

CONTROL DE LA INTERCAMBIABILIDAD DE GASES EN COLOMBIA

ESTEBAN ECHEVERRY LEMOS



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA DE PETROLEOS
BUCARAMANGA

2017

CONTROL DE LA INTERCAMBIABILIDAD DE GASES EN COLOMBIA

ESTEBAN ECHEVERRY LEMOS

**Trabajo de grado como requisito parcial para optar al título de
INGENIERO DE PETRÓLEOS**

Director

MANUEL ENRIQUE CABARCAS SIMANCAS

Ingeniero de Petróleos

Msc. Ingeniería química



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA DE PETROLEOS
BUCARAMANGA**

2017

DEDICATORIA

Dedico este triunfo a mi familia, ellos son el motor que me hace seguir avanzando,
gracias a su apoyo incondicional.

A mi madre **Esperanza Lemos** porque con sus regaños y cantaleta me hace ser
cada vez mejor.

A mi padre **Mario German Echeverry** quien más que un padre es un cómplice
pues me apoya en todo lo que necesite.

A mi hermana **Juliana** quien me cела como si fuera un tesoro y siempre está ahí
para extenderme una mano.

A mis abuelos **Danilo, Luz María, Leonor y Libardo** que siempre estuvieron
pendientes de mi progreso y listos para aportar en caso de que me faltara
cualquier cosa.

A mis tíos y tías quienes celebraran este triunfo como si fuera propio.

A mis primos que están siguiendo mis pasos y pronto estarán graduados

A mi novia **Tatiana García** quien me acompaña y apoya incondicionalmente en
todo. Como si fuera parte de mi familia.

AGRADECIMIENTOS

A la **Universidad Industrial De Santander** y a todo el personal de la escuela de ingeniería de petróleos por aportar un granito de arena a mi formación personal y profesional.

Al **M.s.c Manuel Enrique Cabarcas Simancas** por creer en mí y darme su apoyo y dirección durante este proyecto.

A los ingenieros **Cesar Riberos y Leonardo Virviescas** porque sin su apoyo no habría logrado culminar mi ciclo básico con éxito.

Al ingeniero **Juan Manuel Ortiz** por su apoyo proporcionándome bibliografía además de ser el autor de 2 artículos en los cuales me basé.

A mis amigos **Fernando, Gabriel, Luis, Jorge y sus familias** quienes me acompañaron y apoyaron en mi estadía en Bucaramanga y con quienes entablé una gran amistad.

A la **Familia Culture** de quienes tengo muchos recuerdos y experiencias.

A **Yaneth y Vicente** quienes me acompañaron y estuvieron pendientes de mí desde muy pequeño

A todas las personas que de una forma u otra han contribuido con su apoyo para cumplir esta meta.

A **la persona que este leyendo este texto** por tomarse la molestia de mirar lo que con esfuerzo plasme en este libro.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION	15
1. ESPECIFICACIONES DEL PROYECTO	17
1.1 TITULO	17
1.2 MODALIDAD DEL PROYECTO	17
1.3 AUTOR	17
1.4 DIRECTOR DE PROYECTO	17
2. TEMA DE INVESTIGACIÓN	18
2.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	18
2.2 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	18
2.3 JUSTIFICACIÓN	18
3. OBJETIVOS	19
3.1 OBJETIVO GENERAL	19
3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	19
4. TIPO DE ESTUDIO	20
5. MARCO CONTEXTUAL	21
5.1 GAS MANUFACTURADO	21
5.2 GAS LICUADO DE PETROLEO (GLP)	21
5.3 GAS NATURAL	22
5.3.1 Especificaciones de calidad de gas en Colombia	23
5.3.2 Punto de rocío	24
5.3.3 Poder Calorífico	25
5.3.4 Peso molecular aparente.	25
5.3.5 Densidad del gas	26
5.3.6 Gravedad específica	26
5.3.7 Velocidad de deflagración	27
5.4 RESEÑA HISTORICA	27
5.4.1 Estados unidos y Europa	27

5.4.2 Colombia	31
5.4.3 Japón	33
6. MARCO TEORICO	35
6.1 INTERCAMBIABILIDAD DE GASES	35
6.2 POSIBLES PROBLEMAS GENERADOS	35
6.2.1 Estabilidad de llama	36
6.2.2 Autoingnición del gas	37
6.2.3 Puntas de llama amarillas	37
6.2.4 Generación elevada de contaminantes	38
6.3 INDICES DE INTERCAMBIABILIDAD	39
6.3.1 Métodos de índices simples	40
6.3.2 Métodos de índices múltiples	47
6.3.3 Métodos gráficos (diagramas)	54
6.3.4 Otros métodos	69
7. MARCO LEGAL	70
7.1 INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO)	70
7.2 NORMAS ESTADOUNIDENSES	71
8. CONCLUSIONES	73
BIBLIOGRAFIA	74

