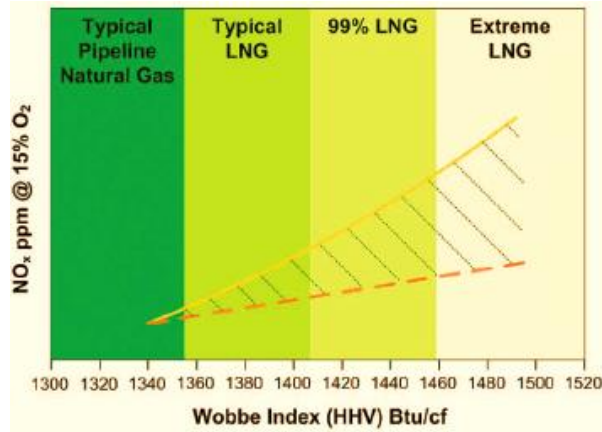
Gráfica 7. Parámetros principales para evaluación de intercambiabilidad de gases



Todas estas variables son de gran relevancia para evaluar la intercambiabilidad, ya que si no se controlan pueden llegar a aparecer problemas asociados a fenómenos de combustión o naturaleza de emisiones, los cuales pueden afectar el desempeño de los equipos. Lo que se quiere, es que los equipos operen siempre dentro de un intervalo óptimo para el cual fueron diseñados y ensayados; además los diseños de quemadores anteriormente eran menos sensibles a los cambios de calidad del gas, pero mostraban un aumento en el índice de Wobbe, es por ello que debe identificarse actualmente todos los problemas que podrían verse reflejados en equipos que trabajen a gas para que la intercambiabilidad se garantice y sea óptima [4, 18].

En la **gráfica 8**, puede apreciarse que al aumentar el índice de Wobbe, se presenta mayor cantidad de emisiones de NO_x, ya sea para gas natural de composición típica, y diferentes composiciones en gas natural licuado.

Gráfica 8. Índice de Wobbe versus emisiones NO_x



Fuente: BRITISH PETROLEUM [4].

NOTA GENERAL: Los siguientes problemas que se presentan no solo dependen del gas, también dependen de la tecnología del equipo de combustión, ya que ellos son sensibles de sufrir problemas de desempeño, eficiencia e inconvenientes de seguridad [18].

2.3.1. Composición y calidad del gas. Al variar la composición del gas, puede afectarse el aumento y la composición de la cantidad de emisiones de inquemados [1].

Al variar la calidad del gas, puede causarse problemas en parte operacional, seguridad y rendimiento; no se garantiza la integridad y operatividad del sistema para el transporte de gas, no se brinda eficiencia y seguridad en los aparatos comerciales, industriales y domésticos ya que se tendría dudas sobre la calidad del producto en el momento de empleo en procesos industriales donde la combustión sea crítica o el gas se utilice como materia prima, además, el número de metano y el contenido de inertes afectarían el rendimiento del motor a gas natural. También debe tenerse en cuenta aspectos técnicos en cuanto a tener presente parámetros como poder calorífico (superior e inferior) y densidad relativa con el fin de garantizar el rendimiento satisfactorio de los equipos.

Si la calidad del gas importado no cumple con especificaciones de gasoducto, deben aparecer opciones existentes para ajustar la calidad del gas en punto de producción, en puntos de entrada para cumplir los límites existentes o considerar ensanchamiento de límites de especificación de gas.

Si se alimenta un quemador de mayor índice de Wobbe, se podría perder eficiencia en la relación aire/combustible preestablecida; el gas de alimentación

del índice de Wobbe causará la combustión incompleta debido a la falta de oxígeno, lo cual reduce directamente la salida de energía y resulta en pérdida de eficiencia de la combustión, se aumentaría la emisión de monóxido de carbono ya que el quemador opera con un exceso de aire significativamente reducido.

Si se alimenta un gas de índice de Wobbe inferior al quemador, resultan cambios en los niveles de emisión de contaminantes, aumento del exceso de aire sustancialmente, pérdida en la eficiencia general y además, el índice de Wobbe causaría un aumento en el nivel de oxígeno en el gas de combustión de salida [4].

2.3.2. Operabilidad y estabilidad. Al no asegurar la integridad del sistema y operatividad para el transporte de gas se puede llegar a causar problemas como incumplimiento potencial de regulaciones de transporte de gas natural, efectos sobre los sellos en el sistema de distribución debido a la naturaleza relativamente seca del gas natural licuado re gasificado, y además, dificultad en medición y control de valor de calefacción variable que incide en la facturación energética al usuario final [4].

De otro modo, si no se garantiza una seguridad en la combustión se podría generar elevadas emisiones de CO en aparatos y equipos, sobrecalentamiento de las superficies, riesgo de incendios debido a llamas extendidas y sobrepresión debido a ignición retardada.

Si no se tiene fiabilidad del desempeño, se podría llegar a tener estabilidad de llama pobre, escapes o retrocesos de llama desde la cabeza del quemador, se reducirá la eficiencia debido a cambios de la velocidad de entrada, de la altura y forma de la llama, además de la reducción de la capacidad de los equipos.

También, si se pierde la durabilidad de los aparatos y equipos por no garantizar una intercambiabilidad óptima, se puede tener degradación térmica, fatiga, deformación de los componentes de los equipos, ensuciamiento por producción de hollín y disminución del desempeño de la confiabilidad y seguridad del sistema en general; de otro modo debe tenerse en cuenta las especificaciones del gasoducto por donde se conduzca las mezclas de gases, se debe asegurar que el material de la tubería de transporte cumpla con condiciones para asegurar un transporte fiable [14].

2.3.3. Naturaleza de emisiones. Las emisiones más concurrentes que pueden tenerse son monóxido de carbono, hollín, hidrocarburos sin quemar y NO_x [18].

La producción de monóxido de carbono es un problema que debe controlarse en todo momento, ya que en grandes dosis se convierte en veneno agudo hipóxico, lo cual resulta en un problema para los equipos no venteados, y además en los venteados pero con fallas de aireación. Puede generarse por factores que obstruyan la entrada de suficiente aire al tener una elevada producción de CO y puede observarse en las puntas amarillas de las llamas.

La producción de hollín o material particulado, se conoce como la fuente de ensuciamiento de la combustión, la cual provoca la disminución del desempeño de un equipo, además de producirse a altas temperaturas y escasez de oxígeno en la combustión y puede cambiar las características de los equipos de combustión, en algunos casos puede no verse problemas operacionales, pero si existe alta acumulación de hollín, suciedad en la cámara de combustión y sistemas de venteo, pueden tenerse condiciones operativas peligrosas.

La producción de NO_x , produce sensibilidad en el desempeño de los equipos por los límites de emisión de calidad del medio ambiente. Debe evitarse la producción de NO_2 , ya que es un irritante respiratorio el cual afecta la salud y seguridad del consumidor [14].

2.3.4. Flexibilidad del combustible. Algunos problemas que surgen de la sustitución inadecuada de un combustible (gas natural, GNL, etc.) pueden ser de variar la composición más allá de los límites permisibles y se puede tener efectos como formación de hollín, altas emisiones de CO y otros contaminantes, inestabilidades de llama (desprendimiento y retroceso), aparición de puntas amarillas y, acortamiento de la vida útil de los aparatos y accesorios del equipo [12, 15].

3. MÉTODOS PARA LA EVALUACIÓN DE INTERCAMBIABILIDAD DE GASES EN COLOMBIA

Existen diferentes tipos de métodos para evaluar y definir la intercambiabilidad de gases combustibles, los cuales relacionan propiedades fisicoquímicas del gas y fenómenos del gas, entre ellos se encuentran: los métodos de índice simple, métodos de índices múltiples y métodos de diagramas, entre otros, los cuales generalmente se basan en parámetros empíricos desarrollados para ajustarse a resultados de experimentos de intercambiabilidad y además, permiten una mejor caracterización, un rango más ajustado y determinan el comportamiento de la combustión del gas sustituto [12, 14].

Hoy en día, se sigue realizando investigaciones para desarrollar y evaluar los índices de intercambiabilidad, los estudios continuarán a medida que las máquinas de combustión de uso final y gasodomésticos se vuelvan más sofisticados (exigentes) para cumplir con los requisitos actuales de la eficiencia y requerimiento de emisiones [12, 15].

Uno de los índices que se mencionará en este capítulo, es el índice de Wobbe (método de índice simple) el cual es considerado el más eficaz y robusto para la medición de intercambiabilidad de gases pero aún le faltan más parámetros relacionados con los fenómenos de combustión además de emisiones.

Por otro lado, se mencionarán los métodos de índices múltiples y métodos de diagramas, los cuales evalúan un gas sustituto para determinar el comportamiento de fenómenos de combustión específicos tales como, desprendimiento, retroceso de llama, combustión incompleta, etc.

Se hablará de los cuatro métodos, ya que los índices de intercambiabilidad representan el mejor punto para el desarrollo de las directrices de la intercambiabilidad de gases.

3.1. CONTEXTUALIZACIÓN HISTÓRICA DE MÉTODOS

Los estudios y la elección de los métodos a lo largo de los años ha requerido de un enfoque estratégico el cual tome en cuenta la totalidad de la cadena del gas además de aspectos comerciales y regulatorios. Las principales preocupaciones en el diseño de los métodos, tiene que ver con la calidad del gas e impactos operacionales en el transporte, el exceso de concentraciones de dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno y agua, con el fin de evitar bloqueos y corrosiones en el transporte del gas [4].

El tema de la intercambiabilidad de gases apareció mucho antes de los años 90, y comenzó con el uso de gases manufacturados, su propósito era evaluar con métodos, la intercambiabilidad entre gases manufacturados y gases naturales. A inicios de los años 90, a partir de las variedades de las composiciones de los gases y fenómenos de combustión, han permitido enfocarse en desarrollo de índices (con ensayos experimentales).

En Estados Unidos, comenzaron a evaluar aspectos de calidad del gas natural y establecieron regionalmente el índice de Wobbe, además de otros, debido a la gran diversidad de gases y equipos de los usuarios finales (nuevas y antiguas tecnologías en gasodomésticos), el Natural Gas Council ha recomendado un rango del índice de Wobbe de $\pm 4\%$ alrededor del valor típico o histórico en cada región.

Mientras que en Europa, se analizó que el gas natural presenta importantes diferencias en su composición, por lo que se desarrollaron varios análisis en el Reino Unido ya que el país se convertiría en un importador neto de gas, y la composición del gas importado superaría el índice de Wobbe al aprobado por el regulador de Reino Unido. Finalmente, se estudiaron dos alternativas: modificar el índice de Wobbe en Reino Unido (ajustando sus características a las del gas importado) y, no modificando el índice de Wobbe existente y establecer señales regulatorias que facilitarían la inversión necesaria para adecuar el gas antes de inyectarlo al sistema de transporte (ya que modificar el índice de Wobbe, implica reemplazar o adaptar equipos de usuarios finales), por lo que el regulador finalmente, adoptó la segunda opción [6].

En la tabla 4, se muestra algunos métodos tanto americanos como europeos más relevantes para evaluar la intercambiabilidad en gases naturales.

Tabla 4. Métodos para evaluación de intercambiabilidad de gases

INTERCAMBIABILIDAD PARA GASES NATURALES		
MÉTODOS	AMERICANOS	EUROPEOS
ÍNDICE SIMPLE	Índice de Knoy Índice de Willien	Índice de Wobbe superior Índice de Schuster
ÍNDICES MÚLTIPLES	Índice de la AGA Índice de Weaver	
DIAGRAMAS	Diagramas de Grummer, Harris and Rowe	Diagramas de Delbourg Diagramas de Dutton Diagrama de Gilbert-Priggs Diagramas de Harris-Lovelace Diagramas de Harris-Wilson Diagramas de Holmqvist Diagramas de Van Der Linden Diagramas de France
OTROS		Sommers-Ruhrgas

Debido a la diversidad de métodos surgidos históricamente, a continuación se realizará un recuento de los de mayor relevancia entre los métodos principales (simple, múltiples, diagramas y otros). Algunos de ellos se encuentran basados en entrada de energía, otros incorporan fenómenos fundamentales de la combustión.

Cada uno de los índices tiene límites para el valor predictivo de su aplicación. La importancia de medir la intercambiabilidad (independiente del índice que se utilice, es proporcionar una correlación predictiva entre características físicas medibles del gas natural y el rendimiento del quemador [12].

3.2. MÉTODOS DE ÍNDICE SIMPLE

Los siguientes métodos, fueron los primeros intentos para afrontar el tema de la intercambiabilidad de gases.

En la tabla 5, se resume los diferentes métodos de índices simples que se explicarán.

Tabla 5. Índices simples de intercambiabilidad

MÉTODO	AÑO/PAÍS	TIPO DE GAS	TIPO DE QUEMADOR
WOBBE	1927/Italia	Gases manufacturados Gases naturales	Describe físicamente el fenómeno de flujo de gas a través de un orificio con área constante que funciona como inyector o puerto de entrada de energía a un quemador
WILLIEN	1938/Estados Unidos	Gases manufacturados (con poder calorífico de 500 BTU/ft ³)	Quemadores atmosféricos
KNOY	1941/Estados Unidos	Mezclas GLP/aire para complementar los gases naturales	Quemadores atmosféricos
SCHUSTER	1957/Alemania	Gases manufacturados	Equipos alemanes representativos caracterizados por quemadores para ensayos

Fuente: POLYGON ENERGY [19].

3.2.1. Índice de Wobbe superior

Es el parámetro simple de mayor importancia, además de ser sencillo y fácil de usar. Es el más ampliamente aceptado en el ámbito internacional para la medición de intercambiabilidad de gases y a la fecha, continúa vigente dado que es el de mayor aplicación [18, 19].

Se basa en la descripción física del fenómeno de flujo de gas a través de un orificio de área constante que funciona como inyector o puerto de entrada de energía a un quemador.

El flujo de gas en términos de la entrada de energía al quemador, es equivalente al producto entre el poder calorífico superior del gas y el caudal volumétrico.

$$Q_{energía} = PCS * Q_v \quad (Ec. 7)$$

A presión constante, el caudal volumétrico a través de un orificio fijo es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de su densidad relativa, siendo la densidad relativa el cociente entre la densidad del gas y la densidad del aire a las mismas condiciones de presión y temperatura.

$$Q_v \propto \frac{1}{\sqrt{G_r}} \quad (\text{Ec. 8})$$

Por lo que, Wobbe estableció una proporcionalidad que combinaba las ecuaciones de flujo de entrada de energía al quemador y la hidráulica asociada al flujo de gas.

$$IWS = Q_{energía} \propto \frac{PCS}{\sqrt{G_r}} \quad (\text{Ec. 9})$$

De otro modo, el índice de Wobbe representa la energía del gas que es inyectado a un quemador. Wobbe formuló las siguientes observaciones,

- La energía que suministra un quemador es directamente proporcional al caudal volumétrico de gas que ingresa al quemador (considerando que el diámetro y la presión en el inyector son constantes)
- La velocidad del flujo a través de un orificio dado, a presión constante es inversamente proporcional a la densidad relativa del gas
- El poder calorífico de un gas es directamente proporcional a su densidad relativa [9, 18]

Una de sus desventajas es que en muchas aplicaciones, el índice de Wobbe no es suficiente para predecir comportamientos de combustión, por lo que además del índice de Wobbe deben identificarse factores como:

- Estabilidad de llama
- Idéntica calidad de combustión
- Relación de volúmenes de CO y CO₂ inferior al límite máximo admitido
- Rendimiento de combustión
- Temperatura de rocío en los humos
- Factor de aireación

Criterio de intercambiabilidad: dos o más gases son intercambiables si poseen igual número de Wobbe, y además pertenecen a la misma familia [9, 18, 19].

3.2.2. Índice de Willien. El objetivo de este método era calcular la intercambiabilidad de gases manufacturados con poderes caloríficos que no sobrepasaran de 500 BTU/ft³. Se evaluó en 131 gases manufacturados de diferentes composiciones y se determinó que:

- Para valores menores a 165 BTU/ft³, los quemadores de los artefactos presentaban retroceso de llama
- Para valores mayores a 185 BTU/ft³, se presentaba combustión incompleta

- Si se encontraba el poder calorífico superior entre 165 BTU/ft³ a 185 BTU/ft³, los dos o más gases era intercambiables [9]

Sus desventajas radican en que no se contemplan fenómenos de combustión, además de solo considerar gases con poderes caloríficos muy bajos. Y su desarrollo contempló consideraciones como:

- La mezcla en la cabeza del quemador posee un poder calorífico de 175 BTU/ft³
- La caída de presión es igual para diferentes gases
- El diámetro del inyector es igual para diferentes gases
- La tasa de aireación primaria es independiente de la densidad relativa del gas

A continuación se muestra la ecuación de Willien siendo,

$$F = \frac{PC_s * \sqrt{G_{r_a}}}{\sqrt{G_{r_a}} + \left(\frac{PC_a - 175}{175} * \sqrt{G_{r_s}} \right)} \quad (Ec. 10)$$

Siendo, F: constante de intercambiabilidad de Willien; PC: poder calorífico (BTU/ft³); Gr: densidad relativa; subíndice a: relaciona el gas de ajuste o de referencia; subíndice s: relaciona el gas de reemplazo.

Criterio de intercambiabilidad: dos o más gases son intercambiables si el cálculo del número F se encuentra dentro del rango de 160 y 190 [9].

3.2.3. Índice de Knoy. Se desarrolló como una versión simplificada del índice de Willien y, asume que la mezcla aire-gas en el cabezal del quemador atmosférico tiene un poder calorífico de 175 BTU/ft³, derivando la siguiente expresión:

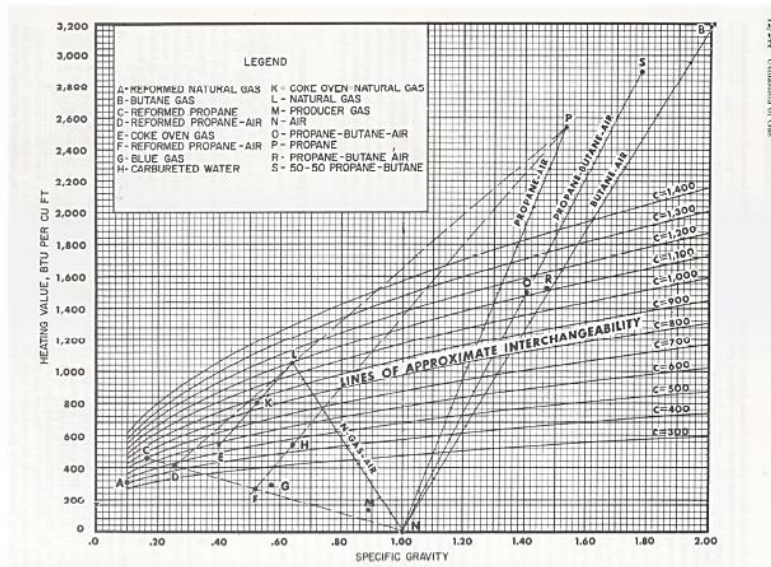
$$C_{Knoy} = \frac{PC - 175}{\sqrt{G_r}} \quad (Ec. 11)$$

Siendo, C_{Knoy}: constante de intercambiabilidad de Knoy. Y para garantizar una buena intercambiabilidad, el gas sustituto debe tener el mismo C que el gas de ajuste o referencia (se permite una desviación de ±5%).

Criterio de intercambiabilidad: dos o más gases son intercambiables si el cálculo de su número C es igual, con una desviación tolerable de ±7,5% [9].

En la gráfica 9, se puede apreciar la carta de intercambiabilidad de Knoy y con ella puede determinarse la intercambiabilidad de la mezcla de dos gases, esta es una aproximación empírica lo cual no considera variables asociadas a la combustión, y puede llegar a presentar resultados erróneos ante variaciones de las composiciones de los gases.

Gráfica 9. Carta de intercambiabilidad de Knoy



Fuente: POLYGON ENERGY [19].

3.2.4. **Índice de Schuster.** Se conoce como el primer intento para medir los efectos de la combustión al variar las composiciones de los gases.

Se deriva de la consideración del balance entre el índice de Wobbe y la velocidad de deflagración,

$$S_c = \frac{IW}{S_u} \quad (Ec. 12)$$

Siendo, S_c : constante de intercambiabilidad de Schuster; S_u : velocidad de llama o producción de calor.

Su desventaja, es que se encuentra limitado debido a la poca disponibilidad de datos referentes a las velocidades de llama en el momento de su desarrollo.

Criterio de intercambiabilidad: dos o más gases son intercambiables, si el cálculo del número S_c de Schuster es igual [9].

3.3. MÉTODOS DE ÍNDICES MÚLTIPLES

Se han desarrollado varios métodos y parámetros para caracterizar la intercambiabilidad de diferentes gases naturales, pero actualmente continúan vigentes y son de mayor aplicación en la actualidad, los índices de AGA y Weaver [6, 19]. Estos métodos tienen gran uso en la industria ya que incorporan índices con relación a combustión y gases combustibles. **En la tabla 6**, se muestra los métodos que se hablarán en esta sección.

Tabla 6. Índices múltiples de intercambiabilidad

MÉTODO	AÑO/PAÍS	TIPO DE GAS	TIPO DE QUEMADOR
AGA	1946/Estados Unidos	Gas de ajuste: Gas natural (con alto poder calorífico o contenido de inertes) Gas complementario: Gas de agua, de horno de coque, o mezcla ¹	Quemadores de prueba AGA
WEAVER	1951/Estados Unidos	Gases manufacturados Gases naturales	Difusión de llama aireada para aplicaciones residenciales

Nota¹: Puede ser de aire/butano, gas productor/butano o gas azul/butano.

Fuente: POLYGON ENERGY [19].

3.3.1. Índice de la AGA

El boletín AGA 36, es uno de los principales estudios realizados por la Asociación Americana de Gases, en donde se muestra el desarrollo de los índices de intercambiabilidad AGA. En ello, se muestra como los gases con poderes caloríficos mayores a 800 BTU/ft³ pueden sustituir o llegar a ser sustituidos por gases naturales o mezclas de gases de alto poder calorífico.

A sus comienzos determinaron una fórmula para calcular el índice de cambio en el desempeño del equipo,

$$c = \frac{PC_s * B_s * G_{r_a}}{PC_a * B_a * G_{r_s}} + \left(\frac{PC_a * B_a}{5000 * E_a * f_a} - \frac{PC_s * B_s}{5000 * E_s * f_s} \right) \quad (Ec. 13)$$

Siendo, c el índice de cambio de desempeño del equipo; B_s es la relación de aire requerido teóricamente para la combustión en ft³ de aire por ft³ de gas de reemplazo; B_a es la relación de aire requerido teóricamente para la combustión en ft³ de aire por ft³ de gas de ajuste; E_a es el contenido calórico de los productos de combustión desde 60°F hasta 1600°F en el gas de ajuste, en BTU/ft³; E_s es el contenido calórico de los productos de combustión desde 60°F hasta 1600°F en el gas de reemplazo, en BTU/ft³; f_a es la sumatoria de los productos de la fracción másica y una constante resolviendo cada constituyente del combustible sobre la base de hidrógeno libre equivalente del gas de ajuste; f_s es la sumatoria de los productos de la fracción másica y una constante resolviendo cada constituyente del combustible sobre la base de hidrógeno libre equivalente del gas de reemplazo. Para un desempeño satisfactorio del gas sustituto, c debe estar entre 0,85 y 1,15.

