

La ciencia no es sino una perversión de si misma, a menos que tenga como objetivo final, el mejoramiento de la humanidad. Nicola Tesla, Inventor Austrohúngaro.

La actividad científica está orientada a satisfacer la curiosidad, y a resolver las dudas, acerca de cuáles son y cómo están organizadas las leyes de la naturaleza.

Seguros de que la comunidad científica nacional e internacional, utilizará la Revista MET&FLU como un medio para compartir los hallazgos de alta relevancia, cada semestre nuestros lectores encontrarán un tema de su agrado que facilitará la transferencia del conocimiento al ritmo que nuestra sociedad, nos lo exige.

Fundamentos de la INTERCAMBIABILIDAD del Gas Natural

Juan Manuel Ortíz (juan.ortiz@polygon.com.co)

Polygon Energy
Bucaramanga - Santander - Colombia



Resumen:

En el presente artículo se presentan de manera breve los fundamentos de la intercambiabilidad de gas natural. Además de mencionar los problemas más comunes se analizan en detalle tres metodologías diferentes para la evaluación de la intercambiabilidad como son: el índice de Wobbe (metodología de índice simple), los índices de Weaver (metodología de índices múltiples) y el método de Dutton (metodología gráfica).

Se han incorporado a su vez elementos dentro del contexto del gas en Colombia para comprender mejor la relevancia de este tema a nivel nacional. Finalmente se explora el marco regulatorio colombiano, el cual es escaso, para por último cerrar con las respectivas conclusiones del artículo.

1. INTRODUCCIÓN

El gas natural es un término genérico, se suele denominar “gas natural” a cualquier mezcla compleja de hidrocarburos en fase gaseosa, compuesta de forma predominante por el metano (CH₄).

Por tratarse de una mezcla de varios componentes (incluidos inertes y contaminantes) que es extraída de diferentes fuentes, procesada en plantas de variadas tecnologías y desempeños, y transportada de diversas maneras, el gas natural puede variar su composición y por ende sus propiedades físico-químicas. Debido a que el principal uso del gas natural es como combustible, la variación en las propiedades del gas, representa un enorme reto desde el punto de vista de poder asegurar su combustión segura y eficiente.

Todos los equipos de combustión a gas están diseñados para operar con un intervalo particular de especificaciones de gas. Si las propiedades del gas se salen de dicho intervalo esto puede representar problemas de combustión incompleta, daños en los equipos y una operación riesgosa, entre otros.

Es así como en la industria del gas surgió la necesidad de desarrollar el concepto de “intercambiabilidad”. En términos generales, la intercambiabilidad es la 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.

En el sector del gas en Colombia es común que técnicos e ingenieros solamente contemplen el poder calorífico como el parámetro determinante o exclusivo en materia de sustitución de combustibles gaseosos en equipos de combustión. Sin embargo, en el presente artículo se pretende ilustrar que no necesariamente el poder calorífico es el único aspecto a considerar para evaluar la intercambiabilidad, y que se requiere contemplar aspectos técnicos y de calidad de gas adicionales para una evaluación rigurosa de la intercambiabilidad.

Paradójicamente, las bases de la intercambiabilidad de gases fueron desarrolladas hace casi 90 años, alrededor de 1927, por el ingeniero de gas e inventor Goffredo Wobbe, quien llegó a ocupar el cargo de director de la Oficina de Gas de Bolonia en Italia. Los estudios de Wobbe le permitieron desarrollar una nueva propuesta para la definición de la calidad del gas natural sobre una nueva base, apoyándose en un parámetro que se denominó “índice de Wobbe”.

No obstante, con el avance de la ciencia y la tecnología se han estudiado mejor los fenómenos del flujo de gas, así como su combustión, generándose propuestas complementarias o alternativas para evaluar la intercambiabilidad de los gases combustibles. Debido a la diversidad de metodologías (simples, múltiples y gráficas) para evaluación de la intercambiabilidad, en este artículo nos referiremos al índice de Wobbe como ejemplo de índice simple, a los índices de Weaver como representantes de los índices múltiples y al diagrama de Dutton en lo que respecta a los métodos gráficos.

2. MARCO DE REFERENCIA NACIONAL

Las principales fuentes de gas natural en Colombia (Guajira y Llanos) poseen grandes diferencias en cuanto a sus especificaciones, principalmente derivadas de las características de los fluidos en los yacimientos y del tipo de procesos para tratar el gas. El gas de la Guajira, obtenido a partir de un yacimiento de gas libre, es un gas pobre con un contenido de metano del orden de 98% al cual solamente se le realiza un proceso de deshidratación para remover el vapor de agua; por su parte, el gas de los Llanos (Cusiana y Cupiagua), proveniente de yacimientos de gas asociado, es un gas rico con un importante contenido de etano, propano, butanos y CO₂ al cual se le realiza, además del proceso de deshidratación, procesos para remoción de hidrocarburos pesados y endulzamiento (captura de CO₂ y H₂S).