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Línea de tiempo intercambiabilidad	31
Figura 2. Intercambiabilidad de Japón: 13A	34
Figura 3. Fundamentos de índice de Wobbe	41
Figura 4. Marco de referencia para intercambiabilidad según los índices AGA y Weaver	51
Figura 5. Representación gráfica de Delbourg	56
Figura 6. Los coeficientes K1 y K2 se muestran en la siguiente figura para la primera y segunda familia	57
Figura 7. Coeficientes u y v para hallar el índice de Delbourg	58
Figura 8. Diagrama de predicción de intercambiabilidad de Gilbert-Prigg, modificado por Harris/Lovelace y Harris/Wilson	61
Figura 9. Factor de corrección de Ck y diagrama de predicción de Holmqvist	62
Figura 10. Diagrama de estabilidad de llama de Grumer	63
Figura 11. Diagrama típico de Van Der Linden	64
Figura 12. Tetraedro de Dutton	67
Figura 13. Tetraedro de Dutton con uso de mezclas equivalentes	68

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Composición típica de un gas natural	22
Tabla 2. Especificaciones de calidad de gas en Colombia	23
Tabla 3. Clasificación de los métodos de intercambiabilidad	40
Tabla 4. Clasificación combustibles gaseosos	42
Tabla 5. Índices múltiples A.G.A	48
Tabla 6. Límites de intercambiabilidad para varios gases	49
Tabla 7. Índices de Weaver	51
Tabla 8. Propiedades de gases usados para calcular la intercambiabilidad por el método de Weaver	53

SIMBOLOGIA Y ABREVIATURAS

AGA: American Gas Association

C₁: Metano (C₁H₄)

C₂: Etano (C₂H₆)

C₃: Propano (C₃H₈)

C₄: Butano (C₄H₁₀)

C₅: Pentano (C₅H₁₂)

C₆: Hexano (C₆H₁₄)

C₇: Heptano (C₇H₁₆)

CREG: Comisión Reguladora de Energía y Gas

ISO: International Organization for Standardization

GPA: Gas Processors Association

GLP: Gas licuado de Petróleo

GNL: Gas natural licuado

PCI: Poder calorífico inferior

PCS: Poder calorífico superior

RUT: Reglamento único de transporte de gas natural

UDEA: Universidad de Antioquia

UIS: Universidad Industrial de Santander

RESUMEN

TITULO: CONTROL DE LA INTERCAMBIABILIDAD DE GASES EN COLOMBIA*

AUTOR: ESTEBAN ECHEVERRY LEMOS**

PALABRAS CLAVES: Intercambiabilidad, gas natural, numero de Wobbe, Dutton, índices AGA, Weaver, Knoy, Willien, Delbourg, calidad del gas, métodos gráficos.

DESCRIPCIÓN

Con este proyecto se busca hacer una compilación de los distintos métodos de intercambiabilidad existentes y proponer parámetros de calidad de gas natural, los cuales serían aplicables para el control de la intercambiabilidad de gases en el territorio colombiano, tomando como base los últimos avances e investigaciones realizadas principalmente en los países europeos y en Estados Unidos, logrando tener la postura de distintos autores en aras de obtener el texto más completo en cuanto a los índices de intercambiabilidad.

Se espera que este sea un texto comprensible para la mayoría de individuos que tengan acceso a él, debido a esto, en su primer capítulo se desarrolla un marco contextual, el cual contiene algunas definiciones útiles y relevantes para una adecuada interpretación de los capítulos siguientes, por medio de los cuales se presentarán las diferentes clasificaciones, como lo son los índices simples, índices compuestos y los métodos gráficos. Entre los cuales destacan el índice de Wobbe, los índices de Weaver y el método grafico de Dutton debido a que el autor los considero como los más representativos y usados. Además de estos se incluyen otras investigaciones e índices que se han desarrollado para abordar dicho tema y pueden complementarse entre sí de diversas formas dependiendo del el parámetro que se desee medir, cabe destacar, que todas estas investigaciones han sido de tipo empírico, intentando acercarse lo más posible a la realidad.

* Trabajo de grado

** Facultad de ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos

ABSTRACT

TITLE: CONTROL OF GASES INTERCHANGEABILITY IN COLOMBIA*

AUTORS: ESTEBAN ECHEVERRY LEMOS**

KEYWORDS: Interchangeability, natural gas, Wobbe number, Dutton, AGA index, Weaver, Knoy, Willien, Delbourg, gas quality, graphic methods.

DESCRIPTION

This project seeks to compile the different existing interchangeability methods and propose quality parameters of natural gas, which would be applicable for the control of the interchangeability of gases in the Colombian territory, based on the latest advances and research carried out mainly in European countries and in the United States, achieving the position of different authors in order to obtain the most complete text in terms of interchangeability indexes.

It is expected that this is a text understandable to most individuals who have access to it, due to this, in its first chapter a contextual framework is developed, which contains some useful and relevant definitions for an adequate interpretation of the following chapters, by means of which the different classifications will be presented, such as simple indexes, composite indexes and graphic methods. Among which stand out the Wobbe index, Weaver indexes and the Dutton graphic method because the author considered them as the most representative and used. In addition to these include other research and indexes that have been developed to address this issue and can complement each other in different ways depending on the parameter you want to measure, it should be noted that all these investigations have been empirical, trying to approach the more possible to reality.

* Work degree

** Faculty of Engineering physicochemical. School of petroleum Engineering

INTRODUCCION

El 2 de marzo de 1992, el Gobierno de Cesar Gaviria anunció una serie de cortes del servicio de energía eléctrica en todo el país, Incluso se llegó a adoptar la llamada 'hora Gaviria', una medida que consistió en adelantar una hora los relojes con el fin de aprovechar la mayor cantidad de tiempo de luz solar y así ahorrar más energía.¹

Después de este racionamiento de energía eléctrica que causó grandes pérdidas a la economía nacional y muchas molestias al confort de los colombianos, con el objetivo de darle confiabilidad al suministro de electricidad, la política energética nacional estimuló la construcción de centrales térmicas a gas, utilizando como combustible el gas natural de la Guajira. Como consecuencia se instalaron en el país 2800 MW térmicos, representados en proyectos ubicados en la Costa Caribe, en el Magdalena Medio y en el departamento del Valle del Cauca.