En 1946, se publicó el Boletín 36, "Intercambiabilidad de otros gases con el gas natural", el cual permitió desarrollar varios índices ya que al usar un solo índice, no se cubría adecuadamente el rango completo de diferencias en el desempeño de la llama. Estos índices son:

- Índice de desprendimiento "*Lifting index*"

- Índice de retollama “Flashback index”
- Índice de puntas amarillas “Yellow tip index”

En las mediciones se involucraba como base al gas natural y como sustituto, gases con poderes caloríficos superiores a 800 BTU/ft³.

Índice de desprendimiento de llama,

$$I_L = \frac{K_a}{\frac{f_a' * A_s}{f_s' * A_a} * \left[K_s - \log \left(\frac{f_a'}{f_s'} \right) \right]} \quad (Ec. 14)$$

Índice de retroceso de llama,

$$I_F = \frac{K_s * f_s' * \sqrt{\frac{PCS_s}{1000}}}{K_a * f_a'} \quad (Ec. 15)$$

Índice de puntas amarillas,

$$I_Y = \left(\frac{f_s' * A_a * Y_a}{f_a' * A_s * Y_s} \right) \quad (Ec. 16)$$

Siendo, K_a : constante del límite de desprendimiento de gas de ajuste dado por $K_a = F'/G_r$; K_s : constante del límite de desprendimiento de gas de reemplazo dado por $K_s = F'/G_r$; f_a' : factor de aire primario de gas de ajuste dado por $f_a' = \frac{1000 * \sqrt{Gr_a}}{PC_a}$;

f_s' : factor de aire primario de gas de reemplazo dado por $f_s' = \frac{1000 * \sqrt{Gr_s}}{PC_s}$; A_a : pies cúbicos de aire teóricamente requeridos para la combustión completa por 100 BTU de gas de ajuste; A_s : pies cúbicos de aire teóricamente requeridos para la combustión completa por 100 BTU de gas de reemplazo; PCS_s : Poder calorífico superior de gas de reemplazo; Y_a : límite de puntas amarillas (porcentaje de aire primario) de gas de ajuste dado por $Y_a = \frac{100 * T'}{A_a + 7 * E_a - 26,3 * O_{2a}}$; Y_s : límite de puntas amarillas (porcentaje de aire primario) de gas de reemplazo dado por $Y_s = \frac{100 * T'}{A_s + 7 * E_s - 26,3 * O_{2s}}$; F' : constante de desprendimiento; T' : constante de puntas amarillas; O_{2a} : oxígeno contenido por pie cúbico de gas de ajuste; O_{2s} : oxígeno contenido por pie cúbico de gas de reemplazo.

Los valores obtenidos por índice para cada tipo de gas se resumen en la tabla 7.

Tabla 7. Índice de AGA para cada tipo de gas

ÍNDICE DE INTERCAMBIABILIDAD	Gas natural con alto poder calorífico		Gas natural con alto contenido de metano		Gas natural con alto contenido de inertes	
	Preferible	Objetable	Preferible	Objetable	Preferible	Objetable
I_L	< 1	>1,12	<1	>1,06	<1	>1,03
I_F	<1,18	>1,2	<1,18	>1,2	<1,18	>1,2
I_Y	>1	<0,7	<1	<0,8	>1	<0,9

Fuente: CORTÉS TORRES, Jaime Hernán, POLYGON ENERGY [9, 19].

Un gas completamente intercambiable, se obtiene cuando el gas de ajuste y el gas sustituto tienen la misma composición, en donde los índices I_L , I_F , I_Y , tengan valores iguales a uno. Los límites preferibles están fijados en este valor. Los

límites objetables corresponden a valores que proporcionan un funcionamiento apenas satisfactorio. Tales valores se determinan ensayando una variedad de equipos, regulándolos de acuerdo con el gas de ajuste y variando las mezclas de gas hasta que aparezcan los tres criterios de intercambiabilidad (desprendimiento de llama, retroceso de llama y puntas amarillas).

3.3.2. **Índice de Weaver.** Weaver desarrollo seis índices para incluir muchas más características de combustión de una llama con respecto al índice AGA, con el fin de generar resultados satisfactorios (o insatisfactorios) de intercambiabilidad sin modificar el ajuste original del equipo de combustión. Estos índices incluyen valores como, velocidad de deflagración y combustión incompleta, lo cual es un marco de referencia mucho más completo que el índice de Wobbe simple o combinado con otra propiedad o característica del gas [18]. En la tabla 8, se muestra los índices propuestos por Weaver,

Tabla 8. Índices propuestos por Weaver

ÍNDICE	DESCRIPCIÓN	CRITERIO
$J_H = \frac{PC_s}{PC_a} * \sqrt{\frac{G_{ra}}{G_{rs}}}$	<p>ÍNDICE DE ENTRADA DE CALOR</p>	<p>Para gases exactamente intercambiables en este aspecto $J_H = 1$, muestra cuantitativamente el efecto de un cambio en la composición del gas con respecto al consumo de calor en el artefacto.</p>
$J_A = \frac{A_s'}{A_a'} * \sqrt{\frac{G_{ra}}{G_{rs}}}$	<p>ÍNDICE DE AIREACIÓN PRIMARIA</p> <p>Siendo, A_a': volumen de aire (expresados en pies cúbicos) requerido para la combustión completa de un pie cúbico de gas de ajuste; A_s': volumen de aire (expresados en pies cúbicos) requerido para la combustión completa de un pie cúbico de gas de reemplazo</p>	<p>Cuando $J_A = 1$, la cantidad total de aire requerido para quemar los gases es la misma, la fracción del aire que corresponde a aire primario es la misma, y a menos que se presenten fenómenos convectivos inusuales, el exceso de oxígeno en los productos de combustión es el mismo. De esta manera, es un indicador relativo del riesgo de combustión incompleta (generación de monóxido de carbono).</p>
$J_L = J_A * \frac{S_s}{S_a} * \frac{100 - Q_s}{100 - Q_a}$	<p>ÍNDICE DE DESPRENDIMIENTO DE LLAMA</p> <p>Siendo, S_s: máxima velocidad de propagación de la llama en una mezcla de gas-aire, expresada como una fracción de la velocidad de la llama para el hidrógeno en gas de reemplazo, S_a: máxima velocidad de propagación de la llama en una mezcla de gas-aire, expresada como una fracción de la velocidad de la llama para el hidrógeno en gas de ajuste, Q_s:</p>	<p>Para gases que son exactamente intercambiables con respecto al desprendimiento de la llama $J_L = 1$. Muestra la tendencia relativa de las llamas de los dos gases a separarse de los puertos del quemador.</p>

	porcentaje de contenido de oxígeno en el gas de reemplazo, Q_a : porcentaje de contenido de oxígeno en el gas de reemplazo	
$J_F = \frac{S_s}{S_a} - 1,4 * J_A + 0,4$	ÍNDICE DE RETROCESO DE LLAMA	Muestra la tendencia relativa de las llamas de los dos gases a retroceder al interior de los quemadores. Cuando $J_F = 0$, no hay diferencia entre los dos gases en este aspecto.
$J_Y = J_A + \frac{N_s - N_a}{110} - 1$	ÍNDICE DE PUNTAS AMARILLAS Siendo, N_s : número de átomos de carbono liberados fácilmente por cada cien moléculas de gas de reemplazo; N_a : número de átomos de carbono liberados fácilmente por cada cien moléculas de gas de ajuste	J_Y es una medida de la tendencia relativa de los dos gases a producir llamas amarillas y liberar hollín. Cuando $J_Y = 0$, no hay diferencia entre los dos gases en este aspecto.
$J_I = J_A - 0,366 * \frac{R_s'}{R_a'} - 0,634$	ÍNDICE DE COMBUSTIÓN INCOMPLETA Siendo, R_s' : relación entre el número de átomos de hidrógeno en todas las formas de combinación presentes en el gas combustible con y el número de átomos de carbono en los hidrocarburos del gas de reemplazo; R_a' : relación entre el número de átomos de hidrógeno en todas las formas de combinación presentes en el gas combustible con y el número de átomos de carbono en los hidrocarburos del gas de ajuste	Para gases exactamente intercambiables en este aspecto, $J_I = 0$, es una expresión general para las tendencias relativas de los dos gases para liberar monóxido de carbono.

NOTA: el subíndice a representa el gas de ajuste o referencia a la condición de ajuste original del artefacto.
Fuente: CORTÉS TORRES, Jaime Hernán, POLYGON ENERGY [9, 19].

También, aparece un parámetro adicional que es la máxima velocidad de deflagración de la mezcla de gas-aire la cual es determinada,

$$S = \frac{aF_a + bF_b + cF_c + \dots}{A' + 5 * Z' - 18,8 * Q' + 1} \quad (Ec. 17)$$

Siendo, a, b, c, ... fracciones volumétricas de diferentes combustibles que constituyen el gas; F_a , F_b , F_c , ... valores correspondientes del coeficiente F; A' : volumen de aire requerido para quemar un volumen de gas; Z' y Q' son fracciones volumétricas de los gases inertes (principalmente dióxido de carbono y nitrógeno, y la cantidad de oxígeno en el combustible).

Criterio de intercambiabilidad: dos o más gases son intercambiables si los índices de entrada de calor y desprendimiento de llama son iguales a uno; y los índices de retroceso de llama, puntas amarillas y combustión incompleta son iguales a cero.

El método de AGA y Weaver, brindan una descripción más completa de los fenómenos de combustión pero están limitados en cuanto al tipo de quemadores y mezclas que fueron probados experimentalmente para obtener los índices. Estos se adecuan de forma aceptable para quemadores tradicionales tipo Bunsen con premezcla de aire parcial, quedando por fuera los diseños de quemadores modernos. Con respecto al tipo de gas usado para llevar a cabo los experimentos, aún existía dependencia del gas manufacturado, con contenidos de hidrógeno importantes, por lo que algunas mezclas usadas no resultan muy representativas para las necesidades actuales.

3.4. MÉTODOS GRÁFICOS

Se han desarrollado varios métodos y parámetros para caracterizar la intercambiabilidad de diferentes gases naturales, pero actualmente continúa vigente y es de mayor aplicación en la actualidad, el diagrama de Dutton [19].

La ventaja de estos métodos gráficos es que indican el grado de intercambiabilidad refiriéndose a ubicación de un punto para el gas sustituto en relación a las líneas límite. Además, incluyen índices específicos similares a los métodos anteriormente nombrados [12].

A continuación se muestra **la tabla 9** con los métodos gráficos, y se explicarán los más importantes.

Tabla 9. Métodos gráficos de intercambiabilidad

MÉTODO	AÑO/PAÍS	TIPO DE GAS	TIPO DE QUEMADOR
DELBOURG	1953/Francia	Gases de la primera y segunda familia	Controlador Bruleur (quemador de prueba) para caracterizar equipos residenciales, aplicable a quemadores industriales.
GILBERT-PRIGGS	1956/Reino Unido	Gases de la primera familia en cuatro rangos de IW, 530-590 BTU/ft ³ , 591-640 BTU/ft ³ , 641-700 BTU/ft ³ , 701-760 BTU/ft ³	Equipos británicos (exceptuando quemadores industriales sensibles), quemadores residenciales, quemadores atmosféricos
GRUMMER, HARRIS AND ROWE	1956/Estados Unidos	Mezcla ² para representar gases manufacturados, gases de aceite, propano/aire y gases naturales	Quemadores de laboratorio
HOLMQVIST	1957/Suecia	Gases manufacturados, gases producidos y gases de agua	Quemadores atmosféricos

VAN KREVELEN AND CHERMIN	1958	Mezcla ³	Quemadores atmosféricos residenciales, industriales
HARRIS-LOVELACE	1968/Reino Unido	Gases naturales, GNL, gas natural sintético	Quemadores atmosféricos modernos, quemadores residenciales
VAN DER LINDEN	1970/Holanda	Gases naturales	Quemadores residenciales e industriales
HARRIS-WILSON	1974/Reino Unido	Gases naturales, GNL, gas natural sintético	Equipos modernos con quemadores atmosféricos
FRANCE	1976/Reino Unido	Mezcla multicomponente ⁴ representativos de gases naturales y gas natural sintético	Quemadores atmosféricos
DUTTON	1978/Reino Unido	Mezcla de metano, propano, hidrógeno e inertes Gases naturales	Quemadores residenciales e industriales

NOTA²: Incluye hidrógeno, monóxido de carbono, metano, etileno, nitrógeno

NOTA³ Incluye metano, etano, propano, etileno, propileno, hidrógeno, monóxido de carbono, nitrógeno y dióxido de carbono

NOTA⁴: Incluye metano, hidrógeno, propano, nitrógeno, dióxido de carbono

Fuente: POLYGON ENERGY [19].

3.4.1. Método de Delbourg. El propósito de este método gráfico, era definir el área aceptable de intercambiabilidad entre gases de una misma familia y determinar la intercambiabilidad de gases con la construcción de gráficos a partir de datos del índice de Wobbe modificado en uno de sus ejes y en el otro eje, el potencial de combustión, así se mostrará el rango dentro del cual todos los aparatos funcionan correctamente. Las coordenadas de un punto se conocen como principales números de intercambiabilidad.

Este método permite obtener límites de desprendimiento de llama, retroceso de llama y combustión incompleta. Fue desarrollado para gases de primera y segunda familia, para caracterizar equipos residenciales franceses y quemadores industriales. El potencial de combustión empírico es propuesto como una expresión de la velocidad de la llama y relaciona la densidad del gas combustible con la altura del cono azul de la llama.

Conociendo la composición del gas sustituto, se calcula los índices de intercambiabilidad y se ubica en la gráfica. Si el punto se encuentra dentro de la gráfica y si los índices son inferiores a valores límites, entonces se consideran gases intercambiables (el de ajuste y el sustituto). Sino sucede así, debe alterarse la composición del gas sustituto para volverlo intercambiable.

La ecuación del índice de Wobbe modificado es,

$$IW_M = K_1 * K_2 * \frac{gcv}{\sqrt{G_r}} \quad (Ec. 18)$$

Siendo, K_1 : función de la proporción de hidrocarburos en el poder calorífico superior (sin incluir al metano); K_2 : está dada por la expresión, $K_2 = 1000 * \frac{CO+4*O_2-0,5*CO_2}{gcv}$; gcv : poder calorífico superior a condición seca a 0°C y 1 atm.

Mientras que el potencial de combustión se define como,

$$C = u * \frac{H_2 + 0,7 * CO + 0,3 * CH_4 + v' * \sum a * C_nH_m}{\sqrt{G_r}} \quad (Ec. 19)$$

Siendo u : factor de corrección empírico para el potencial de combustión que representa cambio en velocidad de la llama y relacionado con variaciones en la concentración de oxígeno y contribución térmica de hidrocarburos pesados; H_2 , CO , CH_4 , C_nH_m : composición de cada componente en porcentaje (C_nH_m todos los hidrocarburos excepto CH_4); v' : coeficiente de corrección que depende del valor del índice de Wobbe modificado, a : coeficiente específico para cada hidrocarburo mostrado en la tabla coeficientes requeridos para cálculos de Delbourg.

Los índices secundarios son:

Índice de puntas amarillas,

$$I_j = \frac{\sum j * A}{\sqrt{G_r}} * \left(1 - 100 \frac{O_2}{gcv}\right) \quad (Ec. 20)$$

Siendo A : contenido de gas en porcentaje (CH_4 y C_nH_m); O_2 : contenido de oxígeno en el gas en porcentaje; j : coeficiente específico de cada hidrocarburo mostrado en la tabla coeficientes requeridos para cálculos de Delbourg.

Índice de hollín (solamente usado para gases de la primera familia),

$$I_i = \frac{1 + 0,01 * H_2 + 0,01 * CO}{\sqrt{G_r}} * \sum b * A * (1 - 0,013 * O_2) \quad (Ec. 21)$$

Siendo, b : coeficiente específico de cada hidrocarburo mostrado en la tabla coeficientes requeridos para cálculos de Delbourg.

A continuación se muestra los coeficientes a , b , j para el cálculo de potencial de combustión, puntas amarillas y formación de hollín **en la tabla 10** [12].

Tabla 10. Coeficientes requeridos para cálculos de Delbourg

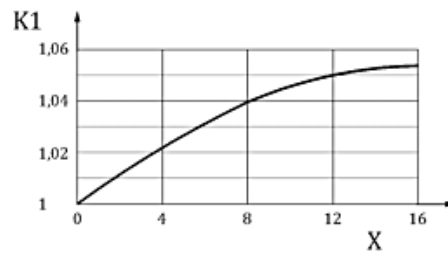
GAS	J	B	a
CH₄	1	1	1
C₂H₆	2,85	2	0,95

C_3H_8	2,8	3,6	0,95
C_4H_{10}	8	4,7	1,1
C_5H_{12}	6,8	6	1,15
C_6H_{14}	8,8	10	

Fuente: FLÓREZ ORREGO, Daniel [12].

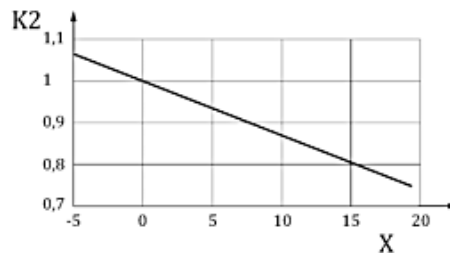
A continuación se presentan **las gráficas 10 y 11**, las cuales están relacionadas con coeficientes de corrección K1, K2 para el índice de Wobbe de gases de segunda familia.

Gráfica 10. Coeficiente de corrección K1 para el IW (gases segunda familia)



Fuente: POLYGON ENERGY [19].

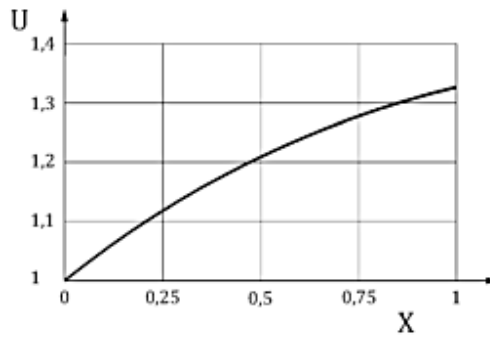
Gráfica 11. Coeficiente de corrección K2 para el IW (gases segunda familia)



Fuente: POLYGON ENERGY [19].

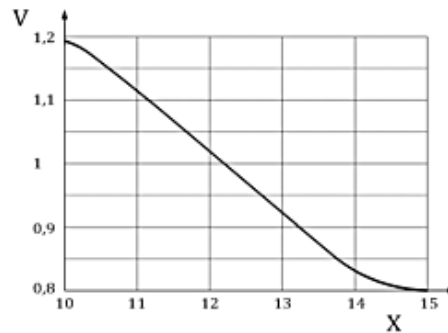
A continuación se presentan **las gráficas 12 y 13**, las cuales están relacionadas con coeficiente de corrección U y coeficiente medio de corrección para HC en gases de segunda familia.

Gráfica 12. Coeficiente de corrección U para el potencial de combustión (gases segunda familia)



Fuente: POLYGON ENERGY [19].

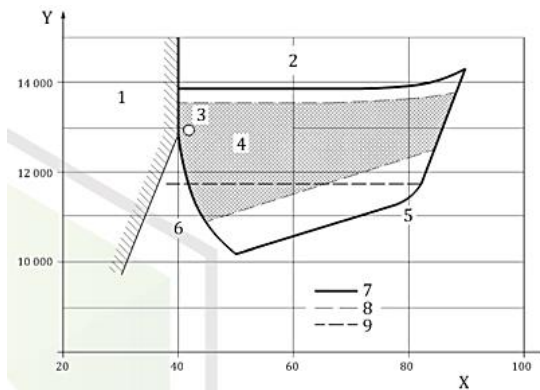
Gráfica 13. Coeficiente medio de corrección para hidrocarburos superiores al metano (gases segunda familia)



Fuente: POLYGON ENERGY [19].

En la gráfica 14, se muestra el diagrama de intercambiabilidad de gases propuesto por Delbourg.

Gráfica 14. Diagrama de intercambiabilidad de gases de Delbourg



Fuente: POLYGON ENERGY [19].

Siendo 1: límite para posibles mezclas de gas, 2: combustión incompleta ($CO/CO_2 > 0,02$), 3: gas natural de referencia, 4: funcionamiento correcto, 5: retroceso de llama, 6: desprendimiento de llama, 7: suministro de gas a mbar, 8: suministro de gas de 12 a 22 mbar, 9: límite para 10% de disminución de potencia frente al gas natural de referencia.

Criterio de intercambiabilidad: dos o más gases son intercambiables bajo el método gráfico de Delbourg.

3.4.2. **Diagrama de Gilbert-Priggs.** Método gráfico desarrollado inicialmente para los gases de la primera familia, luego fue adoptado y adaptado para realizar estudios de predicción sobre características de combustión de los gases de la segunda familia. El diagrama está basado en el índice de Wobbe en función del factor de velocidad de deflagración de Weaver y, proporciona los límites para desprendimiento de llama, retroceso y combustión incompleta. Los valores usados varían dependiendo de los gases usados, en aplicación o país.

Su criterio de intercambiabilidad es: dos o más gases son intercambiables, si ambos se encuentran dentro del área establecida por el diagrama de Gilbert-Priggs.

3.4.3. **Diagrama de Holmqvist.** Método gráfico desarrollado a partir de gases manufacturados, gas de agua y gas pobre. Sus límites se definen en un diagrama cuyos ejes son el índice de Wobbe y un número de caracterización relacionado con la altura del cono medido en la llama de un quemador atmosférico. Una desventaja es que los límites no definen el problema de intercambiabilidad particular que puede ser anticipado.

$$C_k = \frac{K_i * \sum(X_i * X_{ki})}{\sqrt{G_r}} \quad (Ec. 22)$$

Siendo C_k : Coeficiente de Holmqvist; X_i : concentración volumétrica del componente i ; X_{ki} : medición para el componente i en el quemador de prueba; K_i : factor de corrección según la concentración de gases inertes.

3.4.4. **Método de Dutton.** Los métodos anteriores usaban diagramas de dos dimensiones, en donde uno de ellos correspondía al índice de Wobbe (o alguna derivación de este), y el otro, a una función relacionada con la velocidad de quema. Estos métodos resultaban satisfactorios para gases manufacturados donde las variaciones en el desempeño de los equipos se atribuían a las variaciones en el contenido de hidrógeno y por ende a la velocidad de quema de una mezcla de gases. Por otra parte, los gases naturales tienen muy pequeñas variaciones en la velocidad de quema o en el factor de velocidad de llama de Weaver.