Como resultado de las diversas características de los fluidos de yacimiento y de los procesos para la adecuación de su calidad se derivan propiedades variadas de los gases, como se puede apreciar en la Tabla 1.

Parámetro	Guajira	Cusiana - Cupiagua -
Densidad relativa	0,5644	0,6797
Poder calorífico superior	37,138 MJ/m ³ 996,8 Btu(IT)/ft ³	42,673 MJ/m ³ 1145,3 Btu(IT)/ft ³
Poder calorífico inferior	33,443 MJ/m ³ 897,6 Btu(IT)/ft ³	38,620 MJ/m ³ 1036,5 Btu(IT)/ft ³
Índice de Wobbe	49,436 MJ/m ³ 1326,8 Btu(IT)/ft ³	51,76 MJ/m ³ 1389,2 Btu(IT)/ft ³
Contenido de CO ₂	0,0501% molar	1,8184% molar
Contenido de N ₂	1,5576% molar	0,7429% molar
Temperatura de punto de rocío de hidrocarburos	7,2°C 45°F	- 6,7°C 20°F

Nota: Todas las propiedades con base volumétrica están expresadas a unas condiciones de referencia de 14,65 psia y 60 °F.

Tabla 1. Propiedades estimadas para los principales gases producidos, transportados y consumidos en Colombia.

Actualmente, en Colombia, los gases de la Tabla 1 representan los extremos opuestos en cuanto a sus características, y corresponden a los mayores volúmenes producidos, procesados, transportados y consumidos a nivel nacional. A pesar de sus propiedades significativamente diferentes, hasta el momento la combustión de estos gases (y sus mezclas) se ha desarrollado exitosamente a diferentes altitudes y latitudes cubriendo todo el territorio nacional servido por la red nacional de transporte de gas.

No obstante, en Colombia hasta hace muy poco se ha dado inicio a los proyectos de consolidación de infraestructura que permita la importa-

ción de gas natural licuado (GNL). Una vez materializados estos importantes proyectos, será posible en el corto plazo importar gas en estado líquido al mejor postor, para que luego de ser transportado en buques tanqueros hasta las costas colombianas, sea devuelto a su estado gaseoso y posteriormente transportado a los centros de consumo apoyándose en las mismas redes de transporte y distribución existentes en la actualidad.

En la Figura 1 se puede apreciar una proyección del mercado del GNL al año 2020, aunque Colombia no figura todavía, seguramente debido a que los proyectos de GNL se encuentran aún en sus fases tempranas, lo que si se observa es que el mercado será muy intrincado y diversificado. Si se incluye a Colombia dentro del mapa como un punto de importación y se considera su ubicación estratégica (2 océanos) y la vecindad al canal de Panamá, es claro que dependiendo de la oferta estará en capacidad de acceder tanto a los mercados del Atlántico como los del Pacífico.

Si bien una oferta diversificada trae el beneficio de acceder a mejores precios del gas como consecuencia de la libre competencia entre exportadores, también representa retos técnicos importantes pues la calidad de los gases tendrá una variabilidad mayor en el tiempo, exigiendo un mayor control por parte de Productores, Transportadores y Distribuidores, así como del sector