Si bien estas centrales térmicas iniciaron su operación con el gas de la Guajira mismo que era un gas seco, es decir con un alto contenido de metano, se preveía a mediano plazo, la utilización del gas natural de Cusiana una vez estuviese disponible, este era un gas asociado el cual tenía una composición distinta contraparte de la costa.

El poseer distintas composiciones químicas conlleva a que tengan propiedades de combustión diferentes. Esta situación ha sido característica en la historia de la industria del gas natural y plantea un enorme reto desde el punto de vista de poder asegurar su combustión segura y eficiente.²

¹ El Tiempo, Así se vivía en Colombia durante el apagón de 1992, (sitio web) <http://www.eltiempo.com/multimedia/fotos/colombia10/asi-vivia-colombia-durante-el-apagon-de-1992/16526173> (consultado oct 13 de 2017)

² A. A. Amell, et al, Efectos del cambio de composición química del gas natural sobre el comportamiento de turbinas a gas, Medellín: Universidad de Antioquia, 2006.

Actualmente el país cuenta con diversas fuentes de gas natural las cuales circulan junto con el gas de la guajira y los llanos en la red nacional de gasoductos; con la reciente inauguración de la planta de regasificación en Cartagena, se podrán importar y poner a circular gases desde cualquier parte del mundo, gracias a la privilegiada ubicación del país y a su cercanía con el canal de Panamá.

Toda vez que el gas natural es una mezcla de diversos componentes y puede variar su composición según su origen es importante que se tengan en cuenta los parámetros de intercambiabilidad de gases, esta se define como la capacidad de sustituir un combustible gaseoso por otro, sin cambiar sustancialmente la seguridad operativa, la eficiencia o un incremento significativo en las emisiones de contaminantes atmosféricos.

Este proyecto busca proponer parámetros de calidad de gas natural que serían aplicables para el control de la intercambiabilidad de gases en el territorio colombiano, tomando como base los últimos avances e investigaciones realizadas alrededor del mundo sobre el tema.

Se espera que este sea un texto comprensible para la mayoría de individuos que tengan acceso a él, debido a esto, en su primer capítulo se desarrolla un marco contextual, el cual contiene algunas definiciones útiles y relevantes para una adecuada interpretación de los capítulos siguientes, por medio de los cuales se presentarán las diferentes clasificaciones, investigaciones e índices que se han desarrollado para abordar dicho tema, cabe destacar, que todas estas investigaciones han sido de tipo empírico, intentando acercarse lo más posible a la realidad.

Finalmente se hará una comparativa entre las normas y leyes aplicadas alrededor del mundo, y se presentará una propuesta sobre cuál sería el método más recomendable y/o el más aceptado para emplear en nuestro país.

1. ESPECIFICACIONES DEL PROYECTO

1.1 TITULO

“Control de intercambiabilidad de gases en Colombia”

1.2 MODALIDAD DEL PROYECTO

Trabajo de investigación

1.3 AUTOR

Esteban Echeverry Lemos

Cód.: 2092238

Facultad de ingenierías fisicoquímicas, Escuela de ingeniería de petróleos

Programa: Ingeniería de petróleos

1.4 DIRECTOR DE PROYECTO

M.Sc. Manuel Enrique Cabarcas Simancas

2. TEMA DE INVESTIGACIÓN

2.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Con la planta de regasificación en Cartagena próxima a ser inaugurada, Colombia podrá importar gas al mejor postor; gracias a su ubicación en medio de 2 océanos y a su cercanía con el canal de Panamá, puede importar gas desde casi cualquier parte del mundo. Aunque es muy importante que tenga en cuenta los parámetros de intercambiabilidad de gases, para evitar que las personas del común e industrias corran riesgos físicos u operacionales, puesto que estos gases entrarían a circular junto con los gases colombianos en la red de gasoductos.

2.2 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Que parámetros de calidad de gas natural son aplicables para el control de intercambiabilidad de gases en el país?

2.3 JUSTIFICACIÓN

Este proyecto busca proponer los parámetros de calidad de gas natural que serían aplicables para el control de la intercambiabilidad de gases en el territorio colombiano, con base en los últimos avances e investigaciones hechas por entes públicos y privados; incluyendo normas aplicadas en distintos países avanzados en el tema.

Además, utilizando los parámetros aportados por esta investigación se busca que tanto empresas como usuarios domésticos tengan la posibilidad de sustituir un combustible gaseoso por otro sin que se presenten diferencias con la seguridad operacional, la eficiencia o las emisiones hacia el medio ambiente.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar una investigación documental para proponer parámetros de calidad de gas natural aplicables para el control de intercambiabilidad de gases en el país.

3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Realizar una recopilación bibliográfica sobre lo último en tecnología y normas aplicables a intercambiabilidad de gases para un mínimo de 5 países.
- Elaborar una reseña histórica de la evolución sobre la aplicación del concepto intercambiabilidad de gases.
- Obtener un inventario de todas las fuentes de gas natural que actualmente ingresan a las redes de transporte.
- Proponer los parámetros de calidad de gas natural aplicables al control de la intercambiabilidad con base en los objetivos anteriores.