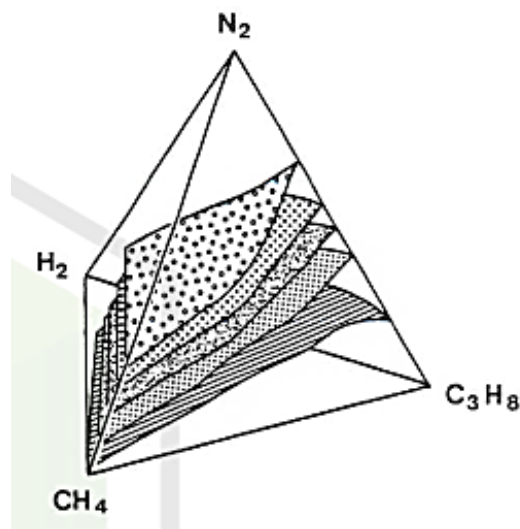
Este método, es aplicable específicamente para gas natural, como también para gases que contienen hidrógeno y sus respectivas mezclas. Es una gráfica bidimensional para el gas natural y tridimensional para las mezclas que contienen hidrógeno, como los gases manufacturados.

El diagrama de Dutton surgió de la idea de desarrollar un método sencillo de usar para todos los agentes vinculados a la cadena de gas en su país (Reino Unido), por lo que propuso el concepto de “mezclas equivalentes” en los cuales, los hidrocarburos se representan por medio de una mezcla de metano y propano que contiene el mismo número promedio de átomos de carbono por molécula y el mismo número total de átomos de hidrógeno y carbono con respecto al gas real; en lo que respecta a los inertes, propuso el contenido de nitrógeno para representar todos los compuestos inertes presentes en el gas (incluyendo el oxígeno), todos los inertes tienen un nivel de nitrógeno equivalente de forma que las cantidades de gas inerte cuando se mezclan con los otros componentes no inertes generan una mezcla con el mismo índice de Wobbe que la mezcla real.

Usando el concepto de mezclas equivalentes, cualquier mezcla de gas puede representarse como un punto en un tetraedro en el cual cada vértice corresponde a uno de los cuatro componentes de la mezcla equivalente (metano, propano, nitrógeno e hidrógeno). Así mismo, dentro del tetraedro se grafican conjuntos de superficies relacionadas con las propiedades y fenómenos de la combustión, además del desempeño de los artefactos, todo generado a partir de los datos experimentales.

En la gráfica 15, se detalla el tetraedro de Dutton para evaluación de intercambiabilidad de gases mediante mezclas equivalentes.

Gráfica 15. Tetraedro de Dutton para evaluación de intercambiabilidad mediante mezclas equivalentes

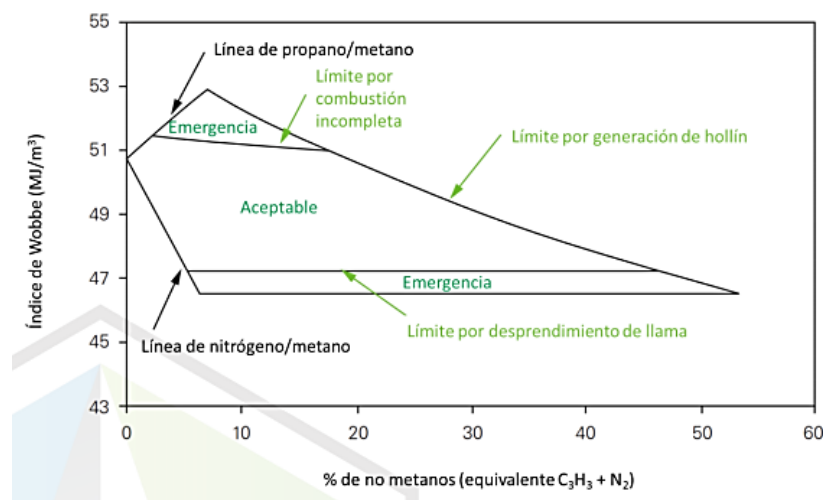


Fuente: POLYGON ENERGY [19].

El tetraedro intersectado por las diversas superficies va a corresponder entonces a un “volumen de intercambiabilidad”, no obstante, puesto que la enorme mayoría de los gases naturales no contiene hidrógeno, el diagrama se simplifica pasando a ser bidimensional. Para el desarrollo del diagrama bidimensional, se toma el índice de Wobbe como el eje vertical y se realizan las gráficas en función del porcentaje de propano y nitrógeno (un factor comúnmente conocido como la componente de no metanos o número propano-nitrógeno).

En la gráfica 16, se representa un diagrama de Dutton, sobre el cual se ha dibujado los límites empleados en Reino Unido. Las líneas límites de la izquierda corresponden a las líneas propano-metano y nitrógeno-metano, no hay gases naturales que caigan a la izquierda de dichas líneas. Así mismo, es claro que las mezclas de gas natural no pueden cubrir niveles de propano-nitrógeno de hasta 100% pues equivaldrían a un GLP o a una mezcla por fuera de los límites normales de inflamabilidad. Sobre la gráfica se incluyen los límites de combustión incompleta (frontera superior), generación de hollín (frontera derecha) y desprendimiento de llama (frontera inferior).

Gráfica 16. Diagrama de Dutton con límites usados en el Reino Unido



Fuente: POLYGON ENERGY [19].

3.5. OTROS MÉTODOS

En la tabla 11, se muestra los otros métodos de intercambiabilidad de gases.

Tabla 11. Otros métodos de intercambiabilidad

MÉTODO	AÑO/PAIS	TIPO DE GAS	TIPO DE QUEMADOR
SOMMERS-RUHRGAS (SRG)	1973/Alemania	Gases naturales (con alto contenido de inertes o con alto contenido de metano)	Equipos alemanes, calentadores, estufas de gas y quemadores de aire forzado

Fuente: POLYGON ENERGY [19].

3.5.1. **Método Sommers-Ruhrgas.** Dos gases son intercambiables si se permiten cambios limitados en la potencia de entrada sin ajustes en el quemador a presión de suministro constante. Su desventaja es que su aplicación es solamente para gases de segunda familia y no contempla criterios de estabilidad de llamas.

Sommers demostró que cambiar gas natural L por gas natural H a presión constante, no involucra cambios apreciables en el gasodoméstico. Sin embargo, la potencia se reduce en un 16%, correspondiente a la relación existente entre los índices de Wobbe.

En la tabla 12, se comparan los dos gases que se consideran intercambiables de acuerdo con el método SRG.

Tabla 12. Gases naturales considerados intercambiables por el método SRG

COMPUESTO/CARACTERÍSTICA	GAS NATURAL H	GAS NATURAL L
Metano	92,6%	81,1%
Etano	3,4%	3,2%
Propano	0,7%	0,4%
Butano	0,3%	0,2%
Hidrocarburos pesados	0,2%	0,1%
Nitrógeno	1,8%	14%
Dióxido de carbono	1%	1%
Poder calorífico, BTU/ft ³	1,034	898
Densidad relativa	0,604	0,647
Índice de Wobbe	1,329	1,118
Aire requerido ft ³ aire/ ft ³ gas	9,8	8,52
Velocidad de quema ft/s	1,41	1,55

Fuente: POLYGON ENERGY [19].

Además, confirmó que la estabilidad de la llama es de alguna forma mejor con gases naturales L debido a que la velocidad de salida de la mezcla gas-aire en quemadores atmosféricos permanece constante, mientras que la velocidad de combustión del gas es menor.

El cambio en la entrada de calor por el cambio entre un gas H a L se define como,

$$\frac{W_L}{W_H} = \frac{1,118}{1,329} = 0,84 \quad (Ec. 23)$$

Siendo, W_L el índice de Wobbe para gases naturales de grupo L y W_H el índice de Wobbe para gases naturales de grupo H.

3.6. SELECCIÓN DEL MÉTODO APROPIADO PARA EVALUACIÓN DE INTERCAMBIABILIDAD DE GASES EN COLOMBIA

Se realiza un análisis para la selección del método más completo, fácil y apropiado para usar en la evaluación de intercambiabilidad de gases en Colombia. Primero,

se realiza un análisis de ventajas y desventajas de cada uno de los índices considerados de mayor impacto histórico entre cada uno de los métodos (simples, múltiples, gráficas y otros), seleccionando los más factibles. Luego de ello, se realiza una matriz con el fin de seleccionar el método(s) más apropiado, mediante criterios considerados de mayor importancia para aplicabilidad, definidos por la autora.

3.6.1. Selección de métodos de índice simple

➤ Índice de Wobbe superior

A continuación se presenta **en la tabla 13**, las ventajas y desventajas del índice de Wobbe superior.

Tabla 13. Ventajas-desventajas índice de Wobbe superior

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<p>Ampliamente aceptado en el ámbito internacional, por lo que aún continúa vigente</p> <p>De mayor aplicabilidad ya que considera gases naturales y gases manufacturados</p> <p>Clasifica los gases por distintos grupos de familias con el fin de que exista intercambiabilidad</p> <p>Su ecuación maneja dos variables, densidad relativa y poder calorífico superior, por lo que es sencillo y fácil de usar</p> <p>Su criterio de intercambiabilidad es que el índice de Wobbe, debe ser igual para el gas de ajuste como para el gas de reemplazo</p>	<p>El índice no es suficiente para predecir comportamientos de fenómenos de combustión y rendimiento del quemador</p> <p>Falta la inclusión de variables como estabilidad de llama, calidad de combustión, rendimiento de la combustión, factor de aireación, entre otras</p>

➤ Índice de Willien

A continuación se presenta **en la tabla 14**, las ventajas y desventajas del índice de Willien.

Tabla 14. Ventajas-desventajas índice de Willien

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<p>Su ecuación maneja dos variables, densidad relativa y poder calorífico, por lo que es sencillo y fácil de usar</p>	<p>Su uso solo considera gases manufacturados con poderes caloríficos de hasta 500 BTU/ft³ (muy bajos)</p>

	<p>El índice no es suficiente para predecir comportamientos de fenómenos de combustión y rendimiento del quemador</p> <p>Su criterio de intercambiabilidad es que la constante de intercambiabilidad de Willien debe encontrarse entre el rango de 160 – 190</p>
--	--

➔ Índice de Knoy

A continuación se presenta **en la tabla 15**, las ventajas y desventajas del índice de Knoy.

Tabla 15. Ventajas-desventajas índice de Knoy

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<p>Es una versión simplificada en base al Índice de Willien</p> <p>Su ecuación maneja dos variables, densidad relativa y poder calorífico, por lo que es sencillo y fácil de usar</p> <p>Su criterio de intercambiabilidad de gases es que la constante de intercambiabilidad de Knoy debe ser igual para el gas de ajuste como para el gas de reemplazo</p> <p>Tiene la carta de intercambiabilidad de Knoy</p>	<p>El índice no es suficiente para predecir comportamientos de fenómenos de combustión y rendimiento del quemador</p> <p>Su uso solo considera intercambio con mezclas GLP/aire</p> <p>Puede presentar resultados erróneos ante variaciones de las composiciones de los gases</p>

➔ Índice de Schuster

A continuación se presenta **en la tabla 16**, las ventajas y desventajas del índice de Schuster.

Tabla 16. Ventajas-desventajas índice de Schuster

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<p>Primer intento para medir los efectos de la combustión al variar las composiciones de los gases</p> <p>Su ecuación maneja tres variables, índice de Wobbe (densidad relativa y poder calorífico) y velocidad de deflagración</p>	<p>Al tener poca disponibilidad de datos referentes a las velocidades de llama en el momento de su desarrollo, no se utiliza con gran precisión</p> <p>Su uso solo considera gases manufacturados</p>

Su criterio de intercambiabilidad de gases es que la constante de intercambiabilidad de Schuster debe ser igual para el gas de ajuste como para el gas de reemplazo	
---	--

ANÁLISIS: Se estudiaron los cuatro índices simples con el fin de seleccionar el mejor de ellos, todos cuentan con ventajas y desventajas, pero al evaluarlos se encontró que:

- ✓ El único aceptado en el ámbito internacional y que continúa vigente, es el índice de Wobbe
- ✓ El de mayor aplicabilidad es el índice de Wobbe, ya que índices como el de Schuster, presenta poca fiabilidad al no encontrarse gran disponibilidad de referentes en su momento de desarrollo
- ✓ Se considera para este estudio gases naturales, y el único con aplicabilidad a ellos, es el índice de Wobbe
- ✓ Maneja variables fáciles de identificar en un gas, como densidad relativa y poder calorífico

Y, aunque la mayoría de ellos no predice comportamientos de fenómenos de combustión y rendimiento de quemador, por las razones anteriores se selecciona como el mejor método simple, el índice de Wobbe.

3.6.2. Selección de métodos de índices múltiples

- Índice de AGA

A continuación se presenta **en la tabla 17**, las ventajas y desventajas del índice de AGA.

Tabla 17. Ventajas-desventajas índice de la AGA

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<p>De mayor aplicabilidad en uso industrial ya que considera gases naturales y aún continua vigente</p> <p>El índice considera fenómenos de combustión</p> <p>Maneja cuatro fórmulas para predecir el índice de cambio en el desempeño del equipo, índice de desprendimiento de llama, índice de retroceso de llama, índice de puntas amarillas</p>	<p>No se adecúa aceptablemente a diseños de quemadores modernos, ya que en la época de la formulación del índice se encontraban limitados en cuanto a tipos de quemadores</p>

➤ Índice de Weaver

A continuación se presenta **en la tabla 18**, las ventajas y desventajas del índice de Weaver.

Tabla 18. Ventajas-desventajas índice de Weaver

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<p>De mayor aplicabilidad en uso industrial ya que considera gases naturales y aún continua vigente</p> <p>El índice considera fenómenos de combustión</p> <p>Maneja seis fórmulas para cubrir ampliamente las características de combustión de una llama, sus índices son: entrada de calor, desprendimiento de llama, retroceso de llama, puntas amarillas, aireación primaria, combustión incompleta (las últimas dos no las incluye el índice de AGA)</p>	<p>No se adecua aceptablemente a diseños de quemadores modernos, ya que en la época de la formulación del índice se encontraban limitados en cuanto a tipos de quemadores</p>

ANÁLISIS: Se estudiaron los dos índices múltiples con el fin de seleccionar el mejor de ellos, ambos cuentan con ventajas y desventajas, pero al evaluarlos se encontró que:

- ✓ Ambas son aplicadas actualmente y se encuentran vigentes, ya que consideran gases naturales y fenómenos de combustión
- ✓ El índice de AGA maneja cuatro índices para predecir comportamientos de combustión, pero el índice de Weaver maneja dos índices más (aparte de los índices de AGA) por lo que lo hace un índice mucho más completo para la predicción de comportamientos de fenómenos de combustión además de la composición de los gases

Y, aunque ambos presentan desventajas como que sus estudios y pruebas se realizaron con diseños de quemadores de la época, cabe resaltar que sus índices manejan variables de gran relevancia para determinación de fenómenos de combustión y por eso se selecciona como el mejor método múltiple, el índice de Weaver.

3.6.3. Selección de métodos gráficos

➤ Método de Delbourg

A continuación se presenta **en la tabla 19**, las ventajas y desventajas del método de Delbourg.

Tabla 19. Ventajas-desventajas método de Delbourg

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<p>Considera gases de la primera y segunda familia</p> <p>Define el área aceptable entre gases de una misma familia</p> <p>Obtiene a partir de sus fórmulas y gráficos, variables como índice de Wobbe modificado, retroceso de llama, desprendimiento de llama y combustión incompleta</p> <p>El índice considera fenómenos de combustión</p> <p>Predice sus gráficos a partir del empleo de cuatro fórmulas, índice de Wobbe modificado, potencial de combustión, índice de puntas amarillas, índice de hollín (el último solo aplica para gases de la primera familia)</p>	<p>Su gráfico solo es bidimensional</p>

➤ Método de Gilbert-Priggs

A continuación se presenta **en la tabla 20**, las ventajas y desventajas del diagrama de Gilbert-Priggs.

Tabla 20. Ventajas-desventajas diagrama de Gilbert-Priggs

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<p>Su uso solo considera gases de la primera y segunda familia</p> <p>El índice considera fenómenos de combustión</p> <p>Se encuentra basado en el índice de Wobbe y velocidad de deflagración de Weaver</p> <p>Los límites de sus gráficos son, límites en desprendimiento de llama, retroceso de llama y combustión incompleta</p>	<p>Su gráfico se distribuye por rangos y solo es bidimensional</p>

➤ Método de Holmqvist

A continuación se presenta **en la tabla 21**, las ventajas y desventajas del diagrama de Holmqvist.

Tabla 21. Ventajas-desventajas diagrama de Holmqvist

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<p>Uno de sus ejes es el índice de Wobbe y el otro se encuentra relacionado con la altura del cono medido en la llama del quemador atmosférico</p>	<p>Su uso solo considera gases manufacturados, gases de agua y gases pobres</p> <p>No posee límites que definan problemas de intercambiabilidad que puedan ser anticipados</p> <p>Su gráfico solo es bidimensional</p>

➤ Método de Dutton

A continuación se presenta **en la tabla 22**, las ventajas y desventajas del método de Dutton.

Tabla 22. Ventajas-desventajas método de Dutton

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<p>De mayor aplicabilidad y aún continua vigente ya que considera gases naturales (específicamente) además de mezclas de metano, propano, hidrógeno e inertes</p> <p>Su gráfico puede ser bidimensional (gases naturales) o tridimensional (mezclas con hidrógeno como gases manufacturados)</p> <p>Las superficies del gráfico están relacionadas con propiedades y fenómenos de combustión y desempeño de artefactos</p>	

Se estudiaron los cuatro métodos gráficos con el fin de seleccionar el mejor de ellos, todos cuentan con varias ventajas, pero al evaluarlos se encontró que:

- ✓ Solo tres de ellos son aplicables para gases naturales (método Delbourg, método Gilbert-Priggs, método Dutton)
- ✓ Solo tres de ellos consideran fenómenos de combustión, algunos son retroceso de llama, desprendimiento de llama, combustión incompleta, generación de hollín

- ✓ El método de Dutton además de ser un gráfico bidimensional (como los otros tres métodos), también puede ser tridimensional

Y, aunque todos indican un grado de intercambiabilidad mediante gráficos e incluyen índices similares a los de índice simple e índices múltiples, el método de Dutton es el más completo de los métodos gráficos, ya que aplica para gases naturales específicamente además de mezclas de metano, propano, hidrógeno e inertes. Es un método que considera fenómenos de combustión, puede ser un gráfico bidimensional o tridimensional. Además, indica problemas potenciales de intercambiabilidad y determina el ajuste requerido para asegurar la intercambiabilidad de gases y es el único método gráfico que continúa vigente.

3.6.4. Selección de otros métodos

- Método Sommers-Ruhrgas

A continuación se presenta **en la tabla 23**, las ventajas y desventajas del método SRG.

Tabla 23. Ventajas-desventajas método de Sommers-Ruhrgas

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Considera gases de la segunda familia	<p>El índice no considera fenómenos de combustión</p> <p>El índice no contempla criterios de estabilidad de llama</p>

Se estudió el método, pero al evaluarlo se encontró que:

- ✓ Solo considera gases de la segunda familia

Y, al no considerar fenómenos de combustión, ni contemplar criterios de estabilidad de llama, no llega a ser un índice a valorar ya que también no se encuentra vigente actualmente, debido a sus limitadas características.

3.7. MATRIZ DE CRITERIOS (CUALITATIVOS) PARA SELECCIÓN DE MÉTODO(S)

En la matriz de **la tabla 24**, se consideran varios criterios tomando en cuenta:

- ✓ Características físicas y medibles del gas natural
- ✓ Fenómenos de combustión y rendimiento del quemador
- ✓ Tipo de gas y tipo de quemador que se maneja en la intercambiabilidad de gases

- ✓ Fácil empleo para cálculos en las industrias y seguridad operacional en transporte del gas y empleo en máquinas que trabajen con gas como combustible

Tabla 24. Matriz cualitativa para evaluación de intercambiabilidad de gases naturales en Colombia

ÍNDICE	Características físicas y medibles de gas natural	Fenómenos de combustión	Tipo de gas o tipo de quemador fiable	Fácil empleo para industrias
WOBBE SUPERIOR	Sí	No	Sí	Sí
	Considera poder calorífico superior y densidad relativa	No considera ningún fenómeno de combustión	Para gases naturales	Fácil, sencillo y robusto de calcular
WEAVER	Sí	Sí	No	No
	Considera poder calorífico y densidad relativa	Considera combustión incompleta, retroceso de llama, puntas amarillas, desprendimiento de llama, aireación	Limitación en quemadores de diseños modernos, y tipo de gas con dependencia a gas manufacturado	Compleja al tener 6 criterios por evaluar
DUTTON	Sí	Sí	Sí	Sí
	Considera poder calorífico y densidad relativa	Considera retroceso de llama, desprendimiento de llama, generación de hollín, combustión incompleta	Específicamente usado para gas natural	Compleja al evaluar con formulación, pero fácil de entender en gráfico bidimensional

Con la matriz de criterios, se puede decir que aunque el índice de Wobbe no predice comportamientos de fenómenos de combustión, es un índice fácil, sencillo y robusto para calcular, además de ser la base de los demás índices de intercambiabilidad. Mientras que el índice de Weaver, aunque cuenta con su ventaja de tener varios índices para un análisis completo asociado a fenómenos de combustión, se llega a volver complejo al evaluar todos los criterios. Además, su limitación en quemadores de diseños modernos y gas con dependencia a manufacturado, reduce la implementación de su índice. Finalmente, aunque el método de Dutton predice comportamiento de fenómenos de combustión, tiene la ventaja de comportarse como un gráfico bidimensional y tridimensional. Además de indicar el grado de intercambiabilidad y problemas potenciales con los que puede ajustarse el gas para asegurar la intercambiabilidad.

Análisis final: Aunque los tres índices son aceptados en el ámbito internacional, continúan vigentes, y son de gran aplicabilidad, se consideran variables como características físicas y medibles del gas natural y fenómenos de combustión con gases naturales y quemadores modernos. Por lo que, la implementación del índice de Wobbe y método gráfico de Dutton, permite esclarecer un panorama global de la intercambiabilidad entre gas de ajuste y gas de reemplazo.

4. IMPORTANCIA DE LA INTERCAMBIABILIDAD DE GASES EN EL CONTEXTO COLOMBIANO

Actualmente, el concepto de intercambiabilidad de gases es un tema conocido pero menos importante por los principales entes del país que manejan operación, regulación y vigilancia del gas natural como lo son el Consejo Nacional de Operación de Gas Natural, Comisión de Regulación de Energía y Gas, y el Ministerio de Minas y Energía.

En los últimos años se ha tenido un acercamiento al tema, debido a que los índices de intercambiabilidad de gases son parámetros determinantes en la calidad del gas natural y en fenómenos de combustión, además de que por otro lado, se prevé la inclusión en mercados de gas natural licuado.

Si el concepto no se toma en cuenta por los entes, es posible que ante factores como: mercados de GNL, fenómenos de combustión, e incorrecto ajuste de gases para su intercambio, se lleguen a presentar problemas de calidad que vayan desde los hogares hasta grandes industrias. Ya que en nuestro país, solo se contempla el poder calorífico como parámetro exclusivo en sustitución de combustibles gaseosos en equipos de combustión pero este, no reconoce aspectos de calidad ni técnicos para una evaluación rigurosa [18].

Finalmente, los avances que han tenido otros países en el tema nos servirán para visualizar el panorama actual y brindar soluciones prácticas para nuestro país, obteniendo uno (o varios) índices apropiados para su implementación [21].