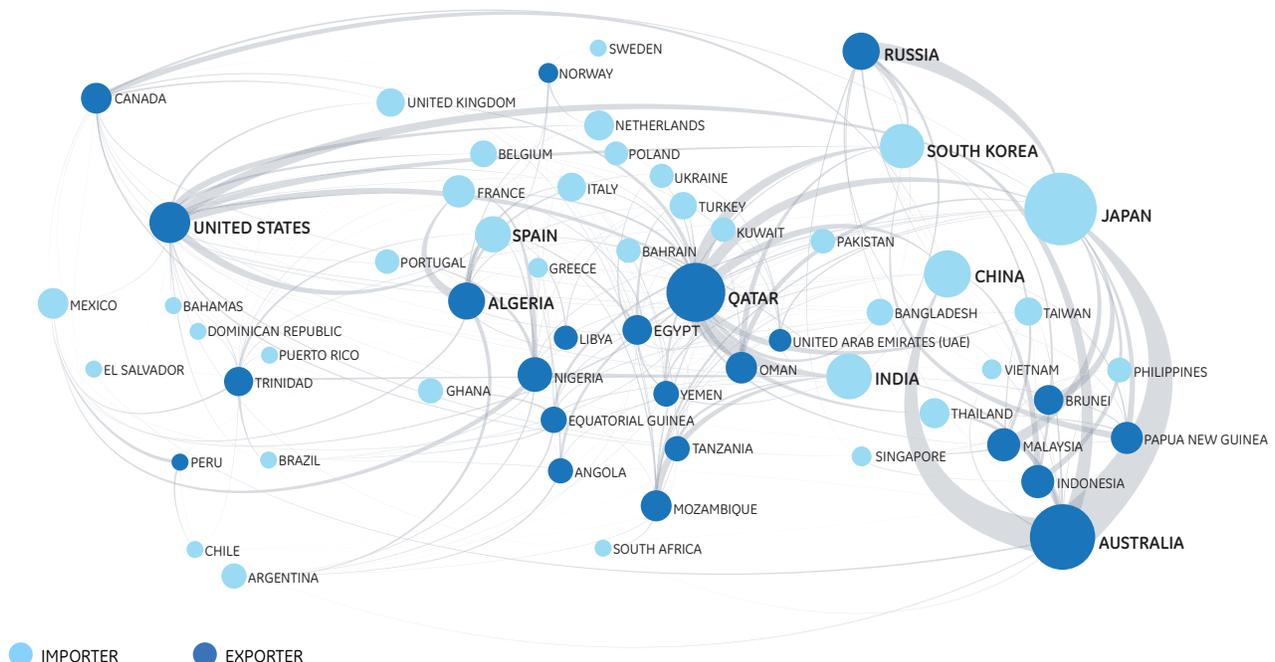


Figura 1. Proyección de la red de GNL a 2020 (Fuente: [1])

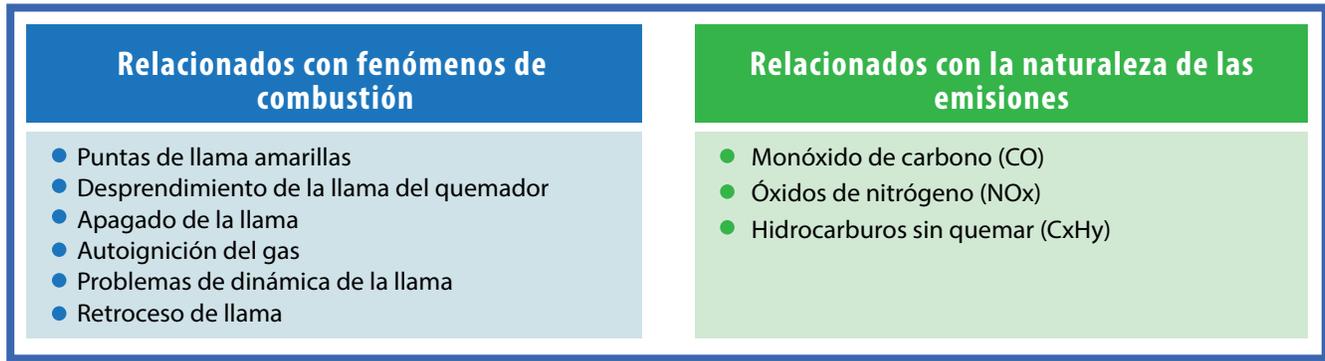


Figura 2. Problemas de intercambiabilidad

de generación eléctrico, clientes industriales y estaciones de GNV. Estos aspectos no pueden descuidarse pues involucran condiciones de seguridad que impactan directamente sobre los usuarios finales y que por ende son altamente críticos.

3. PROBLEMAS DE INTERCAMBIABILIDAD

Los problemas con la intercambiabilidad se van a traducir en fenómenos de combustión que van a afectar el desempeño de los equipos de combustión y las emisiones que se generan como producto de la combustión.

En cualquier caso, lo que se desea es que los equipos operen siempre dentro del intervalo óptimo para el cual fueron diseñados y ensayados. Los principales inconvenientes derivados de los problemas de intercambiabilidad se presentan en la Figura 2.

Cuando existen inconvenientes de intercambiabilidad se generan simultáneamente varios de los problemas citados en la Figura 2. No obstante, los problemas que se presenten no solo van a depender del gas sino también de la tecnología del equipo de combustión. Entre los equipos sensibles de sufrir problemas de desempeño, eficiencia e inconvenientes de seguridad, como consecuencia de problemas de intercambiabilidad, están: los gasodomésticos (estufas, calentadores, secadoras, chimeneas, calefactores, etc.), calderas, hornos, intercambiadores de calor de llama directa e indirecta, motores reciprocantes (P. Ej. GNV y plantas) y turbinas de combustión empleadas en generación térmica (Ver Figura 3).