4. TIPO DE ESTUDIO

La siguiente investigación se puede definir como un estudio documental, el cual busca recopilar tanta información útil como sea posible para aplicar al contexto colombiano.

Este tipo de investigación se limitará a recopilar bibliografía, normas y métodos aplicados para validar una adecuada intercambiabilidad en otros países. Con base en estos hacer una comparación y proponer parámetros de calidad, con los cuales se busca disminuir el riesgo a usuarios.

5. MARCO CONTEXTUAL

En esta sección del estudio, se definen algunos conceptos básicos para una correcta interpretación del mismo, además, ofrece una reseña histórica con el fin de poner en contexto el momento en el cual se fueron desarrollando cada uno de los índices de intercambiabilidad, mismos que serán definidos posteriormente.

5.1 GAS MANUFACTURADO

Es un gas combustible que se produce a partir de carbón, coque, derivados del petróleo crudo, transformación de los gases naturales o de los gases licuados de petróleo o cualquier mezcla de ellos.³ Se compone principalmente de Hidrogeno y Monóxido de carbono (CO). También se le conoce con otros nombres como “gas de fábrica”, “gas refinado” o “gas de cañería”.

5.2 GAS LICUADO DE PETROLEO (GLP)

Es una mezcla de hidrocarburos, principalmente propano (C₃) y butano (C₄), los que son gaseosos a las temperaturas y presiones ambientales normales. Pero estos pueden ser licuados aplicando una moderada presión.

Su principal uso es el doméstico, aunque tiene otras aplicaciones en el sector industrial y el del transporte, tomando como ejemplo el GLP vehicular.⁴

³ “Gas manufacturado”, En Glosario técnico el sector de construcción (en línea), <http://glosario.registrocdt.cl/word/gas-manufacturado-gm> (consultado en 11 de septiembre de 2017)

⁴ “Gas licuado”, En Ecured (en línea), https://www.ecured.cu/Gas_licuado (consultado 2 de octubre de 2017)

5.3 GAS NATURAL

Se define como un fluido homogéneo de baja viscosidad y densidad sin un volumen definido, no obstante, se expande completamente para llenar el recipiente que lo contiene. Comúnmente, es una mezcla de hidrocarburos gaseosos, principalmente metano (C₁) y etano (C₂), aunque puede contener incluso (C₇⁺); también contiene otros gases conocidos como impurezas, entre otros, se incluyen dióxido de carbono (CO₂), vapor de agua (H₂O), sulfuro de hidrogeno (H₂S), nitrógeno (N₂), helio (He) y otros.⁵

En la *Tabla 1* se presenta una composición de un gas natural típico, aunque esta puede cambiar según su origen y por lo tanto sus propiedades físico-químicas son distintas.

Tabla 1. Composición típica de un gas natural

COMPOSICIÓN TÍPICA DE UN GAS NATURAL		
Hidrocarburos	Metano	70 - 98%
	Etano	1 - 10%
	Propano	0 - 5%
	Butano	0 - 2%
	Pentano	0 - 1%
	Hexano	0 - 0.5%
	Heptano +	0 - 0.5%
No hidrocarburos	Nitrógeno	0 – 15%
	Dióxido de carbono*	0 – 5%
	Sulfuro de hidrogeno*	0 - 3%
	Helio	Hasta 5%, usualmente 0

*Ocasionalmente se encuentran gases naturales que son predominantemente dióxido de carbono o sulfuro de hidrógeno

Fuente: Tomado y traducido de McCain, W.D., *The Properties of Petroleum Fluids* (2 ed.)⁶.

⁵ Paris De Ferrer, M. Fundamentos de ingeniería de yacimientos, Maracaibo: Ediciones Astro Data. 2009, p. 77.

⁶ McCain, W.D., Jr. (1990). *The Properties of Petroleum Fluids* (2 Ed.). Tulsa, Oklahoma: Penn Well Books, Penn Well Publishing Co, p. 2.

5.3.1 Especificaciones de calidad de gas en Colombia. La calidad del gas natural para ser comercializado en Colombia está definida por el reglamento único de transporte de gas natural “RUT”. El cual fue adoptado en 1999 por la Comisión Reguladora de Energía y Gas, en su resolución CREG 071.

El numeral 6.3 de dicha resolución fue modificado por la resolución CREG 054 de 2007 y en este se establecen las especificaciones de calidad en el gas natural entregado a un transportador por parte del remitente en un punto de entrada al sistema de transporte.⁷

Con este reglamento se busca salvaguardar la salud humana y la integridad de los equipos y gasoductos, a continuación, una tabla con los parámetros más importantes de este manual.