4.1. ESTÁNDARES INTERNACIONALES

Los estándares de calidad del gas natural tienen como propósito definir rangos para el índice de Wobbe y composición de los gases para obtener una utilización segura del gas natural con estándares de alto desempeño y eficiencia en el transporte del gas a través del gasoducto. Además de proteger la red, también se requiere para garantizar un gas seguro para utilización en usuarios domésticos [4].

Algunas de las entidades encargadas de coordinar e integrar actividades relacionadas con temas de calidad de gas son: Consejo de reguladores europeos de energía (CEER), Agencia de cooperación de los reguladores de la energía (ACER), Instituto nacional americano de estándares (ANSI), Dirección general de energía y transporte (DG TREN), Organización internacional de normalización (ISO), Comité europeo de normalización (CEN), Unión internacional de gas (IGU), Asociación europea para la racionalización del gas de intercambio de energía (EASEE gas), Sociedad americana de gases (AGA) [4, 12, 20].

Debido al aumento de comercio de gas a nivel mundial, las normas de calidad son esenciales para razones comerciales, operacionales, para asegurar coherencia en regímenes de facturación, seguridad operativa, integridad de la red, y, demostrar que el poder calorífico es un parámetro importante en cuestión comercial y contabilidad energética, pero no forma parte en cuestión de calidad [1, 4].

A continuación se muestran los diferentes estándares internacionales que han mencionado el tema de intercambiabilidad de gases:

- AGA Catálogo N°. XH0203 (1946), uno de los principales estudios que dio origen a los índices de intercambiabilidad AGA, índice de desprendimiento de llama, índice de retrollama, índice de puntas amarillas
- ISO 6976 (1995), cálculo de los poderes caloríficos, densidad relativa e índice de Wobbe de la composición
- Asociación de Procesadores de Gas GPA 2172 (1996), cálculo del poder calorífico bruto, densidad relativa y factor de compresibilidad para mezclas de gas natural para análisis de composición
- ISO 13443 (1996), condiciones de referencia estándar para temperatura, presión y humedad a ser usadas para mediciones y cálculos realizados sobre gases naturales y fluidos similares
- AGA Report 4 A, Catálogo N° XQ0103 (2001). Cláusulas de la medida y la calidad del contrato del gas natural, donde se destaca los parámetros de calidad de gas y las mediciones que deben ser consideradas durante las negociaciones de tarifas y/o contratos
- ISO 6143 (2001), análisis de gases, métodos de comparación para determinar y verificar la composición de mezclas de gases de calibración
- AGA Intercambiabilidad Catálogo N° XH0202 (2002), presenta resultados a escala de laboratorio en el que se explica en detalle las condiciones necesarias para que el combustible gaseoso pueda satisfactoriamente ser sustituido por otro, a partir del uso de un diagrama de correlaciones y el desarrollo de un programa computacional en Fortran.
- ISO 10723 (2002), define métodos que deben utilizarse para evaluar rendimiento de un cromatógrafo de gases
- ISO 16664 (2004), análisis de gases, manipulación de gases de calibración y mezclas de gases
- EN ISO 13686 (2005), designación de calidad del gas natural
- ISO 6975 (2005), análisis ampliado de gas natural con método cromatográfico
- ISO FDIS 20765-1 (2005), cálculo de propiedades termodinámicas en fase gaseosa para aplicaciones de transmisión y distribución
- White Paper on Natural Gas Interchangeability and Non Combustion End Use. NGC+ Interchangeability Work Group (2005), definición de los rangos aceptables de las características del gas natural que puede ser consumido por los usuarios finales, manteniendo un desempeño seguro, confiable y contribuyente al medio ambiente
- Policy Statement on Provisions Governing Natural Gas Quality and Interchangeability in Interstate Natural Gas Pipeline Company Tariff FERC Docket N° PL04-3-00 (2006), aborda aspectos de calidad del gas natural, problemas de intercambiabilidad e impacto de los problemas en las empresas de gas natural sujetas a la jurisdicción de la FERC, así como en los productores de gas natural, transportadores y usuarios finales

- AGA Report 5, Catálogo N° WQ0901 (2009), medición de energía de gas natural basada en la energía del gas natural además, refiere los métodos, supuestos y criterios relevantes para la determinación del poder calorífico y la energía
- Directiva 73 CE del Parlamento Europeo y del Consejo (2009), normas comunes para el mercado interior del gas natural
- Directiva 142 CE de la Comisión (2009), relativa a los aparatos que utilizan combustibles gaseosos que establecen las prescripciones en materia de seguridad y rendimiento de los aparatos comunes de consumo y comerciales que utilizan combustibles gaseosos
- Reglamento CE N° 713 del Parlamento Europeo y del Consejo (2009), se crea la Agencia de Cooperación de Reguladores de la Energía
- Reglamento CE N° 715 del Parlamento Europeo y del Consejo (2009), condiciones de acceso a las redes de transporte de gas natural
- Decisión 685 UE de la Comisión (2010), condiciones de acceso a las redes de transporte de gas natural
- IGU – BP, *Guidebook to Gas Interchangeability and Gas Quality* (2011), aspectos críticos de calidad de gas y problemas de intercambiabilidad, parámetros de intercambiabilidad de mayor relevancia en la industria, metodologías para realizar gestión de la intercambiabilidad de gas con una especial orientación al caso del GNL
- ISO 13686 (2013), designación de la calidad del gas natural, parámetros requeridos para describir el gas natural y sus mezclas, incluida la intercambiabilidad de gas
- ISO TR 22302 (2014), métodos para el cálculo de número de metano de gas natural seco cuando se conoce la composición de dicho gas
- GPA 2145 (2016), recopilación de propiedades físicas para hidrocarburos, otros compuestos encontrados en las industrias del gas natural y de los líquidos del gas natural

4.2. PANORAMA NORMATIVO EN COLOMBIA

Actualmente existen varias resoluciones y normas técnicas con relación a la intercambiabilidad y específicamente mencionando el índice de Wobbe, pero aún con varias resoluciones y estándares que se mencionarán a continuación, no han sido de gran razón para que el concepto de intercambiabilidad de gases sea aplicado en Colombia por los principales entes de operación, regulación y vigilancia de la cadena del gas natural (CNO gas, CREG y MinMinas), así como otros organismos (ICONTEC, MINCIT, MinDesarrollo).

A continuación se presentarán las principales resoluciones y leyes emitidas por entes vinculados a la cadena del gas natural y que mencionan el tema de intercambiabilidad de gases.

4.2.1. Resoluciones emitidas por entes vinculados a operación, regulación y vigilancia de la cadena del gas natural

LEY 142:1994 (SSPD)

En el artículo 14, menciona que la actividad de transporte de gas natural es complementaria del servicio público domiciliario de gas natural. El cual se define como el conjunto de actividades ordenadas a la distribución de gas combustible, por tubería u otro medio, desde un sitio de acopio de grandes volúmenes o desde un gasoducto central hasta la instalación de un consumidor final, incluyendo su conexión y medición. También aplicará a las actividades complementarias de comercialización desde la producción y transporte de gas por un gasoducto principal, o por otros medios, desde el sitio de generación hasta aquel donde se conecte una red secundaria.

En el artículo 73, dice que es función de las comisiones fijar normas de calidad a las que deben ceñirse las empresas de servicios públicos, y determinar para cada bien o servicio público unidades de medida y de tiempo que deben utilizarse al definir el consumo.

En el Artículo 74, dice que es función de la CREG regular el ejercicio de las actividades de los sectores de energía y gas combustible para asegurar la disponibilidad de una oferta energética eficiente, propiciar la competencia en el sector de minas y energía, proponer la adopción de las medidas necesarias para impedir abusos de posición dominante y buscar la liberación gradual de los mercados hacia la libre competencia.

Se encuentra disponible en: www.superservicios.gov.co

CREG 067:1995

El código de distribución de gas combustible, aplica a pequeños y grandes consumidores, distribuidores y comercializadores de gas combustible por redes. Definiendo gas combustible como aquel de la primera, segunda y tercera familia. Las características de los gases serán aquellas que los identifiquen para su utilización como combustibles y, entre otras, las de composición química, poder calorífico superior e inferior, índice de Wobbe y de combustión, densidad, olor, toxicidad, corrosión y humedad.

Se encuentra disponible en: apolo.creg.gov.co

LEY 401:1997 (MinMinas)

En el artículo 3, dice que es función de la CREG establecer las reglas y condiciones operativas que debe cumplir toda la infraestructura del Sistema Nacional de Transporte a través del Reglamento Único de Transporte de Gas Natural.

Se creó el CNO Gas como un cuerpo asesor, y se establecen funciones relacionadas con el seguimiento al RUT como, revisar la experiencia en la aplicación de los aspectos operativos, y comerciales del RUT, enviar a la comisión informes sobre resultados de las revisiones, las propuestas de reforma, y cualquier observación o sugerencia presentada por escrito por cualquiera de los agentes, y que no haya sido incluida en las propuestas de reforma.

Se encuentra disponible en: www.minminas.gov.co

CREG 071:1999

Establece el Reglamento Único de Transporte de Gas Natural. Los objetivos con relación al Sistema Nacional de Transporte son, asegurar acceso abierto y sin discriminación, crear las condiciones e instrumentos para la operación eficiente, económica y confiable, facilitar el desarrollo de mercados de suministro y transporte de gas, estandarizar prácticas y terminología para la industria de gas, fijar normas y especificaciones de calidad del gas transportado.

Se encuentra disponible en: apolo.creg.gov.co

CREG 011:2003

Incorpora definiciones de gas combustible, siendo, cualquier gas que pertenezca a una de las tres familias de gases combustibles (gases manufacturados, gas natural y gas licuado de petróleo) y, cuyas características permitan su empleo en artefactos a gas.

Se encuentra disponible en: apolo.creg.gov.co

CREG 100:2003

Incluye parámetros a evaluar como la calidad de la llama por IRST (índice de respuesta a servicio técnico), donde se clasificarán las solicitudes acordes con eventos como, escape de gas, incendio, calidad de la llama e interrupción del servicio. La calidad de la llama se define como cualquier manifestación física que puede observar el usuario tal como desprendimiento, retroceso y coloración.

Se encuentra disponible en: apolo.creg.gov.co

CREG 017:2007

Realiza planteamiento entre especificaciones mínimas de calidad del gas inyectado y la intercambiabilidad al Sistema Nacional de Transporte, con el fin de proteger la integridad del sistema y las instalaciones de los agentes; controlar la formación de líquidos hidrocarburos y permitir el intercambio de gases de forma que no se afecte la combustión en quemadores diseñados para la segunda familia de combustibles gaseosos.

Se encuentra disponible en: apolo.creg.gov.co

CREG 062:2008

Se ha considerado necesario regular el tema en razón a la diversidad de características que puede tener el gas que se consume en el país, los generadores termoeléctricos han manifestado inquietudes con respecto al efecto que pueda tener la mezcla de gases de Cusiana y Guajira en sus plantas; se ha observado y se prevé un incremento en las fuentes de gas a ser inyectado al Sistema Nacional de Transporte; se han planteado iniciativas tendientes a utilizar gas natural proveniente de rellenos sanitarios, gas metano procedente de yacimientos de carbón y aire propanado; se proyectan importaciones de gas natural a partir del año 2012.

El CNO eléctrico manifestó a la CREG su preocupación por los efectos que pudiera tener la mezcla de gases en las plantas de generación a base de gas; la CREG solicitó al CNO eléctrico mayor ilustración sobre el impacto de la mezcla de gases en las plantas termoeléctricas; el CNO gas manifestó que tanto el gas de Cusiana como el gas de los campos de la Guajira están dentro de los rangos de índice de Wobbe estipulados a nivel mundial.

Por otro lado, el CNO eléctrico manifestó que de acuerdo con las especificaciones mínimas del gas natural para las unidades de generación instaladas en el SIN, la variación del índice de Wobbe modificado para algunas plantas no debe superar el 2% y en otras el 5%. Así, el CNO eléctrico propone adoptar regulatoriamente el índice de Wobbe con una variación de $\pm 2\%$. Los expertos indican que el índice de Wobbe no es suficiente para caracterizar la intercambiabilidad del gas natural en turbinas modernas y, que es necesario establecer otras medidas que están en estudio.

Por otro lado, menciona los diferentes métodos para la evaluación y manejo del intercambio de gases y fenómenos que puedan presentarse cuando la composición del gas se encuentre fuera de los límites aceptables. Menciona la determinación de la gravedad específica del gas y el poder calorífico.

Se encuentra disponible en: apolo.creg.gov.co

CREG 084:2008

Se realizaron propuestas para la adopción del índice de Wobbe como parámetro para verificar la intercambiabilidad de gases, también para adoptar el rango del índice de Wobbe de $47,7 \text{ MJ/m}^3$ a $52,7 \text{ MJ/m}^3$, para el gas natural inyectado al Sistema Nacional de Transporte y comercializado en Colombia (grupo H de la segunda familia), en el poder calorífico superior a condiciones estándar; y por último, asignar al productor-comercializador la responsabilidad de inyectar el gas al Sistema Nacional de Transporte dentro del rango índice de Wobbe establecido. Pretendiendo adoptar un proyecto de resolución que complemente las

especificaciones de calidad para la intercambiabilidad de gases en el Sistema Nacional de Transporte de gas.

Define que el intercambio de gases, es la capacidad de sustituir un combustible gaseoso por otro, en una aplicación de combustión, sin cambiar la seguridad operativa, la eficiencia y desempeño en términos del incremento de emisiones contaminantes, y es de gran importancia cuando se presenta mezcla de gases en un sistema.

Se entiende como, “Número de Wobbe: relación entre el poder calorífico (inferior o superior) de un gas por unidad de volumen y la raíz cuadrada de su densidad relativa con respecto al aire, bajo las mismas condiciones de referencia”.

Se entiende como, “Calidad del gas: el natural entregado al transportador por el agente, en el punto de entrada del sistema de transporte y por el transportador en el punto de salida, deberá cumplir con las especificaciones de calidad indicadas en el RUT”.

Se encuentra disponible en: apolo.creg.gov.co

CREG 007:2009

Hacen alusión a la intercambiabilidad de gases en “negociaciones bilaterales”, en donde los comercializadores que atiendan usuarios regulados deberán asegurar continuidad en la prestación del servicio a través de contratos vigentes de suministro y transporte de gas combustible y/o con mecanismos complementarios que lo soporten; en caso de que los mecanismos se agoten, el distribuidor-comercializador podrá complementar los contratos suscritos con infraestructura, contratos de almacenamiento, contratos de respaldo o con el uso de combustibles técnicamente intercambiables con el gas combustible contemplado en su Contrato de Condiciones Uniformes, procurando el uso de gases intercambiables que no afecten el normal desempeño de los artefactos.

Se encuentra disponible en: apolo.creg.gov.co

CREG 135:2012

La regulación vigente expedida por la CREG para el servicio público domiciliario de gas combustible aplica para el gas natural (segunda familia) y el gas licuado del petróleo (tercera familia).

Servicio público domiciliario de gas combustible con biogás, es el conjunto de actividades ordenadas a la distribución de Biogás, por tubería u otro medio, desde un sitio de acopio de grandes volúmenes o desde un gasoducto central hasta la instalación de un consumidor final, incluyendo su conexión y medición. Abarca las actividades complementarias de comercialización desde la producción y transporte de biogás por un gasoducto principal, o por otros medios, desde el sitio de generación hasta aquel en donde se conecte a una red secundaria.

Se encuentra disponible en: apolo.creg.gov.co

RSLN 90902:2013 (MinMinas)

Establece reglamento técnico de instalaciones internas de gas combustible, donde establece los requisitos que se deben cumplir en las etapas de diseño, construcción y mantenimiento de las instalaciones para suministro de gas combustible destinadas a uso residencial, comercial e industrial en orden a la prevención y consecuente reducción de riesgos de seguridad para garantizar la protección de la vida y la salud; y, establecer las obligaciones de los organismos de certificación acreditados y de los organismos de inspección acreditados con respecto a los distribuidores en las actividades de certificación de estas instalaciones. Clasifica los gases que se emplean en Colombia por familia y grupos de gases para especificar el índice de Wobbe (mínimo y máximo) en el poder calorífico superior.

Se encuentra disponible en: www.minminas.gov.co

4.2.2. Resoluciones emitidas por otros entes

NTC 4826:2001 (ICONTEC)

Su objeto es el de “establecer los requisitos sobre la calidad del gas natural que debe suministrar la estación de servicio a los vehículos para ser operados con éxito”. La norma contiene un conjunto de definiciones aplicables a la calidad del gas natural comprimido para su uso vehicular, ofrece límites para componentes potencialmente corrosivos y para material particulado; también trata lo correspondiente a las propiedades del gas (índice de Wobbe, número de metano, número de octano), enfocándose en su determinación y dando algunas directrices de sus magnitudes sin indicar límites particulares.

RSLN 0321:2002 (MinDesarrollo)

Estableció un reglamento técnico de emergencia para gasodomésticos. Indica que el rango de índice de Wobbe está entre 45,7 MJ/m³ a 54,7 MJ/m³, en el poder calorífico superior y a 15°C y 1013,25 mbar.

NTC 3527:2004 (ICONTEC)

Define los gases de ensayo, las presiones de ensayo, y las categorías de los artefactos a gas, relativos a la utilización de combustibles gaseosos de la primera, segunda, y tercera familia. El alcance de la norma está restringido a artefactos con un consumo calorífico nominal superior de 300 KW.

RSLN 1023:2004 (MINCIT)

Expide el reglamento técnico para gasodomésticos que funcionan con combustibles gaseosos, que se fabriquen o importen para ser utilizados en Colombia. Indica que el gas natural que se comercializa en Colombia pertenece al grupo H de la segunda familia, proponen adoptar un índice de Wobbe con una variación de $\pm 5\%$ con respecto al valor medio del rango máximo para los gases del grupo H de la segunda familia, siendo el rango de $47,7 \text{ MJ/m}^3$ a $52,7 \text{ MJ/m}^3$ en el poder calorífico superior a condiciones estándar.

RSLN 0680:2015 (MINCIT)

Establece reglamento técnico para algunos gasodomésticos que se fabriquen nacionalmente o importen para ser comercializados en Colombia. Clasifica los gases en familias con el valor de índice de Wobbe y gasodomésticos diciendo que aplica para gasodomésticos para cocción de alimentos, calentadores de agua (paso continuo o tipo acumulador) y no aplica para aparatos de cocción y calentaplatos, como tampoco para artefactos a gas para uso industrial o comercial.

4.3. CASO DE ESTUDIO: CAMPOS CUSIANA-CUPIAGUA Y GUAJIRA

Las principales fuentes de abastecimiento de gas natural en Colombia provienen de los campos Guajira y Llanos Orientales (Cusiana-Cupiagua); los cuales poseen grandes diferencias en especificaciones debido a las características de los fluidos en los yacimientos y tipos de procesos de tratamiento del gas de cada uno de ellos [18]. A continuación se presentan en la **tabla 25**, las principales propiedades de cada uno de estos tipos de gases en Colombia.

Tabla 25. Principales propiedades de Cusiana-Cupiagua y Guajira

PARÁMETRO	GAS GUAJIRA	GAS CUSIANA-CUPIAGUA
Densidad relativa	0,5644	0,6797
Poder calorífico superior	$37,138 \text{ MJ/m}^3$ (996,8 BTU/ft ³)	$42,673 \text{ MJ/m}^3$ (1145,3 BTU/ft ³)
Poder calorífico inferior	$33,443 \text{ MJ/m}^3$ (897,6 BTU/ft ³)	$38,620 \text{ MJ/m}^3$ (1036,5 BTU/ft ³)
Contenido de CO ₂	0,0501%	1,8184%
Contenido de N ₂	1,5576%	0,7429%
Temperatura de punto de rocío de hidrocarburos	7,2°C (45°F)	-6,7°C (20°F)
Tipo de gas	Gas pobre (alrededor de 98% CH ₄)	Gas rico (contiene hidrocarburos pesados)
Procesos de tratamiento del gas	Deshidratación	Deshidratación, remoción de hidrocarburos pesados y endulzamiento

NOTA: Todas las propiedades con base volumétrica están expresadas a condiciones estándar.

Fuente: POLYGON ENERGY.

Aplicando la fórmula de índice de Wobbe, y con los datos suministrados en la tabla anterior de cada uno de los gases principales en Colombia, se muestra **en la tabla 26**, que el índice de Wobbe es,

Tabla 26. Cálculo índice de Wobbe superior para gases Cusiana-Cupiagua y Guajira

PARÁMETRO	GAS GUAJIRA	GAS CUSIANA-CUPIAGUA
Poder calorífico superior	996,8 BTU/ft ³	1145,3 BTU/ft ³
Densidad relativa	0,5644	0,6797
Índice de Wobbe superior	1326,8 BTU/ft³	1389,2 BTU/ft³

Con relación al RUT, es necesario reconocer que el índice de Wobbe guarda relación con el poder calorífico (superior e inferior) [21], ya que son proporcionales (a mayor poder calorífico, mayor valor de índice de Wobbe).

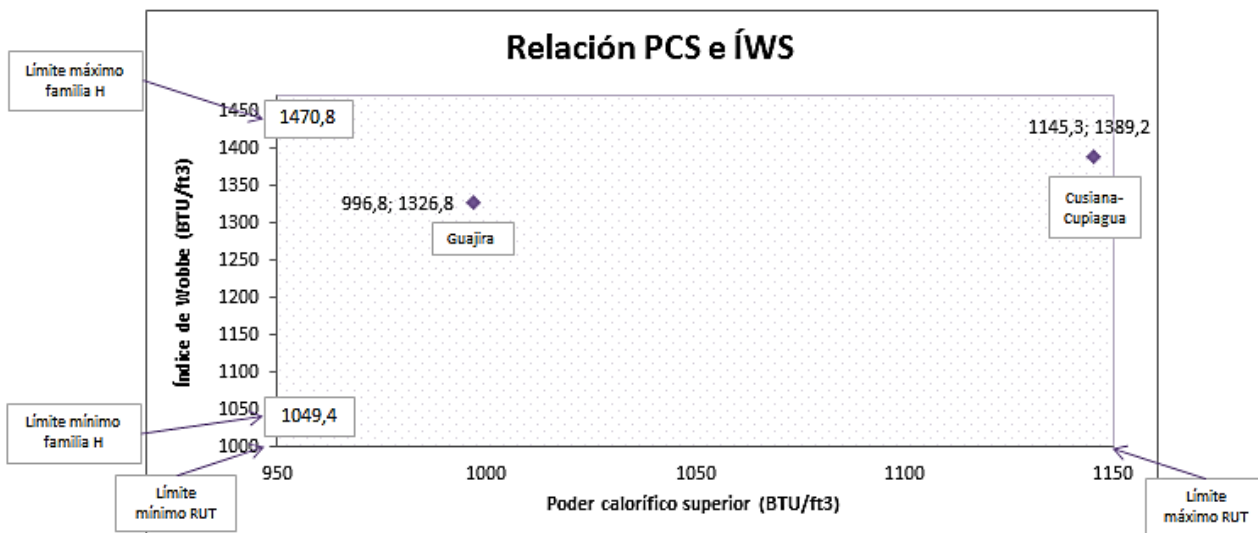
Para poder conocer entre qué rango debe encontrarse los índices de Wobbe para cada uno de los diferentes tipos de gas que tenemos en Colombia, debe tenerse en cuenta especificaciones de calidad del gas natural según el Reglamento Único de Transporte, además de los índices de Wobbe que se sugieren para gases de la segunda familia, grupo H, en donde se encuentra el gas natural.