4. ÍNDICE DE WOBBE

A pesar de haber sido desarrollado en 1927, el índice de Wobbe es el parámetro simple de mayor importancia en la intercambiabilidad de gases.

Este parámetro sigue siendo vigente en la actualidad, y seguirá siéndolo pues fue conceptualizado a partir de los fundamentos básicos de operación de los quemadores. El índice de Wobbe



Figura 3. Falla de turbina a gas debido a retroceso de llama (Fuente: [2])

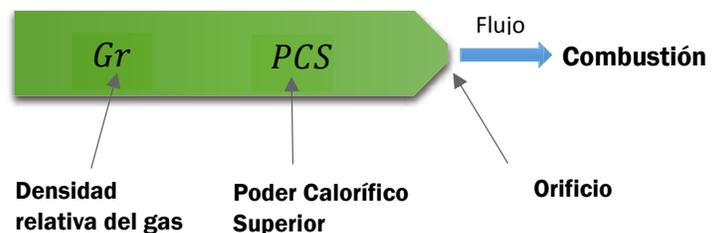


Figura 4. Fundamentación del índice de Wobbe (Fuente: [3])

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 (Ver Figura 4).

El flujo de gas en términos de la entrada de energía al quemador ($Q_{energía}$) es equivalente al producto entre el poder calorífico superior del gas (PCS) y el caudal volumétrico (Q_v).

$$Q_{energía} = PCS \times Q_v$$

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

$$Q_v \propto \frac{1}{\sqrt{Gr}}$$

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

$$Q_{energía} \propto \frac{PCS}{\sqrt{Gr}} = \text{Índice de Wobbe (IW)}$$

El IW representa entonces la energía del gas que es inyectado a un quemador. A partir de este planteamiento 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 gravedad específica.

Cuanto mayor sea el IW, mayor será la energía asociada al flujo de gas que pasa a través de un orificio o inyector de determinado tamaño para alimentar un quemador. Dado que en la mayoría de aparatos de combustión, el flujo de gas se regula haciendo pasar el gas a través de un orificio, la gran utilidad del IW consiste en que para cualquier

orificio, todos los gases que tengan el mismo IW van a suministrar la misma cantidad de energía. De esta manera, el IW es un indicador sencillo, fácil de usar y que brinda una buena descripción genérica de la intercambiabilidad.

En la práctica, actualmente la mayoría de equipos de combustión de carácter doméstico o industrial soportan variaciones del IW de hasta $\pm 5\%$. Sin embargo, la debilidad del IW consiste en su incapacidad para predecir la ocurrencia de fenómenos de combustión indeseados como aquellos que se mencionaron en la Figura 2. Si bien se considera que el IW es un parámetro clave de intercambiabilidad, comúnmente se le debe usar en asocio con otros parámetros límites complementarios como por ejemplo el poder calorífico, el contenido total de inertes y el contenido de hidrocarburos pesados (C4+), entre otros (Ver Figura 5).

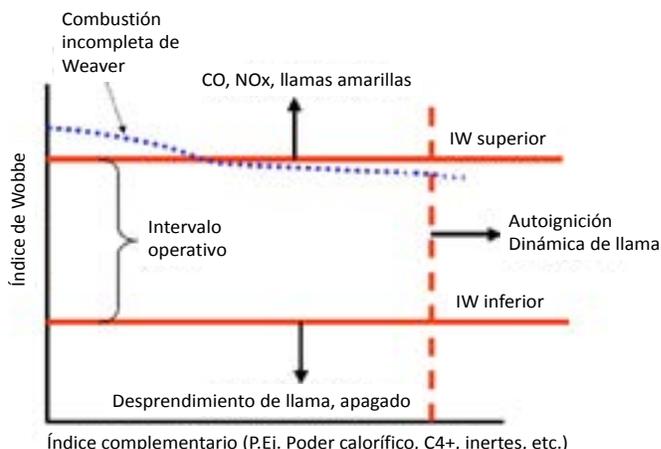


Figura 5. Análisis de intercambiabilidad usando el Wobbe y un índice complementario (Fuente: [4])

Es así como surgió la necesidad de estudiar experimentalmente el desempeño de diversas mezclas de gases operando sobre quemadores de diferentes diseños para establecer una base de conocimiento que permitiera una mejor predicción de los problemas específicos de intercambiabilidad. A partir de los estudios se desarrollaron factores adicionales que servían para complementar el IW, entre los que vale la pena destacar los índices de AGA y los índices de Weaver, los cuales fueron desarrollados en los Estados Unidos.