Tabla 2. Especificaciones de calidad de gas en Colombia

Especificaciones	Sistema internacional	Sistema Ingles
Máximo poder calorífico bruto (GHV)	42,8 MJ/m ³	1150 BTU/ft ³
Mínimo poder calorífico bruto (GHV)	35,4 MJ/m ³	950 BTU/ft ³
Contenido de líquido	Libre de líquidos	Libre de líquidos
Máximo contenido de H ₂ S	6 mg/m ³	0,25 grano/100ft ³
Máximo contenido de azufre	23 mg/m ³	1.0 grano/100ft ³
Máximo contenido de CO ₂	2%	2%
Máximo contenido de N ₂	3%	3%
Máximo contenido de O ₂	0,1%	0,1%
Máximo contenido de Inertes	5%	5%
Máximo contenido de vapor de agua	97 mg/m ³	6.0 Lb/MMft ³
Máxima temperatura de entrega	49 °C	120 °F
Mínima temperatura de entrega	7,2 °C	45 °F
Contenido máximo de polvos y material en suspensión	1,6 mg/m ³	0,7 grano/100ft ³

Fuente: Resolución 062 de 2008 CREG

⁷ Comisión reguladora de energía y gas, especificaciones de calidad del gas natural en el punto de entrada del sistema nacional de transporte de gas. CREG-062, 25 de julio de 2008

Nota:

- Todos los datos referidos a ft³ y m³ son referidos a condiciones estándar.
- Se considera como contenido de inertes la suma de los contenidos de CO₂, N₂ y O₂.
- Los líquidos pueden ser: hidrocarburos, agua y otros contaminantes en estado líquido.
- El máximo tamaño de las partículas debe ser 15 micrones.⁸

5.3.2 Punto de rocío. Es el punto en el cual, las primeras moléculas dejan de ser gas y se condensan en pequeñas gotas de líquido, se le conoce como punto de rocío. Tanto este como el punto de burbuja están indicados por los bruscos cambios de pendiente a lo largo de la isoterma entre presión y volumen específico. Para una sustancia pura, la presión en el punto de burbuja y el punto de rocío es igual a la presión de vapor de la sustancia a la temperatura de interés.⁹

El punto de rocío de una mezcla de gas ideal a una temperatura dada, se define por la siguiente ecuación

$$P_d = \frac{1}{\sum_j \left(\frac{z_j}{P_{vj}} \right)}$$

Donde P_d significa dew-point (punto de rocío), z_j es la fracción molar y P_{vj} es la presión de vapor para cada componente.¹⁰

⁸ Ídem.

⁹ McCain, W.D., Jr., Óp. cit, p. 59.

¹⁰ Ibídem, p. 353.

Los puntos de rocío de los hidrocarburos dependen de su composición y las condiciones a las cuales está sometido.

5.3.3 Poder Calorífico. El poder calorífico de un gas es la cantidad de calor desprendido en la combustión completa de una unidad de volumen de dicho gas, en condiciones normales de presión y temperatura. En este sentido podemos diferenciar el Poder Calorífico Superior (PCS) y el Poder Calorífico Inferior (PCI).

Si bien, el PCS del gas nos indica el calor total obtenido en su combustión completa, aunque no todo ese calor es directamente aprovechable en el aparato de consumo. El PCI nos indica el calor que realmente podemos utilizar, toda vez que una parte del calor total producido se emplea en mantener en estado de vapor el agua que forma parte de los productos de la combustión.

La relación PCI/PCS depende de la proporción de los elementos de carbono e hidrógeno en el gas combustible. Para los gases combustibles empleados normalmente (gas natural, butano y propano) el valor de PCI/PCS es aproximadamente de 0,9.¹¹

5.3.4 Peso molecular aparente. Es una de las principales propiedades de interés para los ingenieros, puesto que y_i representa la fracción molar del componente i en una mezcla de gases. Esta propiedad es la sumatoria de la fracción molar multiplicada por el peso molecular de cada componente, se puede definir matemáticamente con la ecuación:

$$M_a = \sum_{i=1} y_i M_i$$

¹¹ Gas Extremadura, Características principales de los gases combustibles (sitio web), <http://www.dcgasextremadura.es/el-gas-natural/caracteristicas-principales-de-los-gases-combustibles> (Consultado septiembre 11 de 2017)

Donde M_a es el peso molecular aparente de la mezcla y M_i el peso molecular del componente i en la mezcla.¹²

5.3.5 Densidad del gas. Se define como la masa que tiene una unidad de volumen de dicho gas a determinadas condiciones de presión y temperatura. Para calcular la densidad de una mezcla de gases se reemplaza el peso molecular aparente (M_a) en la siguiente ecuación:¹³

$$\rho_g = \frac{PM_a}{RT}$$

5.3.6 Gravedad específica. La gravedad específica se define como la relación entre la densidad del gas y la densidad del aire, expresados a la misma presión y temperatura. Comúnmente la presión estándar P_{sc} y la temperatura estándar T_{sc} son usadas para definirla.

$$Y_g = \frac{\rho_g}{\rho_{aire}}$$

Partiendo del supuesto de que el comportamiento de la mezcla de gas y aire se describe por la ecuación de gases ideales, también podemos expresar la gravedad específica como se muestra a continuación:¹⁴

$$Y_g = \frac{\frac{P_{sc}M_a}{RT_{sc}}}{\frac{P_{sc}M_{aire}}{RT_{sc}}} \rightarrow \frac{M_a}{M_{aire}} \rightarrow \frac{M_a}{28,96}$$

¹² Paris De Ferrer, M., Óp. cit, p. 81.

¹³ Ibídem, p. 82.