Es por ello, que en la siguiente gráfica se evidencia el índice de Wobbe, y el poder calorífico. En ella se establecen rangos especificados por el RUT y por el grupo en el que se encuentra el gas natural mencionados en “Especificaciones de calidad del gas natural en el punto de entrada del SNT de gas-Número de Wobbe, CREG”. Se muestra que los gases tanto Cusiana-Cupiagua como Guajira, se encuentran entre estos límites. Con ello, se delimita rangos para los tipos de gases en Colombia a modo general, ya que los gases con los que se estudia este caso son de composiciones extremas y son los principales en nuestro país.

A continuación, se muestra **en la gráfica 17**, la relación entre el poder calorífico superior y el índice de Wobbe superior con sus respectivas limitaciones. Además, se muestra el punto de Cusiana-Cupiagua y Guajira.

Gráfica 17. Relación PCS e ÍWS

	Gas Guajira	Gas Cusiana-Cupiagua
Índice de Wobbe (BTU/ft ³)	1326,8	1389,2
Poder calorífico superior (BTU/ft ³)	996,8	1145,3



Siendo, los rangos permisibles para Colombia: índice de Wobbe entre 1049,4 BTU/ft³ a 1470,8 BTU/ft³ y poder calorífico entre 950 BTU/ft³ a 1150 BTU/ft³ (actualmente estipulado en el RUT).

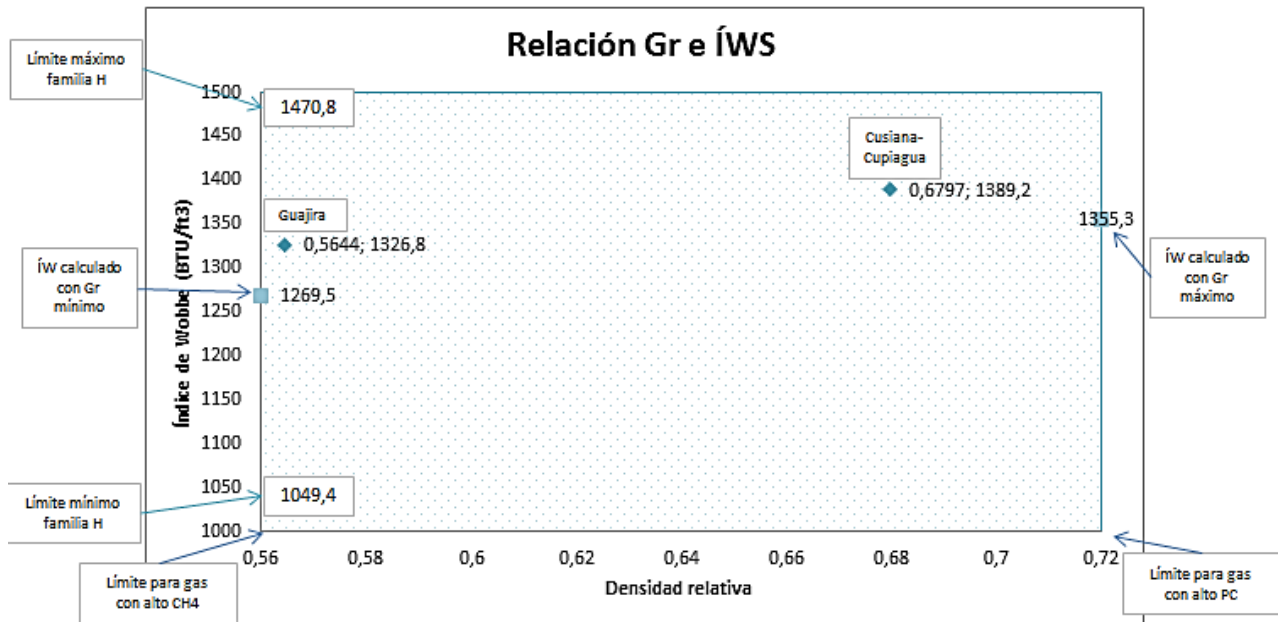
El índice de Wobbe es un parámetro fácil de utilizar para saber cuál es la mínima especificación de intercambiabilidad que debe ser implementada en Colombia para un control básico, pero es necesario trabajar con otro parámetro para asegurar que los procesos de combustión en uso final del gas sean óptimos [21].

Por otro lado, debe tenerse en cuenta también la densidad relativa, ya que es la otra variable que incide en el índice de Wobbe. Se toma en cuenta que para gases naturales con alto contenido de metano (composición típica de CH₄ entre 87,6% y 95,7%, además de %N₂ entre 0,1 a 2,39), la densidad relativa se encuentra entre 0,56 y 0,614. Y se toma en cuenta que para gases naturales con alto poder calorífico (composición típica de CH₄ entre 85% y 90,1%, además de %N₂ entre 1,2 a 7,5), la densidad relativa se encuentra entre 0,62 y 0,719.

A continuación, se muestra **en la gráfica 18**, la relación entre la densidad relativa y el índice de Wobbe superior con sus respectivas limitaciones. Además, se muestra el punto de Cusiana-Cupiagua y Guajira.

Gráfica 18. Relación Gr e ÍWS

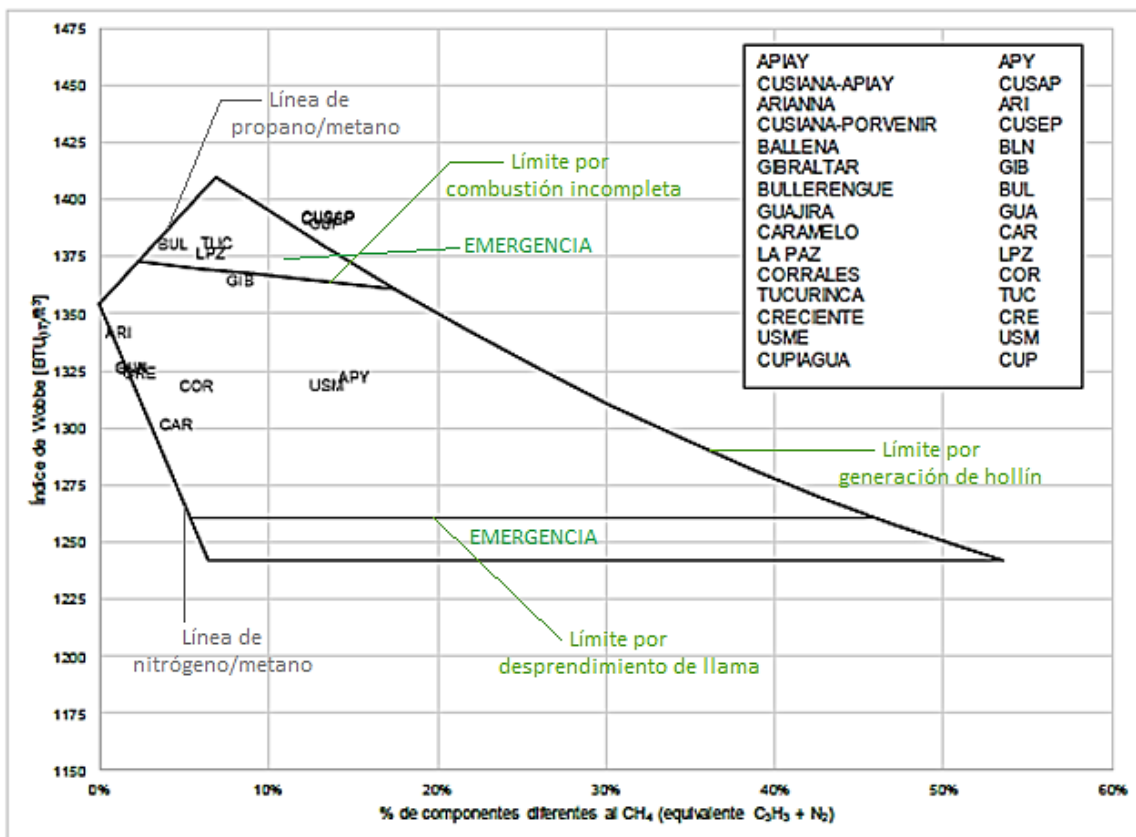
DENSIDAD RELATIVA		
TIPO DE GAS	RANGO	
Alto contenido de metano	0,56	0,614
Gas Guajira	0,5644	
Alto poder calorífico	0,62	0,719
Gas Cusiana-Cupiagua	0,6797	



Siendo, el rango permisible para Colombia en densidad relativa entre 0,56 a 0,72. De igual manera, en las dos gráficas presentadas, puede concluirse que el gas de la Guajira con el gas de Cusiana-Cupiagua, no son intercambiables, ya que su índice de Wobbe fue de 1326,8 BTU/ft³ y 1389,2 BTU/ft³ respectivamente, lo que da una diferencia alrededor de 4,7%.

Por otro lado, el diagrama de Dutton que se presenta a continuación **en la gráfica 19**, evalúa el índice de Wobbe superior de diferentes campos de Colombia, entre ellos se encuentra Cusiana, Cupiagua y Guajira [20].

Gráfica 19. Método de Dutton aplicado en gases colombianos



Fuente: POLYGON ENERGY [20].

Como se puede ver en la gráfica, si se aplicaran las líneas límites usadas en Reino Unido, podría decirse que el gas de Guajira, Ballena, Arianna, Creciente, Corrales, Usme, Apiay, Caramelo se encuentran en la zona aceptable de intercambiabilidad. El gas de Gibraltar, se encuentra tocando la línea límite que presenta fenómeno de combustión incompleta. Mientras que los gases como La Paz, Bullerengue, Tucurínca, se encuentran en una zona de emergencia de la parte superior, la cual quiere decir que presenta fenómenos de combustión que deben determinarse para ser aceptables en la zona de intercambiabilidad (han sobrepasado la línea de fenómeno de combustión incompleta). Mientras que los gases de Cupiagua, Cusiana-Apiay, Cusiana-Porvenir, se encuentran fuera del diagrama de Dutton, sobrepasando el límite de fenómeno por generación de hollín, lo cual debe corregirse para poder encontrarse en la zona aceptable de intercambiabilidad.

El índice de Wobbe permite conocer de una manera fácil si dos gases pueden ser intercambiables, en este caso encontramos que el gas de Guajira con el gas de Cusiana-Cupiagua no son intercambiables debido a un diferencial alto, de otro

modo, al no tener información de problemas que se asocien a fenómenos de combustión, se recurre a usar el Diagrama de Dutton, el cual permite esclarecer los fenómenos de combustión asociados para cada uno de los gases y, se muestra que aunque el gas de Guajira se encuentra en una zona aceptable de intercambiabilidad, el gas de Cusiana-Cupiagua presenta problemas asociados a fenómenos de combustión y debe determinarse alguna manera para permitir que sea intercambiable con otros gases ya que estos gases (Cusiana-Cupiagua) son unos de los más importantes en nuestro país.

4.4. RELEVANCIA DE LA INTERCAMBIABILIDAD DE GASES EN CONTEXTO COLOMBIANO

A lo largo del documento se mostró la importancia de la aplicabilidad del tema en el contexto colombiano. Los capítulos muestran una visión acerca de variables que deben analizarse para aplicar la intercambiabilidad en gases, debe considerarse de otro modo la trayectoria del tema a nivel histórico porque con base a experiencia de otros países puede trabajarse en el tema para Colombia. Se habló de características asociadas, parámetros de evaluación de calidad del gas actuales en nuestro país, y, de principales propiedades características asociadas al tema, todo ello para explicar la importancia de conocer a fondo todo lo que conlleva el tema y en qué incide.

De otro modo, se hizo un análisis demanda-oferta, es decir, que pasará en un futuro corto para Colombia (caso de importación de GNL), y problemas e implicaciones comunes que pueden presentarse en equipos de combustión que trabajen con gas, desde sector doméstico hasta sector comercial/industrial, con el fin de presentar una perspectiva general de lo que podría pasar si no se toma en cuenta el tema.

Por último, se habló de los métodos y parámetros de evaluación de intercambiabilidad de gases y se sugirieron los de mayor facilidad para emplear y los que brindarían información útil acerca de la intercambiabilidad y fenómenos asociados con combustión. Panorama normativo nacional e internacional acerca del tema y un caso de estudio para evaluación de dos gases predominantes en Colombia.

Por estas razones es de gran importancia que la Comisión de Regulación de Energía y Gas, el Consejo Nacional de Operación de Gas Natural y el Ministerio de Minas y Energía, aprueben el uso de parámetros que evalúen la intercambiabilidad de gases naturales en Colombia (parámetros como índice de Wobbe y diagrama de Dutton), ya que con ello, los agentes de la cadena tendrían que asegurar un gas intercambiable y se tendría gases naturales para el sector doméstico, industrial y comercial con mayor calidad.

5. CONCLUSIONES

- Se reconoce que el tema de intercambiabilidad de gases y su parámetro fundamental, índice de Wobbe superior, no ha sido incluido en el RUT como parámetro indicador de intercambiabilidad y calidad de gases naturales.
- Se reconoce que el poder calorífico es un parámetro importante en cuestión comercial y contabilidad energética pero no es un parámetro en cuestión de calidad.
- A pesar de que a nivel mundial, se conoce el tema de intercambiabilidad de gases hace alrededor de 90 años, en Colombia no se ha reconocido el índice de Wobbe superior como parámetro determinante de la intercambiabilidad de gases.
- Es necesario incluir el tema de intercambiabilidad de gases en el RUT.
- Una de las principales propiedades características asociadas a la intercambiabilidad de gases, es la elevación, la cual no se toma en cuenta en ninguno de los métodos de índices simples, múltiples, de graficas u otros. La variación de pisos térmicos, no ha sido tomada en cuenta y ella afecta el óptimo desempeño de equipos de combustión.
- No existen actualmente estudios que tomen en cuenta las condiciones atmosféricas de diferentes regiones del país.
- Aunque actualmente, no se regulan los mercados de importación y exportación de gas natural licuado en el mundo, y ante la perspectiva de importar gas, es necesario evaluar la intercambiabilidad de gases que podrían llegar a tener Colombia en su planta de regasificación para suministro de equipos de combustión comercial e industrial (primordialmente).
- Aunque existe normatividad en Colombia asociada al tema de intercambiabilidad de gases, es importante que lo implementen para que todos los agentes asociados a la cadena del gas natural puedan proporcionar al sector doméstico y comercial/industrial, gases que brinden seguridad, calidad y buena operatividad.
- Mediante el caso de estudio, se evidenció que los gases Cusiana-Cupiagua y Guajira no son intercambiables.

6. RECOMENDACIONES

- Aunque falta la implementación de parámetro(s) en el RUT como índice de Wobbe superior y diagrama de Dutton, se deben realizar estudios que incluyan la variación de pisos térmicos (elevación) e incidencia de condiciones atmosféricas.
- En el RUT, debe incluirse la definición de la intercambiabilidad de gases, además del índice de Wobbe superior, diagrama de Dutton y densidad relativa.
- Realizar mayores estudios para delimitar el índice de Wobbe superior, incluyendo el análisis de todos los gases colombianos.
- Desarrollar un estudio acerca de la incidencia entre el contenido de nitrógeno máximo en volumen y la densidad relativa, ya que son variables que están enlazadas entre sí.
- Deben incluirse en el RUT, el índice de Wobbe superior y diagrama de Dutton, ya que proporcionan una correlación predictiva entre características físicas medibles del gas natural y, comportamiento de fenómenos de combustión.
- Evaluar si el distribuidor es quien debe garantizar una mayor flexibilidad en las condiciones de suministro, o el fabricante del artefacto es quien debe asegurar una mayor competitividad de sus productos.
Evaluar y definir una política de cual(es) actor (es) de la cadena del gas deberían pagar el precio de los ajustes para garantizar la intercambiabilidad de gases, si los usuarios son los que se benefician por un buen desempeño de sus artefactos que trabajen con gas, o si deben ser los fabricantes de los artefactos, o los agentes vinculados a toda la cadena del gas natural.

BIBLIOGRAFIA

ACEVEDO ÁLVAREZ, Carlos Alberto. Estudio sobre la influencia de la composición química de los principales gases naturales colombianos sobre el rendimiento de la conversión y el desempeño mecánico de los motores a gas en Colombia. Trabajo de Especialización en Combustibles Gaseosos. Medellín: Universidad de Antioquia. Facultad de Ingeniería. Departamento de Mecánica. 2003

AMELL ARRIETA, Andrés Adolfo. Fenómenos de combustión en llamas de pre mezcla. Trabajo Colciencias, curso de combustión de combustibles gaseosos. Medellín: 2009. Universidad de Antioquia. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía.

BRISTOL. Adaptado a español: El índice de Wobbe y la intercambiabilidad de gas natural. Gestión de procesos Emerson, 2007. 1660AD-5a

BRITISH PETROLEUM. Adaptado a español: Guía para la intercambiabilidad y calidad de gas natural. 2011. 156 p.

CARRILLO, Gustavo. GUERRERO, Patricia. Cálculo de propiedades del gas natural. Trabajo de grado Ingeniero Químico. Maracaibo: Universidad Rafael Urdaneta. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química, 2013. 117 p.

COMISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA Y GAS. CREG 062:2008 Especificaciones de calidad del gas natural en el punto de entrada del Sistema Nacional de Transporte de gas –Número de Wobbe. Colombia: 2008. Disponible en Internet, URL: [http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/1c09d18d2d5ffb5b05256eee00709c02/ffad21a8c27fd8a20525785a007a7086/\\$FILE/D-062-08%20N%C3%9AMERO%20DE%20WOBBE.pdf](http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/1c09d18d2d5ffb5b05256eee00709c02/ffad21a8c27fd8a20525785a007a7086/$FILE/D-062-08%20N%C3%9AMERO%20DE%20WOBBE.pdf)

----- . CREG 071:1999 Reglamento Único de Transporte de Gas Natural. Colombia: 1999. Disponible en Internet, URL: <http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/Indice01/Resoluci%C3%B3n-1999-CREG071-99>

CONCENTRA. Volumen de gas asignado, nominado y termoeléctrico en Colombia. Colombia. Disponible en Internet, URL: www.concentra.co

CORTÉS TORRES, Jaime Hernán. Validación de la intercambiabilidad de gases en el contexto colombiano. Trabajo de Especialización en Gases Combustibles. Medellín: Universidad de Antioquia. Facultad de Ingeniería. Departamento de Mecánica. 2003. 117 p.

DR. TONKONOGIJ. Adaptado a español: Análisis de cambios de la calidad de gas natural y su estimación en valores de sistemas de transmisión adecuados para los usuarios de SC “Lietuvos Dujos”. Estudio de posibilidades. Reporte final.

Laboratorio de investigación y pruebas de equipos térmicos. Breslaujos: Lietuvos Energetikos Institutas, 2012. 20 p. S/12-1384.12.12-G-V:01

DUTTON, B. C. Adaptado a español: Una nueva dimensión a la intercambiabilidad de gases, Institución de Ingeniería de Gas, 1984.

FLÓREZ ORREGO, Daniel. Método para el estudio de la intercambiabilidad de una mezcla de gas natural y gas natural Syngas en quemadores de pre mezcla de régimen laminar: Un artículo de revisión. Medellín: Universidad de Antioquia. Facultad de Ingeniería. Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía. 34 p.

GNL GLOBAL. Comercio de GNL en el mundo. Disponible en Internet, URL: www.gnlglobal.com

MONTAÑA, Daniel. Determinación de las propiedades de combustión e identificación de problemas de intercambiabilidad de las mezclas de gas natural con otros combustibles de refinería. Trabajo de maestría Ingeniería Química. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico mecánicas. Departamento de Ingeniería Química, 2011.

NGC+ INTERCHANGEABILITY WORK GROUP. Adaptado a español: Libro sobre intercambiabilidad de gas natural y uso final de la combustión. 2005. 34 p.

NOUS-UTILE. Cuál es el índice de Wobbe. 2016. Disponible en Internet, URL: <http://nous-utile.info/article/cual-es-el-indice-de-wobbe>

OLARTE GÓMEZ, Ivonne Carolina. Análisis conceptual de la selección de alternativas para el aprovechamiento del gas de recolección en el campo Chichimene. Trabajo de grado Ingeniería en Energía. Bucaramanga: Universidad Autónoma de Bucaramanga. Facultad de Ingenierías Físico mecánicas. Departamento de Ingeniería en Energía, 2014. 177 p.

ORTÍZ AFANADOR, Juan Manuel. Fundamentos de la intercambiabilidad del gas natural. **En:** Revista MET&FLU. 2014. Edición. 9, p. 6-15

POLYGON ENERGY. Estado del arte intercambiabilidad de gases a nivel internacional. Trabajo para Consejo Nacional de Operación de Gas Natural. Bucaramanga, 2016. 66 p.

------. Inventario de gases combustibles y principales equipos de uso final en Colombia. Trabajo para Consejo Nacional de Operación de Gas Natural. Bucaramanga, 2016. 57 p.

------. Propuesta para el control de la intercambiabilidad de gases en Colombia. Trabajo para Consejo Nacional de Operación de Gas Natural. Bucaramanga, 2016. 86 p.

RUBIO GAVIRIA Lina María. Análisis de la intercambiabilidad de mezclas GLP/Gas de síntesis con alto contenido de hidrógeno con respecto al gas natural. Trabajo de maestría en Ingeniería. Medellín: Universidad de Antioquia. 2013. 7 p.

SEDIGAS Especificaciones técnicas para las actividades de jefe de obra de canalización de distribución de gas. Unidad 2 - Propiedades de los combustibles gaseosos. 2011. 22 p.

UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA Y MINISTERIO DE MINAS Y ENERGIA. Balance de gas natural en Colombia 2015-2023. Colombia. 2015. 29 p.

VILOCHE BAZÁN, Juan Heraldo. Gas natural, propiedades y usos. Foro regional gas natural, propiedades y uso – proyectos presentes y futuros. Perú: Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Química.

ANEXOS
Anexo A. Documento CREG-062:2008

ESPECIFICACIONES DE CALIDAD DEL GAS NATURAL EN EL PUNTO DE ENTRADA DEL SISTEMA NACIONAL DE TRANSPORTE DE GAS- NUMERO DE WOBBE-

ANTECEDENTES

Regulación vigente sobre calidad

Mediante la resolución CREG 071 de 1999, se adoptó el Reglamento Único de Transporte de Gas Natural –RUT-. En el numeral 6.3 del RUT, modificado mediante la resolución CREG 054 de 2007, se establecen las especificaciones de calidad del gas natural entregado al transportador por parte del remitente en el punto de entrada al sistema de transporte así:

CALIDAD DEL GAS

El gas natural entregado al transportador por el agente, en el punto de entrada del sistema de transporte y por el transportador en el punto de salida, deberá cumplir con las especificaciones de calidad indicadas **en la tabla 27**.