En la siguiente sección vamos a analizar el índice de Weaver como ejemplo de índice múltiple.

5. ÍNDICES DE WEAVER

En los Estados Unidos, en el período comprendido entre 1927 y 1948, se llevaron a cabo casi 280000 ensayos de combustión empleando alrededor de 500 mezclas de gases diferentes (desde gases manufacturados con un poder calorífico muy bajo y alto contenido de hidrógeno hasta gases licuados de petróleo). Estos ensayos se orientaban al estudio de problemas específicos de combustión que podían presentarse como consecuencia de la intercambiabilidad. Este gran esfuerzo fue necesario debido a que la industria del gas natural inició su desarrollo a partir de los yacimientos que empezaron a ser descubiertos y que iban a ser aprovechados para complementar o sustituir el gas manufacturado que era empleado comúnmente.

A partir del formidable conjunto de datos obtenidos experimentalmente, se apoyaron diversos estudios para la formulación de índices de intercambiabilidad orientados a la descripción de problemas de combustión particulares como por ejemplo las puntas de llama amarillas, el retroceso de llama, la combustión incompleta, etc. Sin embargo, la mayoría de los datos obtenidos correspondían a gases de composiciones muy diferentes al gas natural, tan solo un pequeño subconjunto de datos reflejaba las mezclas de gas natural.

Apoiado en estos datos y en los trabajos desarrollados por AGA, Frank Knoy y J.F. Anthes, entre otros, Elmer R. Weaver desarrolló un conjunto de 6 índices (4 de ellos nuevos con respecto a los trabajos realizados anteriormente), consistentes

ÍNDICE	DESCRIPCIÓN	CRITERIO
$J_H = \frac{H\sqrt{D_a}}{H_a\sqrt{D}}$	Índice de intercambiabilidad con respecto a la tasa a la cual se genera el calor. H es el poder calorífico (Btu/ft ³) y D es la densidad relativa del gas.	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.
$J_A = \frac{A\sqrt{D_a}}{A_a\sqrt{D}}$	Índice de intercambiabilidad con respecto al suministro de aire para combustión. A es el volumen de aire (expresado pies cúbicos) requerido para la combustión completa de 1 pie cúbico de gas.	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).
$J_L = J_A \frac{S}{S_a} \frac{100 - Q}{100 - Q_a}$	Índice de intercambiabilidad con respecto al desprendimiento de llama. S es la 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; Q es el porcentaje de contenido de oxígeno en el gas.	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.
$J_F = \frac{S}{S_a} - 1,4J_A + 0,4$	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.
$J_Y = J_A + \frac{N - N_a}{110} - 1$	Índice de intercambiabilidad con respecto a la formación de llamas amarillas. N es el número de átomos de carbono liberados fácilmente por cada cien moléculas de gas.	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 gases en este aspecto
$J_I = J_A - 0,366 \frac{R}{R_a} - 0,634$	Índice de combustión incompleta. R es la 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.	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 1: El subíndice a representa la condición de ajuste original del artefacto, es decir para la cual estaba originalmente reglado.

Tabla 2. Índices de Weaver

en expresiones matemáticas que muestran aproximadamente las tendencias relativas entre un gas de ajuste original y un gas sustituto para generar resultados satisfactorios (o insatisfactorios) de intercambiabilidad sin modificar el ajuste original del equipo de combustión.

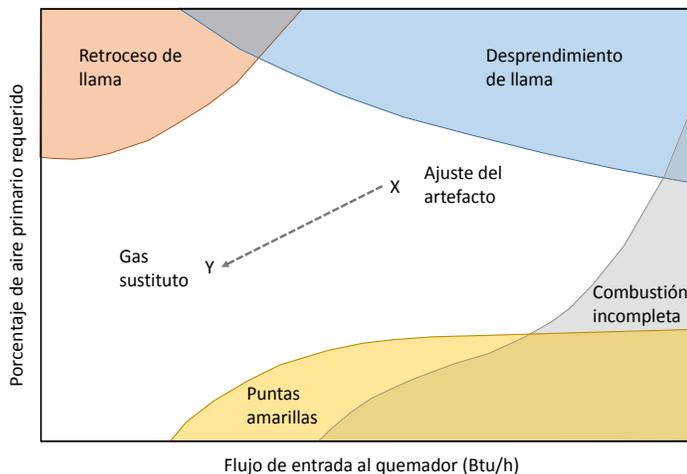


Figura 6. Marco de referencia para intercambiabilidad según los índices de AGA y de Weaver (Fuente: [7])

Los índices de Weaver se presentan en la Tabla 2. Con estos 6 índices es posible entonces conformar un marco de referencia para la intercambiabilidad mucho más completo que el uso del IW simple o combinado con otra propiedad o característica del gas (Ver Figura 6).