¹⁴ Ibídem,

5.3.7 Velocidad de deflagración. La velocidad de deflagración o velocidad de quemado (S_L), se define como la velocidad a la que se desplaza el frente de llama (o zona de reacción) hacia la zona de gases sin quemar (gases de pre-mezcla) en una llama plana y estable, sin pérdidas de calor.¹⁵

5.4 RESEÑA HISTORICA¹⁶

El concepto de intercambiabilidad nació aproximadamente en 1930, con la introducción del gas natural y como una respuesta a la necesidad de la industria de estudiar los problemas de combustión presentados en los aparatos a gas. Los cuales usaban gas manufacturado. A continuación, un recuento con los hechos más importantes antes y después de esa fecha.

5.4.1 Estados unidos y Europa

- En 1915, Estados Unidos inició una encuesta a gran escala que evidenció cuatro tipos de fenómenos de inestabilidad; el desprendimiento de llama, el retroceso de llama, las puntas amarillas y la combustión incompleta.
- En Italia en 1927, el Ingeniero Goffredo Wobbe desarrollo a partir de sus estudios una nueva propuesta para la definición de la calidad del gas natural, apoyándose en un parámetro que se denominó “índice de Wobbe”.
- En ese mismo año, la Asociación Americana de Gas (AGA), empezó un proyecto de investigación que duro 6 años y arrojó como resultado el índice conocido como “índice C” asociado con el desempeño del equipo.

¹⁵ Carvajal, J, Estudio numérico-experimental de la velocidad de combustión laminar del biogás y de mezclas biogás-hidrógeno, Trabajo de grado, Universidad de Antioquia, Facultad de Ingeniería, 2010

¹⁶ J.M. Ortiz y L. Valero, Estado del arte intercambiabilidad de gases a nivel internacional, Polygon Energy S.A, 2016. Pp. 57-62.

- En Estados Unidos en 1938, Willien desarrolló a partir de los datos de poder calorífico y densidad relativa, un índice que permitía calcular la intercambiabilidad de gases manufacturados con poder calorífico de hasta 500 Btu/pe³.
- En 1940, Frank Knoy reduce la ecuación propuesta por Willien para predecir la intercambiabilidad de mezclas aire/GLP que complementan los gases naturales usados en quemadores atmosféricos.
- En 1940, el boletín AGA 10 describió cómo las características de diseño y operación de un quemador atmosférico afectaban las características de su llama.
- En 1946, el laboratorio de la AGA publicó el Boletín de investigación 36 “AGA Research Bulletin 36”, que hoy día sigue siendo un gran referente.
- En 1951, el señor Elmer R Weaver del Bureau de Minas de los Estados Unidos, publica un método que contempla seis índices para predecir la intercambiabilidad luego de analizar la relación entre la velocidad de llama y los resultados experimentales de AGA
- Mientras esto sucedía en América, en Europa simultáneamente se adelantaban varios estudios, entre ellos un proyecto de investigación dirigido por Delbourg en Francia, el cual inició en 1950, y en 1953 se estableció un método grafico basado en un diagrama que servía para predecir la intercambiabilidad de gases de las familias 1 y 2 (ver tabla 4).
- En 1956, se propuso otro método grafico en el Reino Unido, por Gilbert y Prigg, basándose en el índice de Wobbe y la velocidad de llama de Weaver.
- En Alemania en 1957, Schuster desarrolla un estudio que busca medir los efectos en la combustión al variar la composición del combustible, y sin restringirse

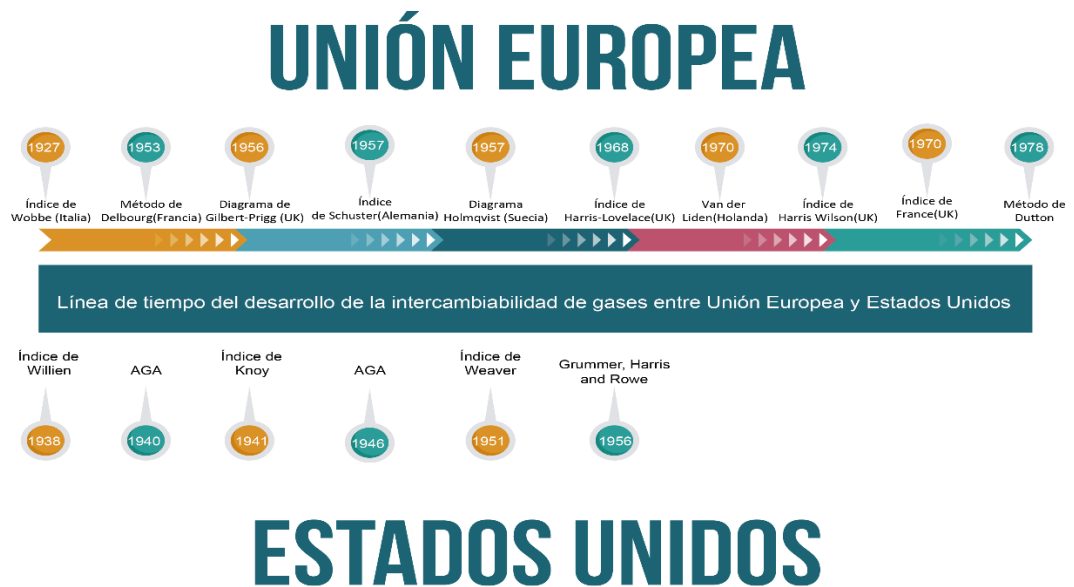
solo al flujo de energía de entrada del combustible. Se define como la relación entre el índice de Wobbe y la velocidad de llama o producción de calor (Su).