Tabla 27. Especificaciones de calidad del gas natural

ESPECIFICACIONES	SISTEMA INTERNACIONAL	SISTEMA INGLÉS
Máximo poder calorífico bruto GHV (nota ¹)	42,8 MJ/m ³	1150 BTU/ft ³
Mínimo poder calorífico bruto GHV (nota ²)	35,4 MJ/m ³	950 BTU/ft ³
Contenido de líquido (nota 2)	Libre de líquidos	Libre de líquidos
Contenido total de H ₂ S máximo	6 mg/m ³	0,25 grano/100 PCS
Contenido total de azufre máximo	23 mg/m ³	1 grano/100 PCS
Contenido de CO ₂ máximo en % volumen	2	2
Contenido de N ₂ máximo en % volumen	3	3
Contenido de inertes máximo en % volumen (nota ³)	5	5

Contenido de oxígeno máximo en % volumen	0.1	0.1
Contenido máximo de vapor de agua	97 mg/m ³	6 lb/MPCS
Temperatura de entrega máxima	49°C	120°F
Temperatura de entrega mínima	7,2°C	45°F
Contenido máximo de polvos y material en suspensión (nota ₄)	1,6 mg/m ³	0,7 grano/1000 PC

NOTA¹: Todos los datos sobre metro cúbico o pie cúbico de gas están referidos a condiciones estándar

NOTA²: Los líquidos pueden ser: hidrocarburos, agua y otros contaminantes en estado líquido

NOTA³: Se considera como contenido de inertes la suma de los contenidos de CO₂, nitrógeno y oxígeno

NOTA⁴: El máximo tamaño de las partículas debe ser 15 micrones

Salvo acuerdo entre las partes, el productor-comercializador y el remitente están en la obligación de entregar gas natural a la presión de operación del gasoducto en el punto de entrada hasta los 1200 psig, de acuerdo con los requerimientos del transportador. El agente que entrega el gas no será responsable por una disminución en la presión de entrega debida a un evento atribuible al transportador o a otro agente usuario al sistema de transporte correspondiente.

Si el gas natural entregado por el agente no se ajusta a alguna de las especificaciones establecidas en este RUT, el transportador podrá rehusar aceptar el gas en el punto de entrada.

Punto de rocío de hidrocarburos

El punto de rocío de hidrocarburos para cualquier presión no deberá superar el valor de 45°F (7,2°C).

La medición del punto de rocío de hidrocarburos se hará como sigue:

- Medir en puntos de entrada al sistema nacional de transporte, que podrán estar localizados en cualquier parte del territorio nacional
- Utilizar la metodología de espejo enfriado automáticamente con analizador en línea, realizando calibraciones periódicas mediante el método de referencia basado en el estándar ASTM-D1142 o estándares de mayor exactitud, cuando estén disponibles

Se deberá adoptar el método de referencia basado en el estándar ASTM-D1142 o estándares de mayor exactitud, cuando estén disponibles, como método de referencia para resolver disputas, entre los agentes, relacionadas con el punto de rocío de hidrocarburos.

Las partes interesadas escogerán de común acuerdo, cuando ello no sea establecido por autoridad competente, lo siguiente:

- El estándar de mayor exactitud a utilizar como método de referencia cuando sea el caso
- Los técnicos competentes para realizar las calibraciones periódicas del analizador en línea y las verificaciones de la medición en caso de disputas
- La periodicidad de las calibraciones del analizador en línea

Verificación de la calidad

Es responsabilidad del transportador verificar la calidad del gas que recibió. Una vez que el transportador recibe el gas en el sistema de transporte, está aceptando que este cumple con las especificaciones de calidad. Para la verificación de la calidad del gas el productor-comercializador deberá instalar en los puntos de entrada, analizadores en línea que permitan determinar, como mínimo:

- Poder calorífico del gas
- Dióxido de carbono
- Nitrógeno
- Oxígeno
- Gravedad específica
- Cantidad de vapor de agua
- Sulfuro de hidrógeno
- Azufre total

En el punto de salida, el transportador deberá estar en capacidad de garantizar mediante los equipos adecuados o mediante la metodología y periodicidad que acuerden las partes, la calidad del gas entregado.

Cumplimiento de las especificaciones de CO₂

Para el cumplimiento de las especificaciones de contenido de CO₂ en el gas natural entregado por un agente al transportador, se establece un periodo de transición de dos años contados a partir de la expedición del presente reglamento.

Si el gas natural entregado por el agente no se ajusta al contenido máximo de CO₂ establecido en el RUT, el transportador podrá rehusarse a aceptar el gas en el punto de entrada, o podrá solicitar al remitente el pago de los costos que demande transportar gas por fuera de la especificación establecida en el presente reglamento. Dichos costos se establecerán respetando el principio de neutralidad que señala la ley.

Entrega de gas natural por fuera de las especificaciones establecidas

Si el gas natural entregado por el remitente es rechazado por el transportador, por estar fuera de las especificaciones de calidad establecidas en este RUT, el

remitente deberá responder por todas las obligaciones que posea con los demás agentes involucrados.

Si el transportador entrega gas natural por fuera de las especificaciones de calidad establecidas, el remitente podrá negarse a recibir el gas y el transportador deberá responder por el perjuicio causado.

La exigencia de especificaciones mínimas de calidad del gas inyectado a un sistema de transporte tiene dos objetivos principales:

- Proteger la integridad del sistema de transporte y de las instalaciones de los agentes. Por ejemplo, se controla el contenido de CO₂ y agua para evitar corrosión interna en las tuberías y equipos de los consumidores, así como mal funcionamiento de equipos de medición y válvulas de control. También se controla la formación de líquidos hidrocarburos ya que causan, entre otros efectos, pérdida de eficiencia en los sistemas de transporte.
- Permitir el intercambio de gases de tal forma que se afecte la combustión en quemadores diseñados para una determinada familia de combustibles gaseosos⁵. El intercambio de gases se entiende como la mezcla de gases con diferentes características químicas⁶.

NOTA⁵: Los gases combustibles se han caracterizado en tres familias:

- *Gases manufacturados (primera familia)*
- *Gases naturales (segunda familia)*
- *Gases licuados (tercera familia)*

NOTA⁶: Corresponde a la expresión anglosajona “Natural Gas Interchangeability”

Las especificaciones de calidad relacionadas con el intercambio de gases no se han definido en el RUT. En tal sentido, se ha considerado necesario regular el tema en razón a la diversidad de características que puede tener el gas que se consume en el país, como se observa a continuación:

- Los generadores termoeléctricos han manifestado inquietudes con respecto al efecto que pueda tener la mezcla de gases de Cusiana y Guajira en sus plantas
- Se ha observado y se prevé un incremento en las fuentes de gas a ser inyectado al sistema nacional de transporte. Por ejemplo, Gibraltar, La Creciente, Don Pedro, Serafín
- Se han planteado iniciativas tendientes a utilizar gas natural provenientes de rellenos sanitarios (relleno de Doña Juana), gas metano procedente de yacimientos de carbón y aire propanado (suministro parcial a Cúcuta)
- Se proyectan importaciones de gas natural a partir del año 2012

En este documento se analiza y se desarrolla una propuesta regulatoria tendiente a establecer las especificaciones de calidad aplicables al intercambio de gases.

COMPLEMENTACIÓN DEL RUT

Mediante la ley 401 de 1997 se creó el Consejo Nacional de Operación de Gas Natural CNO GAS- como un cuerpo asesor. Las funciones de asesoría de este consejo se definen en el numeral 1.4 del RUT. De otra parte, en el numeral 1.3 se establecen funciones al CNO GAS- relacionadas con el seguimiento al RUT, así:

“Cuando lo considere conveniente el Consejo Nacional de Operación de Gas Natural revisará la experiencia en la aplicación de los aspectos operativos, y comerciales del RUT, y enviará a la comisión un informe sobre el resultado de las revisiones, las propuestas de reforma, si las hubiere, y cualquier observación o sugerencia presentada por escrito por cualquiera de los agentes, y que no haya sido incluida en las propuestas de reforma.

La comisión examinará las propuestas y las demás observaciones e iniciativas y, en la medida en que las considere convenientes, o de oficio, modificará el RUT después de haber oído al Consejo Nacional de Operación de Gas Natural sobre las modificaciones propuestas. La iniciativa para la reforma del reglamento también será de la comisión si esta estima que debe adecuarse a la evolución de la industria, que contraria a las regulaciones generales sobre el servicio, que va en detrimento de mayor concurrencia entre oferentes y demandantes del suministro o del libre acceso y uso del servicio de transporte y otros servicios asociados”

De acuerdo con la anterior disposición regulatoria, y ante las inquietudes de los agentes termoeléctricos con relación a la mezcla de gases de Cusiana y Guajira, la comisión solicitó al CNO GAS- su análisis y recomendación del caso. Con base en la información suministrada por el CNO GAS, y los análisis internos de la comisión, se establece la propuesta que se desarrolla en el presente documento. Esta propuesta implica ampliar o incorporar disposiciones nuevas al RUT en la parte relacionada con la calidad.

INTERCAMBIO DE GASES

Definición y métodos para evaluación del intercambio de gases

Las boquillas en los quemadores de los equipos de usuarios finales están diseñadas para operar adecuadamente con gases cuya composición este dentro de ciertos límites. Cuando la composición del gas esta por fuera de los límites aceptables, se pueden presentar los siguientes fenómenos:

- En gasodomésticos: formación de hollín, elevados niveles de monóxido de carbono, y emisiones contaminantes, llama con puntas amarillas, desprendimiento de llama, retroceso de la llama, molestias en el encendido por extinción de los pilotos

- En máquinas reciprocantes: puede generar auto ignición, afectar negativamente el desempeño de la máquina y reducir la vida útil de algunas partes de la máquina
- En turbinas de combustión: puede incrementar las emisiones, reducir la confiabilidad o disponibilidad y reducir la vida útil de partes de la máquina
- En calderas industriales, hornos y calentadores: degrada el desempeño, daña los equipos de transferencia de calor y dificulta cumplir los requerimientos de emisiones

Las características de un gas pueden variar significativamente cuando se mezclan gases de diferentes fuentes o regiones. Por tanto, las especificaciones para el intercambio de gases hacen parte de los parámetros de calidad a definir para el gas natural, lo cual reviste gran importancia cuando hay mezcla de gases:

Se conocen tres opciones para manejar el intercambio de gases:

- Tratamiento en la fuente de producción lo cual reduce la concentración de inertes pesados, etc.
- Manejo antes de inyectar el gas al sistema de transporte, usualmente utilizado en gas natural licuado donde se pueden implementar opciones como mezclas de gases (“*blending*”) o inyección de inertes (nitrógeno, aire, etc.) a la corriente del gas para aumentar su gravedad específica
- Manejo en puerta de usuario, donde se puede implementar el mecanismo de inyección de inertes (nitrógeno, aire, etc.) a la corriente del gas para aumentar su gravedad específica. Esta opción es aplicable a grandes consumidores y excepcionalmente ha sido utilizada en USA por algunos distribuidores en sus “*City Gates*”. Un mecanismo viable, pero costoso cuando se trata de muchos usuarios, es la inspección y calibración de los respectivos equipos

Una definición reciente de intercambio de gases se establece en los siguientes términos:

“Habilidad para sustituir un combustible gaseoso por otro, en una aplicación de combustión, sin cambiar la seguridad operativa, la eficiencia y desempeño en términos del incremento de emisiones contaminantes”

El método más confiable para evaluar el intercambio de gases de un gas sustituto es examinado en laboratorio el desempeño de varios quemadores ajustados a un gas de referencia. Este procedimiento sería costoso e impráctico. En su lugar se han desarrollado métodos de predicción basados en parámetros empíricos. Así, la industria internacional ha desarrollado varios índices para caracterizar el intercambio de gases, entre los cuales se tiene:

- Número o índice de Wobbe: considera la entrada de energía y la gravedad específica del gas. Es el índice más ampliamente aceptado en el ámbito internacional para medir el intercambio de gases
- Índices del boletín AGA No. 36 e índices de Weaver: consiste en establecer índices para cada uno de los fenómenos característicos de la combustión (desprendimiento, retroceso, llama amarilla). Corresponde a metodologías de índices múltiples, donde se estiman varios factores de intercambio de gases para predecir el comportamiento de un gas sustituto en determinado quemador

En general, la definición de intercambio de gases dependerá del tipo de quemadores que tenga los usuarios. Asimismo, los equipos de tecnologías modernas son más sensibles a una variación en la composición del gas. Debe tenerse en cuenta que los gases combustibles se han caracterizado en tres familias:

- Gases manufacturados
- Gases naturales
- Gases licuados

El gas natural pertenece a la segunda familia la cual se subdivide en grupos H, L, E con un índice de Wobbe entre 39,1 MJ/m³ y 54,8 MJ/m³ para el grupo H. Así, los índices para medir el intercambio de gases tendrán diferentes valores según la familia de que se trate.

EL NÚMERO DE WOBBE

Cada índice tiene sus propias limitaciones. La evaluación de intercambio de gases a partir de las metodologías de índices múltiples es compleja y refleja resultados para un tipo específico de gasodoméstico.

El índice de Wobbe no proporciona una caracterización detallada para el intercambio de gases en todas las aplicaciones. Por ejemplo, para el caso de puntas de llama amarilla el índice de Wobbe no es suficiente.

Asimismo, el índice de Wobbe no caracteriza muy bien el intercambio de gases cuando la composición del gas cambia significativamente. Este último efecto en el índice de Wobbe se puede mitigar estableciendo límites al poder calorífico del gas (nótese que en el RUT se establece el mínimo y máximo poder calorífico del gas para inyectar al sistema nacional de transporte).

En algunos casos se combina el índice de Wobbe con otros parámetros o límites a la composición del gas, en particular para equipos especiales. No obstante, el índice de Wobbe es ampliamente aceptado por la industria en el ámbito internacional pues se considera un parámetro robusto para medir el intercambio de gases, simple y fácil de interpretar y de usar para mediciones de calidad del gas en línea en estaciones o plantas.

La utilidad del índice de Wobbe radica en que para un orificio dado, todas las mezclas de gases que tengan el mismo índice de Wobbe producirán la misma cantidad de calor (el índice de Wobbe para el metano puro es de 1363 BTU/PC).

El índice de Wobbe se define como el cociente entre el poder calorífico del gas por unidad de volumen (BTU/ft³, MJ/m³, etc.) y la raíz cuadrada de la gravedad específica del gas (la gravedad específica se define como la relación entre la densidad del gas y la densidad del aire, ambas medidas en iguales condiciones de presión y temperatura).

Generalmente se utiliza el poder calorífico superior aunque en algunos casos se usa el poder calorífico inferior del gas. En aplicaciones donde el gas o el aire es precalentado antes de la combustión, por ejemplo en las turbinas a gas modernas, se utiliza un índice de Wobbe modificado. En este caso se usa el poder calorífico neto o inferior y la temperatura del gas en la boquilla de entrada del combustible. El IW modificado corrige el efecto que tiene la temperatura del combustible antes de la combustión (al salir de la boquilla del equipo).

$$IWS = \frac{PCS}{\sqrt{G_r}} \quad (Ec. 24)$$

$$IW_M = \frac{PCS}{\sqrt{G_r * T_{gas}}} \quad (Ec. 25)$$

En el ámbito internacional hay una gran variedad de índice de Wobbe según la región. La figura 1 muestra los diferentes rangos del índice de Wobbe por estado en Estados Unidos, correspondiente a información del período 2002-2003. Tradicionalmente en Estados Unidos algunos aspectos de la calidad del gas natural, entre ellos el índice de Wobbe, se han establecido regionalmente o por estados dada la gran diversidad tanto en gases como en equipos de los usuarios (nuevas y antiguas tecnologías en gasodomésticos)(para efectos de comparar con otras unidades se hace la siguiente aproximación: 1400 BTU/ft³ = 52,14 MJ/m³).

El gas natural utilizado en Europa también presenta importantes diferencias en su composición. La figura 2 muestra una estimación de los diferentes rangos de índice de Wobbe que se presentarían, en un punto de entrada al sistema de transporte del Reino Unido, para diferentes volúmenes de importación. Este tema fue objeto de extensos análisis en el Reino Unido dado que:

- Se prevé que el país se convertirá en un importador neto de gas. Desde las diferentes fuentes existentes en Europa
- Los análisis indican que la composición del gas importado hará que el índice de Wobbe supere el límite superior (línea roja en la parte superior de la figura 2) aprobado por el regulador de Reino Unido

En general, se estudiaron dos alternativas:

- Modificar el índice de Wobbe en Reino Unido de tal forma que se ajustara a las características del gas importado
- No modificar el índice de Wobbe existente y establecer señales regulatorias que faciliten la inversión necesaria para adecuar el gas antes de inyectarlo al sistema de transporte (modificar el índice de Wobbe en Reino Unido implicaría reemplazar o adaptar millones de equipos a usuarios finales, lo cual tendría un costo estimado, en valor presente, de 2000 a 14500 millones de libras. El regulador adoptó la segunda opción

En países de la región se registra el caso de Argentina donde se establece un rango de índice de Wobbe entre 11300 y 12740 kcal/m³ equivalente a 47,3 y 52 MJ/m³ (resolución ENARGAS 622/98).

INTERCAMBIO DE GASES PARA EL CASO COLOMBIANO

Como se indicó anteriormente, el intercambio de gases reviste gran importancia cuando se presenta mezcla de gases en un sistema. Asimismo, el índice de Wobbe es aceptado por la industria del gas natural en el ámbito internacional como un índice adecuado y práctico para caracterizar el intercambio de gases. El intercambio de gases en Colombia empieza a tener relevancia recientemente a partir de la mezcla de cantidades importantes de gas natural de Cusiana, de la Guajira y de otros campos menores. De hecho, el CNO eléctrico manifestó a la CREG su preocupación por los efectos que pudiera tener la mezcla de gases en las plantas de generación a base de gas. Ante dichas preocupaciones el CNO-GAS manifestó, entre otros aspectos, que:

- Tanto el gas de Cusiana como el gas de los campos de la Guajira está dentro de los rangos de índice de Wobbe estipulados a nivel mundial y establecidos en la resolución 0321 de 2.002 del Ministerio de Desarrollo
- La variación porcentual de los índices de Wobbe de cualquiera de estos dos gases, con respecto al otro, se encuentra dentro de los parámetros establecidos por los estándares internacionales

Posteriormente el CNO eléctrico manifestó que, de acuerdo con las especificaciones mínimas del gas natural para las unidades de generación instaladas en el SIN, la variación del índice de Wobbe modificado para algunas plantas no debe superar el 2% y en otras el 5%. Así, el CNO eléctrico propone adoptar regulatoriamente el índice de Wobbe con una variación de $\pm 2\%$. Dado que el índice de Wobbe modificado, aplica únicamente para equipos especiales como las turbinas a gas de bajas emisiones, este no podría ser el índice aplicable para la industria del gas en general. En todo caso, los expertos indican que el índice de Wobbe no es suficiente para caracterizar la intercambiabilidad del gas natural en turbinas modernas y, que es necesario establecer otras medidas que están en estudio.

Cuando se definieron los estándares de calidad para la prestación del servicio de distribución de gas combustible por redes se planteó la posibilidad de establecer el índice de Wobbe en el RUT. Lo anterior por tratarse de un parámetro que, de acuerdo con la práctica internacional, se ajusta antes de inyectar el gas al sistema de transporte. En su momento CCC-divisa (2002) propuso un rango entre 45,7 MJ/m³ a 54,7 MJ/m³ para el índice de Wobbe en Colombia, estimado a condiciones estándar y con el poder calorífico superior.

En 2004, el Ministerio de Comercio, Industria y Turismo adoptó el reglamento técnico para gasodomésticos (cocinas, hornos, calentadores de agua de paso continuo, calentadores de agua tipo acumulador). En este reglamento se indica que el gas natural se comercializa en Colombia pertenece al grupo H de la segunda familia cuyo rango de índice de Wobbe está entre 45,7 a 54,7 MJ/m³, en el poder calorífico superior y a 15°C y 1013,25 mbar. Cabe anotar que este rango es el mismo que indico el Ministerio de Desarrollo en la resolución 0321 de 2002. Adicionalmente, el reglamento introduce, entre otras la siguiente definición:

“Número de Wobbe: relación entre el poder calorífico (inferior o superior) de un gas por unidad de volumen y la raíz cuadrada de su densidad relativa con respecto al aire, bajo las mismas condiciones de referencia.”

Cabe anotar que el rango de índice de Wobbe indicado en el reglamento técnico para gasodomésticos, el cual es igual a aquel propuesto por CCC-Divisa (2002), corresponde al máximo rango para los gases del grupo H de la segunda familia. Este rango representa una variación de $\pm 9\%$ con respecto al valor medio del mismo rango. La experiencia internacional señalada en este documento (Argentina, Reino Unido, Estados Unidos) indica que la variación aceptable del índice de Wobbe, en países con un importante parque de generación térmica a gas, es de $\pm 4\%$ al $\pm 5\%$. No se observa un índice de Wobbe con variación del $\pm 2\%$ como lo propone el CNO eléctrico. En tal sentido, se propone adoptar un índice de Wobbe con una variación de $\pm 5\%$ con respecto al valor medio del rango máximo para los gases del grupo H de la segunda familia. Es decir, el rango de 47,7 MJ/m³ a 52,7 MJ/m³ en el poder calorífico superior a condiciones estándar. Nótese que otras características que complementan el intercambio de gases (poder calorífico superior, contenido de inertes, etc.) están especificadas en el numeral 6.3 del RUT. El productor-comercializador será el responsable del cumplimiento de esta especificación de calidad. Las variables requeridas para estimar el índice de Wobbe (poder calorífico y gravedad específica) ya se miden en línea en los puntos de entrada al sistema de transporte, de acuerdo con lo establecido en el numeral 6.3.2 del RUT.

PROPUESTA A LA CREG

Con base en lo anterior se propone a la CREG someter a consulta las siguientes propuestas:

- Adoptar el índice de Wobbe como parámetro para verificar la intercambiabilidad de gases
- Adoptar el rango del índice de Wobbe de 47,7 MJ/m³ a 52,7 MJ/m³, para el gas natural inyectado al SNT y comercializado en Colombia (grupo H de la segunda familia), en el poder calorífico superior a condiciones estándar
- Asignar al productor-comercializador la responsabilidad de inyectar el gas al sistema de transporte dentro del rango de índice de Wobbe establecido

Anexo B. Resolución 084:2008

COMISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA Y GAS, RESOLUCIÓN 084 DE 2008

Por la cual se ordena hacer público un proyecto de resolución de carácter general que pretende adoptar la comisión, por la cual se complementan las especificaciones de calidad para la intercambiabilidad de gases en el sistema nacional de transporte de gas.

LA COMISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA Y GAS

En ejercicio de sus facultades legales, en especial de las conferidas por la ley 142 de 1994 y en desarrollo del 2253 de 1994 y 2696 de 2004,

CONSIDERANDO

Conforme a lo dispuesto por el artículo 9 del decreto 2696 de 2004, la comisión debe hacer público en su página web todos los proyectos de resoluciones de carácter general que pretenda adoptar, con las excepciones que allí se señalan, con antelación no inferior a treinta días a la fecha de su expedición;

La Comisión de Regulación de Energía y Gas, en su sesión 381 de 25 de julio de 2008, aprobó hacer público el proyecto de resolución *“por la cual se complementan las especificaciones de calidad para la intercambiabilidad de gases en el Sistema Nacional de Transporte de Gas”*.