Si bien el método de Weaver (y el de AGA) brindan una descripción más completa de los fenómenos de combustión, están limitados en cuanto al tipo de quemadores y de mezclas que fueron probados experimentalmente para obtener los índices, estos se adecúan de forma aceptable para quemadores tradicionales tipo Bunsen con premezcla de aire parcial, quedando por fuera los diseños de quemadores modernos. En lo que respecta a los tipos de gas, como se mencionó anteriormente, en la fecha en que se llevaron a cabo los experimentos apenas estaba madurando la industria del gas y todavía existía una fuerte dependencia del gas manufacturado, con contenidos de hidrógeno importantes, un compuesto prácticamente ajeno al gas natural actual por lo que las mezclas usadas en los experimentos no fueron muy representativas para las necesidades actuales.

Por último, la aplicación del método es compleja y todos los índices parten de una base relativa al

gas de reglaje o ajuste original. A continuación se describirá de manera general el método gráfico de Dutton, el cual refleja claramente lo que ha sido la perspectiva europea en materia de intercambiabilidad.

6. MÉTODO GRÁFICO DE DUTTON

En Europa también hubo un desarrollo importante de índices de intercambiabilidad, predominantemente basados en soluciones de carácter gráfico y modificaciones del IW original, entre los métodos desarrollados se destacan los de Delbourg, Gilbert & Prigg y Dutton.

El método de Dutton fue desarrollado en el Reino Unido durante las décadas de 1970 y 1980, aplica específicamente para gas natural, así como para gases que contienen hidrógeno y sus respectivas mezclas. El diagrama de Dutton es una representación gráfica (bidimensional para el gas natural y tridimensional para las mezclas que contienen hidrógeno, como el caso de los gases manufacturados) de las características de intercambiabilidad, en el cual el IW se grafica contra la concentración de propano y nitrógeno, componentes planteados para formular una equivalencia con respecto a los hidrocarburos pesados y los compuestos inertes, respectivamente.

En su investigación Dutton se apoyó en los fenómenos de combustión asociados a la llama del quemador, en particular la temperatura de llama y la velocidad de la combustión, a lo cual agregó los efectos sobre los artefactos de combustión.

Si bien Dutton tenía claro que el contenido de hidrocarburos e inertes eran claves para definir con exactitud las características de la llama, la apuesta de Dutton era poder desarrollar un método sencillo que pudiera ser fácilmente usado por las empresas vinculadas a la cadena del gas en su país. Para esto propuso el concepto de “mezclas equivalentes” en las 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, por su parte, en lo que respecta a los inertes Dutton propuso el contenido de nitrógeno para representar todos los compuestos inertes presentes en el gas (incluido el oxígeno), todos los inertes tienen un nivel de nitrógeno equivalente de forma que las cantidades de gas inerte cuando se mez-

clan con los otros componentes no-inertes generan una mezcla con el mismo IW que la mezcla real.

El abordaje del método de Dutton fue exitoso técnicamente debido a que la velocidad de la combustión de diferentes hidrocarburos lineales (alcanos) es similar, lo mismo sucede con el impacto de los inertes. Usando el concepto de mezclas equiva-

lentes, cualquier mezcla de gas puede representarse como un punto en un tetraedro en el cual cada vértice corresponde a uno de los 4 componentes de la mezcla equivalente (metano, propano, nitrógeno e hidrógeno). Así mismo, dentro del tetraedro se grafican conjuntos de superficies relacionadas con las propiedades fenómenos de la combustión y el desempeño de los artefactos, generadas a partir de los datos experimentales. En la Figura 7 se puede apreciar un ejemplo.

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 IW 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 Figura 8 se puede ver un ejemplo de un diagrama de Dutton sobre el cual se han dibujado los límites empleados en el Reino Unido. Como se puede apreciar, las líneas límite de la izquierda corresponden a las líneas propano/metano y nitrógeno/metano, no hay gases naturales que caigan a