- En el mismo año, Holmqvist en Suecia desarrolló un método gráfico tomando como ejes el índice de Wobbe y un número de caracterización, que está relacionado con la altura del cono medido en un quemador atmosférico.
- En 1958, Van Krevelen and Chermin, a partir de sus estudios desarrollaron un método analizando mezclas de distintos gases.
- En 1964, Harris y Lovelace presentaron un diagrama reformado que incluía el gas natural a ser usado en Inglaterra. De la misma forma en 1974 Harris y Wilson desarrollaron un diagrama en donde adicionalmente se incluía el gas natural licuado.
- En Holanda en 1970, Van der Linden despliega un método gráfico partiendo del índice de Wobbe, la presión de suministro de gas de ajuste y sustituto e información relacionada con el diámetro del inyector. Este permite deducir si un gas con alto o bajo índice de Wobbe podría ser aceptado sin ajuste en el quemador, y además cuantificar el cambio en la presión o en el diámetro del inyector requerido para un correcto suministro de gas sustituto.
- Tiempo después en el Reino Unido en 1978, Geoffrey Dutton desarrolló un diagrama de las características de intercambiabilidad, este podía ser bidimensional o tridimensional según la composición del gas en cuestión, en dicho diagrama el Índice de Wobbe 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. El método se usa actualmente en Inglaterra.

- En 2002 investigadores de la Escuela de Minas de Nantes, presentaron una metodología para la determinación del poder calorífico, el índice de Wobbe y la relación estequiométrica aire /combustible, usando la conductividad térmica y el índice de refracción.
- En 2005, Aker Solutions US planteó varios métodos para controlar la calidad del gas de los terminales de LNG, dependiendo de los requerimientos del gasoducto y de las regulaciones. Concluyendo que la integración de los terminales, aumenta la eficiencia energética y reduce las emisiones.
- Ese mismo año, la Comisión Regulatoria Federal de Energía de Estados Unidos, actualizó los Estándares de Intercambiabilidad de Gases, concluyó que el IW es el índice simple más robusto para medir la intercambiabilidad, y que una variación de la composición puede dañar los equipos, y violar las normas ambientales.

A continuación, una línea de tiempo que resume lo expresado anteriormente.

Figura 1. Línea de tiempo intercambiabilidad



5.4.2 Colombia¹⁷. Los estudios de intercambiabilidad en Colombia se concentran en el sector del transporte vehicular, debido a que surgieron en respuesta a los inconvenientes derivados de la política energética de finales de 1999, la cual impulsaba el programa de reconversión del parque automotor a gas natural vehicular (GNV), creado así una dependencia del gas natural de la Guajira.

Dichas investigaciones se basaron en el método de Delbourg y Dutton para evaluar la intercambiabilidad de los principales gases naturales en el país, es decir los de los llanos orientales y los de la Guajira, comprobando así que estos no eran compatibles.

¹⁷ D.D. Montaña Herrera, determinación de las propiedades de combustión e Identificación de problemas de intercambiabilidad de las Mezclas de gas natural con otros combustibles de refinería, Tesis de maestría, Universidad Industrial de Santander, Facultad de ingenierías fisicoquímicas, 2011, P. 24.

En los últimos años Colombia ha aumentado su cantidad de investigaciones resaltando la UDEA, algunas empresas privadas y aunque pocas la UIS no se queda atrás. Por ejemplo, tenemos la siguiente lista con algunos documentos que considero de interés para quien lea este texto.

- En Medellín en 2003 se publicó un artículo de nombre “Validación de la intercambiabilidad de gases en el contexto colombiano”, por J.H. Cortes y J.A, Hernández, bajo la asesoría de Andrés A. Amell quien es coordinador del grupo de ciencia y tecnología del gas de la UDEA.
- Tiempo después y también en Medellín se publicó “métodos para el estudio de la intercambiabilidad de una mezcla de gas natural-syngas en quemadores de premezcla de régimen laminar: un artículo de revisión” por Daniel A. Flórez, Pertenece al mismo grupo ciencia y tecnología del gas de la UDEA.
- En 2011 tenemos una tesis de maestría llamada “Determinación de las propiedades e identificación de problemas de intercambiabilidad de las mezclas de gas natural con otros combustibles de refinería “, escrita por Daniel Darío Montaña Herrera, dicho documento fue presentado para graduarse de magister en ingeniería química en la que es también mi alma mater la Universidad Industrial de Santander (UIS).
- En Bucaramanga el año 2014, el ingeniero mecánico UIS Juan Manuel Ortiz publicó en la revista “Met & FLu N°9” un artículo llamado “Fundamentos de la intercambiabilidad de gas natural” de donde surgió la idea de realizar este proyecto.
- En 2016 la empresa Polygon Energy S.A.S. a cargo del ingeniero Juan M. Ortiz publicó un artículo llamado “Estado del arte intercambiabilidad de gases a nivel internacional” el cual es uno de los más completos en el momento.