RESUELVE

Artículo 1. Hágase público el proyecto de resolución *“por la cual se complementan las especificaciones de calidad para la intercambiabilidad de gases en el Sistema Nacional de Transporte de Gas”*.

Por la cual se ordena hacer público un proyecto de resolución de carácter general que pretende adoptar la comisión, por la cual se complementan las especificaciones de calidad para la intercambiabilidad de gases en el Sistema Nacional de Transporte de Gas.

Artículo 2. Invítase a los agentes a los usuarios y a la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, para que remitan sus observaciones o sugerencias sobre la propuesta, dentro de 1 mes siguiente a la publicación de la presente resolución en la página web de la Comisión de Regulación de Energía y Gas.

Artículo 3. Infórmese en la página web la identificación de la dependencia administrativa y de las personas a quienes se podrá solicitar información sobre el

proyecto y hacer llegar las observaciones, reparos o sugerencias, y los demás aspectos previstos en el artículo 10 del decreto 2696 de 2004.

Artículo 4. La presente resolución no deroga disposiciones vigentes por tratarse de un acto de trámite.

Por la cual se ordena hacer público un proyecto de resolución de carácter general que pretende adoptar la comisión, por la cual se complementan las especificaciones de calidad para la intercambiabilidad de gases en el Sistema Nacional de Transporte de Gas.

PROYECTO DE RESOLUCIÓN

Por la cual se complementan las especificaciones de calidad para la intercambiabilidad de gases en el sistema nacional de transporte de gas

LA COMISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA Y GAS

En ejercicio de sus atribuciones legales, en especial las conferidas por la ley 142 de 1994 y de acuerdo con los decretos 1524 y 2253 de 1994 y,

CONSIDERANDO

De acuerdo con lo establecido en el artículo 14 de la ley 142 de 1994, la actividad de transporte de gas natural es una actividad complementaria del servicio público domiciliario de gas natural;

Que de acuerdo con el artículo 73 de la ley 142 de 1994, es función de las comisiones fijar normas de calidad a las que deben ceñirse las empresas de servicios públicos, y determinar para cada bien o servicio público unidades de medida y de tiempo que deben utilizarse al definir el consumo;

Que según lo dispuesto en el artículo 73 de la ley 142 de 1994, corresponde a las comisiones regular los monopolios en la prestación de los servicios públicos, cuando la competencia no sea, de hecho, posible; y, en los demás casos, la de promover la competencia entre quienes prestan servicios públicos, para que las operaciones de los monopolistas o de los competidores sean económicamente eficientes, no impliquen abuso de posición dominante, y produzcan servicios de calidad;

Según el artículo 3 de la ley 401 de 1997, es función de la CREG establecer las reglas y condiciones operativas que debe cumplir toda la infraestructura del sistema nacional de transporte a través del Reglamento Único de Transporte de Gas Natural;

Mediante la ley 401 de 1997 se creó el Consejo Nacional de Operación de Gas Natural –CNO gas- como un cuerpo asesor y que dichas funciones de asesoría se definen en el numeral 1.4 del RUT;

Que la resolución CREG 071 de 1999, establece el Reglamento Único de Transporte de Gas Natural –RUT-;

En el numeral 6.3 del RUT se establecen especificaciones de calidad del gas natural entregado al transportador por el agente, en el punto de entrada del sistema de transporte;

Que el intercambio de gases, entendido como la capacidad de sustituir un combustible gaseoso por otro, en una aplicación de combustión, sin cambiar la seguridad operativa, la eficiencia y desempeño en términos del incremento de emisiones contaminantes, es de gran importancia cuando se presenta mezcla de gases en un sistema;

Que el intercambio de gases en Colombia empieza a tener relevancia a partir de la mezcla de cantidades importantes de gas natural de Cusiana, de la Guajira y otros campos;

Que se ha observado y se prevé un incremento en las fuentes de gas a ser inyectado al sistema nacional de transporte;

Que se han planteado iniciativas tendientes a utilizar gas natural proveniente de rellenos sanitarios, gas metano procedente de yacimientos de carbón y aire propanado;

Que hacia el futuro se proyectan importaciones de gas natural;

Que mediante la resolución CREG 054 de 2004 se complementan las especificaciones de calidad del gas natural inyectado al Sistema Nacional de Transporte, definidas en la resolución CREG 071 de 1999;

Que las especificaciones de calidad relacionadas con el intercambio de gases no se han definido en el RUT;

Que el número de Wobbe es aceptado por la industria del gas natural en el ámbito internacional como un índice adecuado y práctico para caracterizar el intercambio de gases;

Que el numeral 6.3.2 del RUT requiere la medición en línea, entre otros aspectos, de las variables necesarias para calcular el número de Wobbe;

Que es necesario definir el rango del número de Wobbe aplicable al gas inyectado al Sistema Nacional de Transporte de Gas;

DEFINICIONES

Artículo 1º. Adiciónese la siguiente definición al numeral 1.1 del anexo general de la resolución CREG 071 de 1999

“Número de Wobbe: relación entre el poder calorífico (inferior o superior) de un gas por unidad de volumen y la raíz cuadrada de su densidad relativa con respecto al aire, bajo las mismas condiciones de referencia”

Artículo 2º. Modifíquese el artículo 2º. De la resolución CREG 054 de 2007, el cual quedara así:

CALIDAD DEL GAS: el gas natural entregado al transportador por el agente, en el punto de entrada del sistema de transporte y por el transportador en el punto de salida, deberá cumplir con las especificaciones de calidad indicadas en el cuadro.

Mencionado anteriormente en ALEXO A, como Tabla. Especificaciones de calidad del gas natural.

Rango del número de Wobbe

El número de Wobbe para el gas inyectado al sistema nacional de transporte de gas deberá estar en el rango de 47,7 MJ/m³ a 52.,7 MJ/m³, en el poder calorífico superior a condiciones estándar. El productor-comercializador deberá inyectar el gas al Sistema Nacional de Transporte dentro del rango de número de Wobbe establecido.

Verificación de la calidad, mencionado anteriormente en Anexo A.

Cumplimiento de las especificaciones de CO₂, mencionado anteriormente en Anexo A.

Entrega de gas natural por fuera de las especificaciones establecidas, mencionado anteriormente en Anexo A.

Anexo C. Resolución 071:1999

RESOLUCIÓN NO. 071 (DICIEMBRE 03 DE 1999)

Por la cual se establece el Reglamento Único de Transporte de Gas Natural-(RUT).

En ejercicio de sus atribuciones legales, en especial las conferidas por las Leyes 142 de 1994 y 401 de 1997, los Decretos 1542 y 2253 de 1994 y 1175 de 1999 y, CONSIDERANDO

Que de acuerdo con lo establecido en el Artículo 14 de la Ley 142 de 1994, la actividad de transporte de gas natural es una actividad complementaria del servicio público domiciliario de gas natural;

Que según el Artículo 3 de la Ley 401 de 1997, es función de la CREG establecer las reglas y condiciones operativas que debe cumplir toda la infraestructura del Sistema Nacional de Transporte a través del Reglamento Único de Transporte de Gas Natural;

Que la CREG estableció en la Resolución CREG-057 de 1996, las bases para desarrollar un Código de Transporte;

Que según lo dispuesto en el Artículo 28 de la Ley 142 de 1994 la construcción y operación de redes para el transporte y distribución de gas se regirán exclusivamente por esta Ley y por las normas sanitarias y municipales a las que se alude en los Artículos 25 y 26 de la misma Ley;

Que de acuerdo con el Artículo 67 de la Ley 142 de 1994, es competencia de los Ministerios, señalar los requisitos técnicos que deben cumplir las obras, equipos y procedimientos que utilicen las Empresas de Servicio Público del sector, cuando la comisión respectiva haya resuelto por vía general que ese señalamiento es realmente necesario para garantizar la calidad del servicio, y que no implica restricción indebida de la competencia:

Que de acuerdo con el Artículo 73 de la Ley 142 de 1994, es función de las Comisiones fijar normas de calidad a las que deben ceñirse las Empresas de Servicios Públicos, y determinar para cada bien o servicio público unidades de medida y de tiempo que deben utilizarse al definir el consumo;

Que según lo dispuesto en el Artículo 73 de la Ley 142 de 1994, corresponde a las Comisiones regular los monopolios en la prestación de los servicios públicos,

cuando la competencia no sea, de hecho, posible; y, en los demás casos, la de promover la competencia entre quienes prestan servicios públicos, para que las operaciones de los monopolistas o de los competidores sean económicamente eficientes, no impliquen abuso de posición dominante, y produzcan servicios de calidad;

Que de acuerdo con lo establecido en el Artículo 74 de la Ley 142 de 1994, es función de la Comisión de Regulación de Energía y Gas regular el ejercicio de las actividades de los sectores de energía y gas combustible para asegurar la disponibilidad de una oferta energética eficiente, propiciar la competencia en el sector de minas y energía y proponer la adopción de las medidas necesarias para impedir abusos de posición dominante y buscar la liberación gradual de los mercados hacia la libre competencia;

Que mediante el Decreto 1175 de 1999, por el cual se reestructuró la Empresa Colombiana de Gas -ECOGAS-, se suprimió el Centro de Coordinación de Transporte de Gas Natural -CTG-, creado por la Ley 401 de 1997, se derogaron las normas pertinentes a dicho Centro, y se dispuso que el Consejo Nacional de Operación cumplirá las funciones de asesoría en la forma como lo establezca el Reglamento Único de Transporte;

Que de acuerdo con lo establecido en el Artículo 978 del Código de Comercio, cuando la prestación de un servicio público está regulada por el Gobierno, las condiciones de los contratos deberán sujetarse a los respectivos reglamentos;

Que el Consejo Nacional de Operación en su reunión No. 86 acordó solicitarle a la CREG revisar las causales de re despacho, en especial las relacionadas con accidentes en Sistemas de Transporte de gas. Dicho acuerdo se formalizó mediante comunicación del Secretario Técnico del CNO, dirigida a la CREG el 16 de Febrero de 1999;

Que de acuerdo con lo establecido en la Constitución Política, cuando de la aplicación de una norma expedida por motivo de utilidad pública o de interés social resultaren en conflicto los derechos de los particulares con la necesidad por ella reconocida, el interés privado deberá ceder al interés público o social;

Que la dinámica propia del Estado exige que la regulación se adecue permanentemente a los cambios sociales y tecnológicos con el objeto de cumplir los fines inherentes del Estado;

Que la CREG ha efectuado un amplio análisis con la Industria y terceros interesados sobre los objetivos y contenido del Reglamento Único de Transporte;

RESUELVE

ARTÍCULO 1. Adoptar el Reglamento Único de Transporte de Gas Natural –RUT– contenido en el Anexo General de la presente resolución.

ARTÍCULO 2. Mediante Resolución posterior la CREG definirá, entre otros aspectos, la regulación del servicio de Almacenamiento, el manejo de las restricciones de transporte y el tratamiento regulatorio del Empaquetamiento.

ARTÍCULO 3. Vigencia. La presente resolución rige a partir de la fecha de su publicación en el Diario Oficial y deroga las disposiciones que le sean contrarias.

OBJETIVOS Y ALCANCE DEL REGLAMENTO ÚNICO DE TRANSPORTE DE GAS NATURAL

Objetivos

Las personas que estén sometidas al presente Reglamento Único de Transporte de Gas Natural (RUT), al implantarlo, aplicarlo e interpretarlo, tendrán en cuenta que sus objetivos con relación al Sistema Nacional de Transporte son:

- Asegurar acceso abierto y sin discriminación
- Crear las condiciones e instrumentos para la operación eficiente, económica y confiable
- Facilitar el desarrollo de mercados de suministro y transporte de gas
- Estandarizar prácticas y terminología para la industria de gas
- Fijar normas y especificaciones de calidad del gas transportado

Alcance

El Reglamento Único de Transporte, que para todos los efectos se identificará como el RUT, se aplica a todos los Agentes que utilicen el Sistema Nacional de Transporte de Gas Natural.

Los propietarios de gasoductos dedicados no se consideran Transportadores, salvo en el caso en que un tercero solicite el servicio de transporte y este sea técnicamente factible. En tal caso, deberán cumplir lo establecido en el numeral 2.1.3. En todo caso, los propietarios de gasoductos dedicados deberán cumplir las normas técnicas y de seguridad que establezca la autoridad competente.

SEGUIMIENTO Y MODIFICACIÓN DEL RUT

Cuando lo considere conveniente el Consejo Nacional de Operación de Gas Natural revisará la experiencia en la aplicación de los aspectos operativos, y comerciales del RUT, y enviará a la Comisión un informe sobre el resultado de las revisiones, las propuestas de reforma, si las hubiere, y cualquier observación o sugerencia presentada por escrito por cualquiera de los Agentes, y que no haya sido incluida en las propuestas de reforma.

La Comisión examinará las propuestas y las demás observaciones e iniciativas y, en la medida en que las considere convenientes, o de oficio, modificará el RUT

después de haber oído al Consejo Nacional de Operación de Gas Natural sobre las modificaciones propuestas. La iniciativa para la reforma del Reglamento también será de la Comisión si esta estima que debe adecuarse a la evolución de la industria, que contraría las regulaciones generales sobre el servicio, que va en detrimento de mayor concurrencia entre oferentes y demandantes del suministro o del libre acceso y uso del servicio de transporte y otros servicios asociados.

A partir de la expedición del presente Reglamento, todos los Contratos de Transporte que se suscriban incluirá una cláusula de ajuste que permita acoger las modificaciones que se hagan al RUT, sus normas complementarias y en general las demás reglamentaciones que expida la Comisión.

CONSEJO NACIONAL DE OPERACIÓN DE GAS NATURAL

De conformidad con el artículo 2 del Decreto 1175 de 1999, en cumplimiento de las funciones de asesoría otorgadas por la Ley, el Consejo Nacional de Operación desarrollará las siguientes funciones:

- Proponer a la CREG modificaciones al RUT
- Recomendar a la CREG la adopción de protocolos unificados para la generación, envío, almacenamiento, captura y consulta de información
- Recomendar a la CREG la parte que corresponde de la matriz de compensaciones por Variaciones
- Proponer el Manual Guía del Transportador
- Dar concepto a la CREG sobre los conflictos derivados de la aplicación del RUT que se presenten entre los Agentes
- Proponer Acuerdos de Balance marco para los Agentes
- Proponer los horarios para las re nominaciones sincronizadas de suministro y transporte
- Establecer su propio reglamento
- Las demás que le señale la CREG en el RUT

El Consejo Nacional de Operación de Gas Natural estará conformado de acuerdo con lo estipulado por la Ley 401 de 1997.

Ámbito de aplicación y vigencia

Todo Agente que utilice el Sistema Nacional de Transporte se sujetará a lo establecido en el presente RUT. Tanto los acuerdos como los contratos firmados con anterioridad y posterioridad a la expedición del presente reglamento, deberán ajustarse a la reglamentación aquí establecida.

ACCESO Y PRESTACIÓN DE SERVICIOS DE TRANSPORTE

Acceso al Sistema Nacional de Transporte y sus servicios

Compromiso de acceso

Todo Transportador debe garantizar el acceso a los Sistemas de Transporte y a los servicios de transporte, de forma no discriminatoria y de acuerdo con lo establecido en el presente RUT.

Los Transportadores de Gas Natural por tubería permitirán el acceso a los gasoductos, de su propiedad o que se encuentren bajo su control, a cualquier Productor-comercializador; Distribuidor; Usuario No Regulado, Usuario Regulado (no localizado en áreas de servicio exclusivo) atendido a través de un Comercializador, Almacenador; y en general a cualquier Agente que lo solicite. Dicho acceso deberá ofrecerse a cualquier Agente en las mismas condiciones de calidad y seguridad establecidas en las disposiciones legales y reglamentarias aplicables a esta materia, así como en el RUT y demás reglamentos que expida la Comisión.

Imposición de acceso a los Sistemas de Transporte

Si transcurridos quince días a partir del recibo de la solicitud de acceso, el Transportador no ha respondido dicha solicitud o si transcurrido un mes a partir del recibo de la misma no se ha llegado a ningún acuerdo con quien o quienes han solicitado el acceso, a petición de cualquier interesado, la Comisión podrá imponer, por la vía administrativa, el acceso a quien tenga derecho al uso de la red, conforme a las disposiciones previstas en la Ley 142 de 1994 y demás normas concordantes.

Al adoptar la decisión de imponer el acceso del solicitante al Sistema de Transporte, la Comisión definirá, entre otros aspectos, lo siguiente:

- El beneficiario en cuyo favor se impone;
- La empresa Transportadora a la cual se impone el acceso;

En todo caso, al decidir si es necesario imponer el acceso, la Comisión examinará si la renuencia del Transportador implica una violación de los deberes legales relacionados con el acceso o interconexión, o una conducta contraria a la libre competencia; en tal caso solicitará a las entidades de control que adelanten las investigaciones respectivas. La imposición de acceso no excluye la aplicación de las sanciones que fueren procedentes, conforme a las disposiciones contenidas en la Ley 142 de 1994 y demás normas concordantes.

El solicitante puede renunciar al acceso impuesto por la Comisión, y éste dejará de ser obligatorio para el Transportador. La renuncia debe hacerse de buena fe, sin abusar del derecho, en forma tal que no perjudique indebidamente al Transportador. Si hay Contratos, las partes se sujetarán a ellos.

Acceso a gasoductos dedicados

En el evento de gasoductos dedicados a los que se solicite servicio de Transporte, y este sea técnicamente factible, su propietario tendrá la obligación de permitir el acceso. Mientras el propietario no haya decidido convertirse en Transportador, se requerirá autorización de la CREG, quien impondrá las condiciones para el acceso. En tal caso, el propietario del gasoducto dedicado tendrá las siguientes opciones:

- Convertirse en Transportador;

- Vender los activos a un Transportador;
- Continuar como operador del gasoducto

En todo caso, la CREG podrá exigir al propietario del gasoducto, que se convierta en Transportador cuando las condiciones de utilización del gasoducto lo requieran o lo aconsejen.

PRESTACIÓN DE SERVICIOS DE TRANSPORTE

El Transportador debe garantizar la prestación del Servicio de Transporte, de acuerdo con los indicadores de calidad del servicio establecidos por la CREG, salvo que la conexión del Agente no garantice condiciones de seguridad o que la modalidad de contratación corresponda a servicio interrumpible.

Desvíos

Los desvíos serán solicitados por el Remitente y autorizados por el Transportador, cuando haya suficiente capacidad del gasoducto en la nueva trayectoria desde el Punto de Entrada hasta el Punto de Salida.

Durante el Ciclo de Nominación de Transporte el Remitente podrá solicitar cambios en los Puntos de Entrada y Salida del servicio de transporte contratado. Dichos cambios deben ser autorizados por el Transportador o Transportadores involucrados en la operación, quienes sólo podrán negarla por razones de tipo técnico u operativo. En este caso deberán incluir la justificación de su respuesta.

Parágrafo: Cuando la trayectoria del desvío lo haga necesario el Transportador y el Remitente establecerán nuevos cargos para el servicio de transporte de conformidad con las opciones para determinación de cargos aprobadas por la CREG.

Servicio de almacenamiento

El Servicio de Almacenamiento, podrá ser prestado tanto por Transportadores como por terceros, sobre la base del principio de libre acceso y no discriminación.

El Servicio de Almacenamiento es un servicio independiente al de Transporte y diferente al Empaquetamiento, que puede ser prestado por el Transportador o un tercero, siempre y cuando esto no implique que el Transportador sea dueño del gas almacenado, excepto del necesario para el funcionamiento del Sistema de Almacenamiento y en general, del necesario para el manejo seguro del Sistema de Transporte. El Transportador no podrá almacenar gas para propósitos de comercialización. El gas para estos propósitos será propiedad del Remitente, quien se responsabilizará de entregar y/o tomar su gas cuando lo necesite. Al entregar y/o tomar gas de un Sistema de Almacenamiento, el Remitente deberá cumplir con los Ciclos de Nominación de transporte y/o suministro según sea el caso.

Boletín electrónico de operaciones - BEO-

Los Transportadores deberán implementar un sistema de información electrónico a través del Internet, de acceso libre en línea y de carácter permanente, con el objeto de poner a disposición de los diferentes Agentes, como mínimo la siguiente información:

- Manual del Transportador
- Ciclo de Nominación
- Volumen total transportado diariamente por gasoducto
- Ofertas de liberación de capacidad y de suministro de gas, incluyendo Puntos de Entrada y Salida
- Capacidad Disponible Primaria, incluyendo Puntos de Entrada y Salida
- Solicitudes del servicio, incluyendo volúmenes y Puntos de Entrada y Salida
- Capacidad contratada
- Cuentas de Balance

El BEO de cada CPC deberá permitir el acceso a la información desplegada por los BEO de otros CPC, conformando una red de información nacional. Con el objeto de asegurar la operatividad de este instrumento de información, el Consejo Nacional de Operación de Gas Natural, estandarizará en un plazo de tres meses contados a partir de su conformación, los protocolos de comunicación, los formatos de captura y en general los procedimientos de administración de la información. Si el Consejo Nacional de Operación de Gas lo considera conveniente y factible, podrá centralizarse e integrarse la información contenida en los BEO de los diferentes Transportadores en un Boletín Electrónico de Operaciones único a nivel nacional.

Para la implementación del Boletín Electrónico de Operaciones, los Transportadores dispondrán de un plazo de tres meses contados a partir de la fecha de estandarización de protocolos de comunicación por parte del Consejo Nacional de Operación de Gas.

Si el Consejo Nacional de Operación de Gas lo considera conveniente y factible, los Ciclos de Nominación de Suministro y Transporte podrán efectuarse vía fax o por cualquier otro medio idóneo para realizar estas operaciones.

MEDICIÓN Y FACTURACIÓN

Medición

Las mediciones volumétricas y la determinación de los mecanismos y procedimientos que permitan establecer la calidad del gas y su contenido energético deberán efectuarse en todos los Puntos de Entrada y Salida del Sistema Nacional de Transporte. Donde exista Tele medición, la medición de estos parámetros se efectuará en línea sobre una base horaria. Para aquellos puntos, que no cuenten con equipos de Tele medición, la determinación de volúmenes transportados, Variaciones y Desbalances de energía se realizará por

parte del CPC, de forma tal que permitan efectuar el cierre diario de la operación. Una vez se obtengan las mediciones correspondientes a los Puntos de Salida que no dispongan de Tele medición, se efectuarán los ajustes del caso mediante un proceso de reconciliación.

La medición o determinación, según sea el caso, de los parámetros establecidos en el presente Reglamento en los Puntos de Salida y en los Puntos de Entrada del Sistema Nacional de Transporte será realizada por el Transportador.

Medición y asignación de cantidades de energía en puntos de entrada y puntos de salida

Medición de Cantidades de Energía y Calidad del Gas en Puntos de Entrada

Para realizar la Medición de las Cantidades de Energía y la Calidad del Gas en Puntos de Entrada se dispondrán de cromatógrafos de registro continuo cuya propiedad, así como su operación y mantenimiento serán responsabilidad del Productor-Comercializador correspondiente. La responsabilidad de la Medición de Cantidades de Energía será del Transportador.