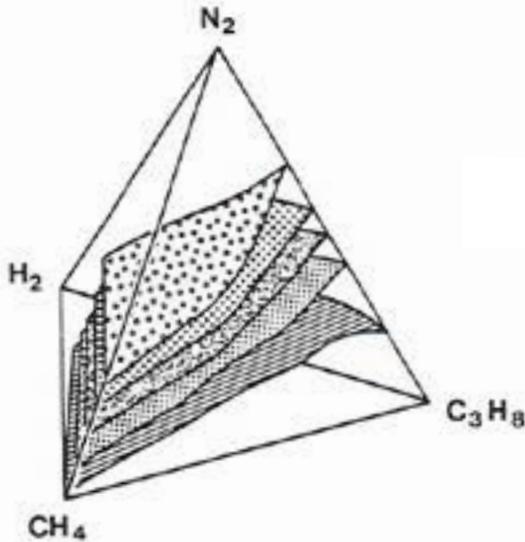


Figura 7. Tetraedro de Dutton para evaluación de intercambiabilidad mediante mezclas equivalentes (Fuente: [8])

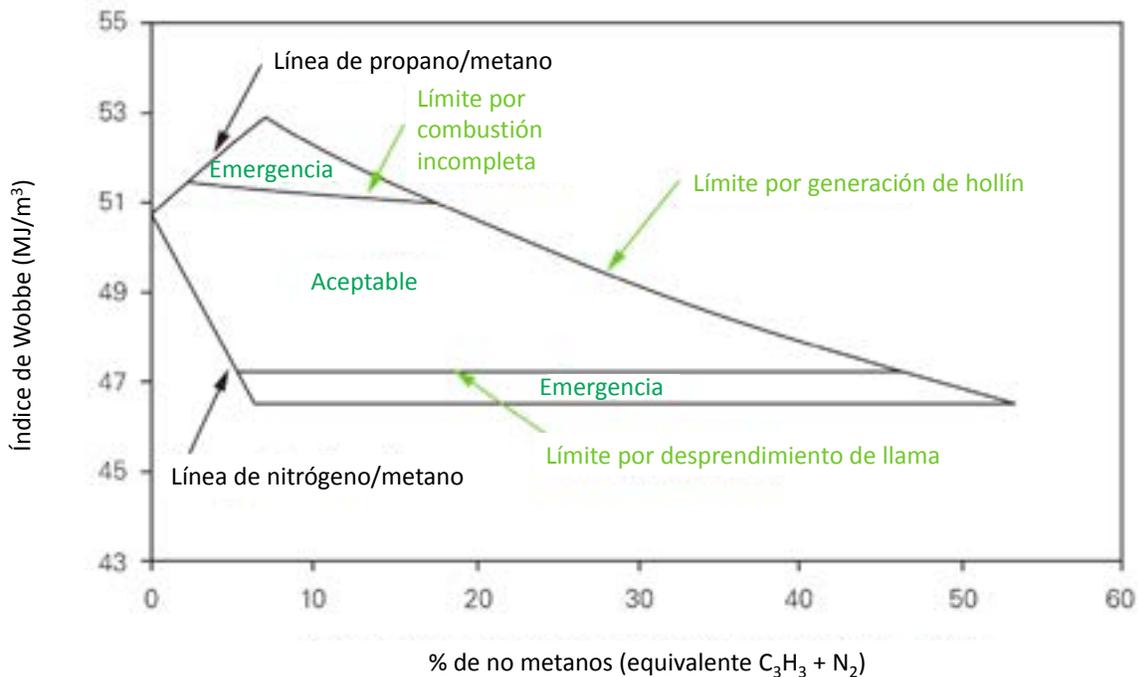


Figura 8. Tetraedro de Dutton para evaluación de intercambiabilidad mediante mezclas equivalentes (Fuente: [8])

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).

7. MARCO REGULATORIO COLOMBIANO

Antes de finalizar el artículo resulta conveniente mencionar que en Colombia el concepto de la intercambiabilidad de gases es un tema que si bien es conocido por la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG), por el Ministerio de Minas y Energía (Minminas) y por el Consejo Nacional de Operación de Gas (CNO-Gas), en la práctica puede afirmarse que regulatoriamente la intercambiabilidad de gas es un tópico inexistente, aún a pesar de la perspectiva del abastecimiento del gas y sus impactos ante una apertura del mercado a gases de fuentes diversas como es el caso de la entrada del GNL.

Aunque la regulación vigente no trata el tema de la intercambiabilidad, se resalta que en 2008 la CREG desarrolló un acercamiento a la materia mediante la publicación del documento CREG-062 titulado “Especificaciones de Calidad del Gas Natural en el Punto de Entrada del Sistema Nacional de Transporte de Gas - Número de Wobbe”, el cual incluía un proyecto de resolución (CREG 084 de 2008) que pretendía complementar las especificaciones de calidad para la intercambiabilidad de gases en el Sistema Nacional de Transporte de Gas (SNT). Al interior del CNO-Gas, sus miembros también han discutido la importancia de abordar el estudio y la proyección de propuestas que aborden la intercambiabilidad de gas de manera concreta para la realidad colombiana.

En el caso de la Resolución CREG 084 de 2008, las propuestas que se realizaban en su momento eran las siguientes:

1. Adoptar el índice de Wobbe (IW) como parámetro para verificar la intercambiabilidad de gases.
2. Adoptar el rango del IW 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.

3. Asignar al Productor-Comercializador la responsabilidad de inyectar el gas al sistema de transporte dentro del rango de IW establecido.

8. CONCLUSIONES

1. La intercambiabilidad de gases es un aspecto de crucial importancia para la seguridad en el consumo del gas natural, en especial ante la futura apertura de Colombia a las importaciones de gas natural licuado, situación que traerá una gran diversidad en las composiciones del gas que entran a la red.
2. El Índice de Wobbe es un parámetro sencillo para evaluar intercambiabilidad de gases y es usado ampliamente en todo el mundo, sin embargo no es capaz de predecir por sí solo aspectos tales como fenómenos de combustión indeseados y variación en las emisiones, por lo cual debe ser usado en combinación con otras propiedades o parámetros de intercambiabilidad.
3. Los índices múltiples de AGA y Weaver fueron desarrollados en los Estados Unidos durante el período comprendido entre las décadas de 1920 y 1950, en estos se incluyeron los fenómenos de combustión y de dinámica de la llama como índices complementarios para definir mejor el desempeño de un gas sustituto con respecto al gas de ajuste con el cual está configurado el artefacto de combustión para operar. Sin embargo, su aplicación es compleja y además, la mayoría de los gases y los quemadores usados en los experimentos de dicha época no son un buen reflejo de la actualidad de la industria del gas natural.
4. El método gráfico de Dutton es un método poderoso para evaluar fácilmente situaciones de intercambiabilidad, este método fue desarrollado en el Reino Unido entre las décadas de 1970 y 1980. Aplica para todos los gases naturales, así como para gases manufacturados que presenten contenidos representativos de hidrógeno y las respectivas mezclas de estos. El modelo de Dutton se basa en el principio de “mezclas equivalentes”, a su vez este método considera diversos límites que corresponden a problemas de combustión y de dinámica de la llama.
5. En Colombia la regulación en materia de intercambiabilidad es prácticamente nula desde la perspectiva del correcto aprovisionamiento de

gas y de los medios para asegurar su consumo seguro. No obstante, la CREG y el CNO-Gas han tenido iniciativas enfocadas hacia la consolidación de aspectos de intercambiabilidad en las regulaciones y normas que todavía no se han visto materializadas de manera efectiva pero que alude a un tema altamente complejo que incluso ha sido difícil de abordar para los países industrializados.

9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Evans, Peter; Farina, Michael. "The age of gas & the power of networks" GE 2013.
- [2] International Gas Union; BP; GL Noble Denton. "Guidebook to gas interchangeability and gas quality". IGU-BP-GL 2011.
- [3] Kuipers, Edgar. "Interchangeability". Shell NA LNG. 2007
- [4] Natural Gas Council Plus. "White paper on natural gas interchangeability and non-combustion end use". NGC+ Interchangeability Work Group 2005.
- [5] American Gas Association. "Interchangeability of other fuel gases with natural gases - Research bulletin 36". AGA 1946.
- [6] Weaver, Elmer. "Formulas and graphs for representing the interchangeability of fuel gases". Journal of Research of the National Bureau of Standards, Vol. 46, No.3, March 1951 Research Paper 2193.
- [7] Halchuk-Harrington, Rosemarie; Wilson, Robert. "AGA Bulletin #36 and Weaver interchangeability methods: Yesterday's research and today's challenges" Xcel Energy & Keyspan Energy, 2006.
- [8] Dutton, B.C. "A new dimension to gas interchangeability". British Gas Corporation, Communication 1246, The Institution of Gas Engineers, 1984.
- [9] Comisión de Regulación de Energía y Gas. "Documento CREG-062: Especificaciones de calidad de gas natural en el punto de entrada del Sistema Nacional de Transporte de Gas - Número de Wobbe". CREG, 2008.
- [10] Comisión de Regulación de Energía y Gas. "Resolución No. 084 de 2008". CREG, 2008.
- [11] American Gas Association. "Natural Gas Quality Management Manual". First Edition. 2013.
- [12] Juan M. Ortiz A., Pedro A. Mojica G. "Bancos para Ensayos de Gasodomésticos". Tesis de Grado Ingeniería Mecánica. Universidad Industrial de Santander. 2001.