Asignación de Cantidades de Energía en Puntos de Entrada

Cuando exista más de una Nominación de Transporte de gas a partir del mismo Punto de Entrada, el Productor-Comercializador asignará las Cantidades de Energía entregadas en dicho punto entre cada uno de los Remitentes. Dicha asignación podrá realizarse con base en una metodología establecida previamente entre los Agentes, o a prorrata entre las nominaciones Confirmadas.

Determinación de Cantidades de Energía y Calidad del Gas en Puntos de Salida

La Determinación de las Cantidades de Energía y la Calidad del Gas en Puntos de Salida se establecerá de acuerdo con las especificaciones, periodicidad y metodología de monitoreo que acuerden mutuamente el Transportador y el Remitente. El costo de los equipos de monitoreo, en los casos en que se requiera será cubierto por los Remitentes. La responsabilidad de la Medición de Cantidades de Energía será del Transportador.

Medición volumétrica

El volumen de Gas Natural entregado y tomado del Sistema de Transporte es el calculado por el Transportador a Condiciones Estándar a partir de las variables determinadas por los equipos oficiales de medición, debidamente calibrados, empleando los métodos de cálculo establecidos por el fabricante en los manuales específicos para cada tipo de medidor y las recomendaciones de la Asociación Americana de Gas – AGA (“*American Gas Association*”).

Sistema de Medición

Un sistema de medición consistirá de un elemento primario, elementos secundarios y otros elementos:

- Elemento Primario: Será de carácter obligatorio y empleará los medidores homologados por el Ministerio de Desarrollo Económico - Superintendencia de Industria y Comercio - de conformidad con el Decreto 2269 de 1993 o las normas que lo modifiquen o sustituyan, o en su defecto, se emplearán las recomendaciones de la Asociación Americana de Gas "American Gas Association," (AGA), última edición
- Elementos Secundarios: Será de carácter opcional si lo requiere por cualquiera de las partes. Cuando se trate de manejo de volúmenes iguales o superiores a 100.000 PCD, o su equivalente en m³, podrán utilizarse elementos electrónicos, con capacidad de computar el volumen que fluye por el medidor, almacenar la información de las variables de flujo y transmitir las
- Otros elementos: Transductores de presión y temperatura, celdas diferenciales, manómetros, termómetros, entre otros, necesarios para determinar la medición de gas

Propiedad del Sistema de Medición

La propiedad de un Sistema de Medición será del Productor-Comercializador o del Remitente, según se trate de Puntos de Entrada o Puntos de Salida, respectivamente. Los costos de las instalaciones, equipos de medición, control remoto y telemetría del flujo de gas, y equipos para la toma de muestras para analizar la calidad del gas, como parte de los Sistemas de Medición, estarán a cargo del propietario de éste.

Los Agentes podrán adquirir los Sistemas de Medición al Transportador o a terceros; en todos los casos los equipos cumplirán con lo previsto en las Normas Técnicas Colombianas o las homologadas por la autoridad competente.

El Transportador podrá rechazar los equipos propuestos por los Agentes cuando en forma justificada no cumplan con lo anterior, o cuando puedan afectar la operación de su Sistema de Transporte. Cuando el Transportador adquiera los Sistemas de Medición para Puntos de Salida, trasladará su valor al Agente correspondiente.

Instalación, Operación y Mantenimiento de los Sistemas de Medición

La instalación, Operación y el Mantenimiento de los Sistemas de Medición corresponde al propietario de dichos equipos, a menos que el Remitente y el Transportador acuerden lo contrario. En cualquier caso el Transportador inspeccionará la instalación del equipo de medición para asegurar que cumple con los requisitos técnicos establecidos. Cuando la instalación del Sistema de Medición no cumpla con dichos requisitos, deberá rechazarse por parte del Transportador o del Agente según sea el caso. Cuando el Transportador efectúe la instalación, operación y el mantenimiento del equipo de medición, trasladará dichos costos al Agente, previo acuerdo con éste.

Reparación y Reposición del Sistema de Medición

Es obligación del Agente hacer reparar o reemplazar los Sistemas de Medición de su propiedad, a satisfacción del Transportador, dentro de los estándares técnicos, cuando se establezca que el funcionamiento no permite determinar en forma adecuada los consumos. Cuando el Agente, pasados dos períodos de facturación, no tome las acciones necesarias para reparar o reemplazar los equipos de su propiedad, el Transportador podrá hacerlo por cuenta del Agente. Cuando sea de su propiedad, el Sistema de Medición podrá ser retirado por el Transportador en cualquier momento después de la terminación del Contrato de Transporte, sin cargo al Agente propietario.

Equipo de Verificación de Medición

Los Agentes podrán contar con doble Medición para entregas y tomas de gas, es decir un equipo principal y un equipo de verificación. El equipo de verificación de la Medición tiene las siguientes finalidades:

- Ser utilizado por el Transportador para determinar la facturación cuando el medidor oficial presente des calibración o daño
- Ser utilizado por el Agente para monitorear o evaluar su propio consumo para efectos contables o de control

Los costos de suministro, instalación, mantenimiento y operación del equipo de verificación, serán cubiertos por el Agente que requiera el equipo de verificación.

Medición de otras variables

Será responsabilidad del Transportador determinar la calidad, la gravedad específica y variable como el poder calorífico, entre otras, del Gas Natural que entra y sale a un Sistema de Transporte. En aquellos casos en los cuales se conecten dos o más Sistemas de Transporte, el Sistema de Medición será acordado entre los Transportadores involucrados.

Determinación de la Temperatura de Flujo

La temperatura de flujo será determinada por el Transportador mediante equipos de registro continuo. En su defecto, el Transportador la determinará utilizando el siguiente orden de prioridad:

- La mejor información de campo disponible
- Cálculo matemático basado en los principios básicos de fluidometría
- De estar disponible, cálculo mediante software

Determinación de la Presión de Flujo

La presión de flujo (estática y diferencial) será determinada utilizando transductores de registro continuo con capacidad de suministro de información electrónica, la cual será manejada por el computador de flujo. En su defecto se determinará a partir de la mejor información de campo, con la siguiente prioridad:

- Transductores electrónicos ubicados en la misma corriente de flujo de gas
- Transductores mecánicos o manómetros ubicados en la misma corriente de flujo de gas

- Cualquier otro procedimiento acordado entre las partes

Determinación de la Supercompresibilidad del Gas

La supercompresibilidad del gas será determinada por el Transportador utilizando la metodología establecida por la Asociación Americana de Gas – AGA (“*American Gas Association*”), en el Manual para la Determinación de Factores de Supercompresibilidad para el Gas Natural (“*Manual for the Determination of Supercompressibility Factors for Natural Gas*”), última edición.

Determinación de la Gravedad Específica del Gas

La gravedad específica en los Puntos de Entrada será determinada por el Transportador empleando gravitómetros de registro continuo o cromatógrafos instalados en línea. En Puntos de Salida, la Gravedad Específica podrá determinarse por el método que acuerden las partes o mediante la toma de muestras representativas de la corriente de gas para ser sometidas a cromatografía gaseosa. En los puntos donde confluyan varios gases, el Transportador deberá instalar, a su cargo, cromatógrafos en línea para medir mezclas de gases.

Determinación del Poder Calorífico

El poder calorífico del gas entregado en los Puntos de Entrada del Sistema Nacional de Transporte será establecido por el Transportador mediante mediciones de composición de gas a través de cromatógrafos de registro continuo. Los mencionados equipos tendrán la capacidad de calcular el poder calorífico utilizando el método recomendado por la American Gas Association (AGA), en normas tales como la ASTM D3588-81 “*Standard Method for Calculating Calorific Value and Specific Gravity (relative density) of Gaseous Fuels*”, última versión. El poder calorífico del gas tomado en los Puntos de Salida será determinado según la metodología y con los instrumentos que acuerden las partes.

Equivalencia Energética del Gas Natural

Con base en las mediciones volumétricas y demás parámetros establecidos en los Numerales anteriores, el Transportador determinará diariamente la equivalencia energética del volumen de gas transportado. Dicha información será la base para establecer la liquidación de Variaciones y Desbalances de energía y contratos de suministro de gas.

Los procedimientos de medición establecidos en los Contratos tendrán en cuenta como mínimo el tipo de medición, la frecuencia y los períodos de aplicación de los valores obtenidos.

Precisión, acceso y calibración de equipos de medición

Márgenes de Error en la Medición

Una medición está dentro de los márgenes de error admisibles, cuando al efectuarse la verificación de la calibración del equipo de medición oficial (Transductores de presión estática y temperatura, celda de diferencial, etc.) por parte del Transportador, se encuentra dentro de los siguientes límites:

- El porcentaje de variación de cualquier equipo de medición de las variables del proceso de flujo de gas (presión estática y temperatura, celda diferencial, etc.) está dentro del margen de error de más o menos el uno por ciento (1%)
- El porcentaje de variación de cualquier equipo de medición para determinar la gravedad específica y el poder calorífico bruto, está dentro del margen de error de más o menos el uno por ciento

Una medición es inexacta si cualquiera de los porcentajes de variación de cualquier equipo de medición está por fuera de los anteriores márgenes de error. Cuando la Medición sea inexacta, los equipos de medición serán calibrados a una precisión dentro de los márgenes de error establecidos.

Si el error combinado de los diferentes equipos involucrados en la Medición, afecta el volumen total medido, con una desviación superior a más o menos uno por ciento, o si por cualquier motivo los medidores presentan fallas en su funcionamiento de modo que el parámetro respectivo no pueda medirse o computarse de los registros respectivos, durante el período que dichos medidores estuvieron fuera de servicio o en falla, el parámetro se determinará con base en la mejor información disponible y haciendo uso del primero de los siguientes métodos que sea factible (o de una combinación de ellos), en su orden:

- Los registros del segundo medidor o medidor de verificación siempre que cumpla con los requisitos indicados en el literal a) del presente Numeral. Si existe inexactitud en los medidores, se empleará lo previsto en el Numeral 3 siguiente
- Corrección del error, si el porcentaje de inexactitud se puede averiguar mediante calibración o cálculo matemático, si ambas partes manifiestan acuerdo
- Cualquier otro método acordado por las partes

Fraudes a la Conexión o al Equipo de Medición

En caso de que se verifique que un Agente ha cometido fraude a las conexiones o equipos de medición, la parte afectada podrá suspender el servicio y aplicar las sanciones previstas dentro del Contrato. Adicionalmente, la parte infractora deberá cancelar el consumo no medido de acuerdo con el procedimiento establecido en el Numeral 5.5.1 del presente Reglamento. La reincidencia en el fraude dará lugar a la terminación del Contrato. Dicha actuación deberá adelantarse con la plena garantía del derecho de defensa del Agente.

Calibración de Equipos de Medición

Primera calibración

La primera calibración de los equipos de medición del gas instalado en cada uno de los Puntos de Entrada o Salida del Sistema de Transporte, será realizada por el Transportador o por una firma certificada por las autoridades competentes. Los costos de eficiencia en que éste incurra serán a cargo del propietario.

Verificación de la calibración

La exactitud de todos los Sistemas de Medición del Sistema de Transporte será verificada por el Transportador a intervalos pactados contractualmente entre las partes, en presencia de los representantes del Agente. La verificación de la calibración de los medidores la realizará el Transportador in situ, o en sus propios laboratorios, o podrá contratarla con firmas debidamente autorizadas, y su costo de eficiencia será asumido por el propietario de los equipos de medición. Para la realización de dichas calibraciones se aplicarán las Normas Técnicas correspondientes aprobadas por el Ministerio de Desarrollo o por la autoridad competente.

Será derecho del Agente y del Transportador solicitar en cualquier momento una verificación especial del medidor, en cuyo caso las partes cooperarán para llevar a cabo dicha operación. El costo de esta prueba especial será a cargo de quien la solicite a menos que como resultado de dicha prueba se detecte una des calibración, en cuyo caso dichos costos correrán a cargo del propietario del equipo.

El Transportador dará aviso al Agente sobre la fecha y hora en que se efectuará la prueba de verificación de calibración o de inspección de los equipos, por lo menos con tres días hábiles de anticipación a fin de que la otra parte pueda disponer la presencia de sus representantes. Si dado el aviso requerido el Agente no se presenta, el Transportador podrá proceder a realizar la prueba y a hacer los ajustes necesarios informando sobre las medidas correctivas tomadas al Agente. El Agente podrá solicitar aclaración o información adicional sobre las pruebas o ajustes realizados.

Acceso a los Sistemas de Medición

Las partes tendrán acceso permanente a los Sistemas de Medición para tomar lecturas, verificar calibración, mantener e inspeccionar las instalaciones, o para el retiro de sus bienes.

El Transportador y el Remitente o sus representantes tendrán el derecho de estar presentes en los momentos de instalación, lectura, limpieza, cambio, mantenimiento, reparación, inspección, prueba, calibración o ajuste de los equipos de medición utilizados para la facturación. Los registros de tales equipos se mantendrán a disposición de las partes junto con los cálculos respectivos para su inspección y verificación.

Registros de Medición

El Transportador y el Remitente conservarán los originales de todo dato de pruebas, gráficos, archivos magnéticos o cualquier otro registro de Medición similar por el lapso que fuere exigido por el Código de Comercio para la

conservación de documentos, contado a partir de la fecha de realización de medición.

Control de Entregas y Recepciones

Los Transportadores pondrán a disposición de los Remitentes, durante los cinco primeros días de cada mes, la información relacionada con volumen, poder calorífico, presión y temperatura medidas. También el Transportador deberá notificar a los Remitentes sobre cualquier cambio que ocurra en el sistema indicando los motivos que justificaron dicho cambio. A solicitud de cualquier Remitente, el Transportador le informará otros parámetros relacionados con sus Puntos de Entrada y Salida.

ESTÁNDARES Y NORMAS TÉCNICAS APLICABLES

Los estándares, normas técnicas y de seguridad que deberán aplicar para el diseño, construcción, operación, mantenimiento y puesta en marcha del Sistema Nacional de Transporte, tomarán en consideración la compilación del Código de Normas Técnicas y de seguridad efectuada por el Ministerio de Minas y Energía.

Cumplimiento de normas y estándares

El Sistema de Transporte y las conexiones existentes o futuras deben cumplir con los requisitos establecidos por las normas técnicas colombianas, expedidas por el ICONTEC o, en su defecto, las aceptadas por la Superintendencia de Industria y Comercio o el Ministerio de Minas y Energía, el cual las compilará en un Reglamento de Normas Técnicas y de Seguridad en Gas Combustible. En caso de no disponerse de normas fijadas por estas entidades, se adoptarán las normas aplicables emitidas por una de las siguientes agremiaciones:

- AGA: American Gas Association
- ANSI: American National Standards Institute
- API: American Petroleum Institute
- ASME: American Society of Mechanical Engineers
- ASTM: American Society for Testing and Materials
- AWS: American Welding Society
- DOT: Department of Transportation
- IEC: International Electrothechnical Comission
- NACE: National Association of Corrosion Engineers
- NEMA: National Electrical Manufacturing Association
- NFPA: National Fire Protection Association
- UL: Underwrite Laboratories Inc.

En materia de seguridad también deberá acogerse el Reglamento de Normas Técnicas y de Seguridad en Gas Combustible compilado por el Ministerio de Minas y Energía y a toda la reglamentación que sobre la materia expida el Ministerio de Minas y Energía.

Las normas ambientales a las que deberán acogerse todos aquellos a los cuales aplique este Reglamento, serán aquellas expedidas por el Ministerio del Medio Ambiente, de conformidad con lo dispuesto en el Artículo 4º Numerales 10 y 25 de la Ley 99 de 1994 y demás que la modifiquen, deroguen o adicionen; o aquellas que establezcan otras autoridades ambientales competentes.

El Transportador estará obligado a comunicar al propietario de la Conexión, las normas específicas que deberán cumplirse y se abstendrá de prestar el Servicio de Transporte a través de las Conexiones, en los Puntos de Entrada o en los Puntos de Salida de su Sistema de Transporte, que no cumplan con los requisitos técnicos y de seguridad establecidos por las normas y estándares aplicables.

Resolución de conflictos sobre normas técnicas

Las discrepancias entre normas internacionales aplicables deberán ser resueltas por el Ministerio de Minas y Energía, así como las que se presenten entre el Transportador y el propietario de la Conexión.

Calidad del gas, mencionado anteriormente en Anexo A.

Expedición de normas técnicas y de seguridad

Con el objeto de garantizar la calidad y seguridad del servicio de transporte, de conformidad con lo establecido en el Art. 67.1 de la Ley 142 de 1994, el Ministerio de Minas y Energía señalará los requisitos técnicos que deben cumplir las obras, equipos y procedimientos que utilicen las empresas de transporte.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

a = Coeficiente específico para cada hidrocarburo para cálculo de Delbourg, a

A = Contenido de gas en porcentaje (metano y C_nH_m)

A' = Volumen de aire requerido para quemador un volumen de gas

A_a = Pies cúbicos de aire teóricamente requeridos para la combustión completa por 100 BTU de gas de ajuste

A_a' = Volumen de aire (expresados pies cúbicos) requerido para la combustión completa de un pie cúbico de gas de ajuste

A_s = Pies cúbicos de aire teóricamente requeridos para la combustión completa por 100 BTU de gas de reemplazo

A_s' = Volumen de aire (expresados pies cúbicos) requerido para la combustión completa de un pie cúbico de gas de reemplazo

b = Coeficiente específico para cada hidrocarburo para cálculo de Delbourg, b

B_a = Relación de aire requerido teóricamente para la combustión en ft^3 de aire por ft^3 de gas de ajuste

B_s = Relación de aire requerido teóricamente para la combustión en ft^3 de aire por ft^3 de gas de reemplazo

c = Índice de cambio de desempeño del equipo

C = Potencial de combustión

C_k = Índice de Holmqvist

C_{Knoy} = Constante de intercambiabilidad de Knoy

ρ_{gas} = Densidad del gas

ρ_{aire} = Densidad de referencia (aire)

E_a = Contenido calórico de los productos de combustión desde 60°F hasta 1600°F en el gas de ajuste

E_s = Contenido calórico de los productos de combustión desde 60°F hasta 1600°F en el gas de reemplazo

F = Constante de intercambiabilidad de Willien

F' = Constante de desprendimiento

f_a = Sumatoria de los productos de la fracción másica y una constante resolviendo cada constituyente del combustible sobre la base de hidrógeno libre equivalente del gas de ajuste

f'_a = Factor de aire primario de gas de ajuste

f_s = Sumatoria de los productos de la fracción másica y una constante resolviendo cada constituyente del combustible sobre la base de hidrógeno libre equivalente del gas de reemplazo

f'_s = Factor de aire primario de gas de reemplazo

g = gravedad

gcv = Poder calorífico superior a condición seca a 0°C y 1 atm.

G_r = Densidad relativa del gas

G_{r_a} = Densidad relativa del gas de ajuste

G_{r_s} = Densidad relativa del gas de reemplazo

I_F = Índice de intercambiabilidad asociado a retroceso de llama

I_i = Índice de hollín

I_j = Índice de puntas amarillas

I_L = Índice de intercambiabilidad asociado a desprendimiento de llama

I_Y = Índice de intercambiabilidad asociado a puntas amarillas

IWS = Índice de Wobbe superior

IWM = Índice de Wobbe modificado

j = Coeficiente específico para cada hidrocarburo para cálculo de Delbourg, j

J_A = Índice de aireación primaria

J_F = Índice de retroceso de llama

J_H = Índice de entrada de calor

J_I = Índice de combustión incompleta

J_L = Índice de desprendimiento de llama

J_Y = Índice de puntas amarillas

K_1 = Función de la proporción de hidrocarburos en el poder calorífico superior (sin incluir metano)

K_2 = Expresión dada en índice de Wobbe modificado

K_a = Constante de límite de desprendimiento de gas de ajuste

K_i = Factor de corrección según la concentración de gases inertes

K_s = Constante de límite de desprendimiento de gas de reemplazo

m = masa de la sustancia

n = número de moles

N_a = Número de átomos de carbono liberados fácilmente por cada cien moléculas de gas de ajuste

N_s = Número de átomos de carbono liberados fácilmente por cada cien moléculas de gas de reemplazo

O_2 = Contenido de oxígeno en el gas en porcentaje

O_{2a} = Oxígeno contenido por pie cúbico de gas de ajuste

O_{2s} = Oxígeno contenido por pie cúbico de gas de reemplazo

γ = Peso específico

P = Presión

PC = Poder calorífico del gas

PC_a = Poder calorífico del gas de ajuste

PCI = Poder calorífico inferior del gas

PCS = Poder calorífico superior del gas

PCS_s = Poder calorífico superior de gas de reemplazo

PC_s = Poder calorífico del gas de reemplazo

Q' = Fracción volumétrica de la cantidad de oxígeno en el combustible

Q_a = Porcentaje de contenido de oxígeno en el gas de ajuste

$Q_{energía}$ = Flujo de gas en término de entrada de energía al quemador

Q_s = Porcentaje de contenido de oxígeno en el gas de reemplazo

Q_v = Caudal volumétrico del gas

R = Constante de los gases

R'_a = Relación entre el número de átomos de hidrógeno en todas las formas de combinación presentes en el gas combustible con y el número de átomos de carbono en los hidrocarburos del gas de ajuste

R'_s = Relación entre el número de átomos de hidrógeno en todas las formas de combinación presentes en el gas combustible con y el número de átomos de carbono en los hidrocarburos del gas de reemplazo

S = Máxima velocidad de deflagración de la mezcla de gas-aire

S_a = Máxima velocidad de propagación de la llama en una mezcla gas-aire, expresada como una fracción de la velocidad de la llama para el hidrógeno en gas de ajuste

S_c = Constante de intercambiabilidad de Schuster

S_s = Máxima velocidad de propagación de la llama en una mezcla gas-aire, expresada como una fracción de la velocidad de la llama para el hidrógeno en gas de reemplazo

S_u = Velocidad de llama o producción de calor

T = Temperatura absoluta

T' = Constante de puntas amarillas

T_{gas} = Temperatura del combustible antes de la combustión

u = Factor de corrección empírico para el potencial de combustión que representa cambios en la velocidad de llama, relacionados con variaciones en la concentración de oxígeno y la contribución térmica de los hidrocarburos pesados

v = Volumen específico

v' = Coeficiente de corrección que depende del valor del índice de Wobbe modificado

V = Volumen

v_{ideal} = Volumen específico de gas ideal

v_{real} = Volumen específico de gas real

W_H = Índice de Wobbe para gases naturales de grupo H

W_L = Índice de Wobbe para gases naturales de grupo L

X_i = Concentración volumétrica del componente i

X_{ki} = Medición para el componente i en el quemador de prueba

Y_a = Límite de puntas amarillas (porcentaje de aire primario) de gas de ajuste

Y_s = Límite de puntas amarillas (porcentaje de aire primario) de gas de reemplazo

Z = Factor de compresibilidad del gas

Z' = Fracción volumétrica de gases inertes (principalmente dióxido de carbono, nitrógeno)