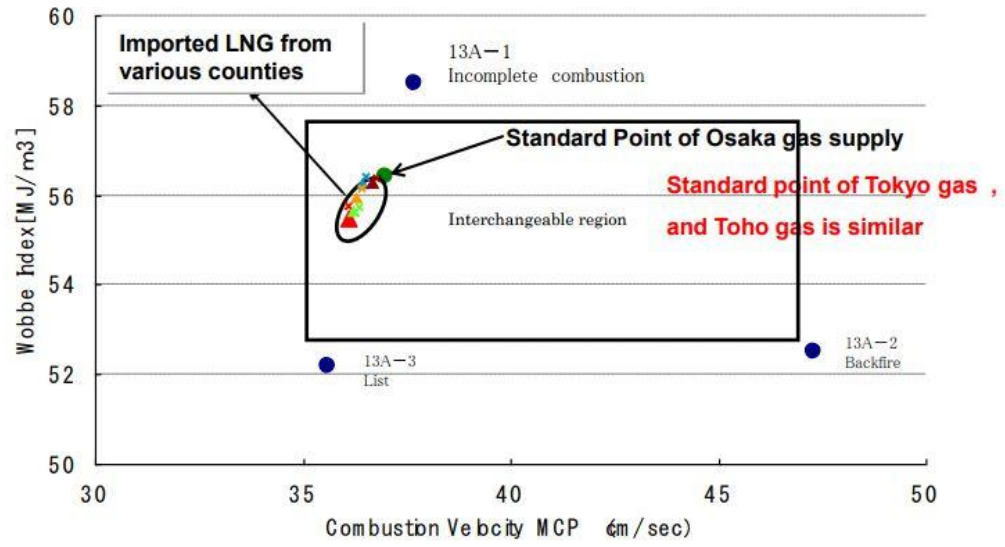
5.4.3 Japón¹⁸. Debido a que el mercado japonés de gas se expande continuamente y junto con esto aumenta la demanda de gas natural. Casi todo su suministro de gas natural depende del GNL importado. Si se compara con otros países la calidad del gas japonés ha sido muy estable, acorde con el incremento en la demanda japonesa de gas su suministro se ha diversificado incluyendo la inyección de biogás y gas no convencional, como shale gas y gas asociado a mantos de carbón.

El impacto de la variación de la calidad del gas en los aparatos de gas se convertirá en un gran problema para la industria del gas. Por esta razón unos adecuados estándares de intercambiabilidad de gas cada vez son más importantes para el país nipón.

El gas natural japonés se clasifica en 2 categorías, la 13A con un 98% de la población y un alto poder calorífico, y la 12A con el 2% restante de la población y un poder calorífico menor. La calidad del gas japonés es regulada por “the Gas Business Act: 1970 enacted”, la cual nos da el margen de intercambiabilidad para Japón, es de anotar que en caso de emergencias como el terremoto de Tohoku se usó una mezcla de gas licuado del petróleo con aire, la cual esta se podía ubicar en los límites que tiene la imagen que se muestra a continuación.

¹⁸ Gas quality variation impact on gas appliances in Japan: a status report. En línea. <http://members.igu.org/old/IGU%20Events/wgc/wgc-2012/wgc-2012-proceedings/working-committee-papers/working-committee-woc5/expert-forum-5.b/status-report-1m-pact-of-gas-quality-variation-on-gas-appliances-in-japan/@@download/download>. (consultado octubre 11 de 2017)

Figura 2. Intercambiabilidad de Japón: 13A¹⁹



¹⁹ Idem

6. MARCO TEORICO

En este capítulo se realizará una recopilación junto con un estado del arte mediante el cual se definirá el término “intercambiabilidad de gases”, se mencionarán los principales problemas de una inadecuada intercambiabilidad y se presentarán los distintos métodos en los que se clasifican los índices desarrollados hasta el momento para medir la calidad de una adecuada intercambiabilidad.

6.1 INTERCAMBIABILIDAD DE GASES

Se define como la capacidad de sustituir un combustible gaseoso por otro, sin cambiar sustancialmente la seguridad operativa, la eficiencia o un incremento significativo en las emisiones de contaminantes atmosféricos.²⁰

Más coloquialmente se pueden considerar 2 gases intercambiables cuando las características de la llama son satisfactorias después de la sustitución de un gas por otro.

6.2 POSIBLES PROBLEMAS GENERADOS²¹

Los dispositivos de combustión a gas están diseñados para operar con un rango particular de especificaciones de gas. La variación de la composición del gas natural más allá de los límites aceptables puede tener los siguientes efectos en los equipos de combustión:

- En electrodomésticos puede originar formación de hollín, inestabilidad en la llama, elevadas emisiones de monóxido de carbono (CO) y la aparición del

²⁰ Gas Interchangeability Task Group. White Paper on Natural Gas Interchangeability and Non-Combustion End Use. Natural Gas Council Interchangeability Task Group, 2005, p. 2.

²¹ Ídem

fenómeno de puntas amarillas. Lo anterior traer como consecuencia que se acorte la vida útil de los equipos y molestias. Por ejemplo: que se salten los interruptores de seguridad o pilotos extintos.

- En motores recíprocos puede ocasionar autoignición afectando la eficiencia y durabilidad.
- En turbinas de combustión, puede producirse un incremento en las emisiones contaminantes y deterioro de los componentes
- En calderas industriales, hornos y calentadores. Se reduce la eficiencia, se puede provocar daño de equipos y no se cumple con la norma de emisiones.

6.2.1 Estabilidad de llama^{22 23}. Es necesaria para mantener el calor útil, emisiones adecuadas y una eficiente combustión, además se reduce la probabilidad de daño por paradas o apagado.

Desprendimiento de la llama. Se define como la condición cuando la llama visible se separa por una pequeña cantidad del puerto del quemador, esto se debe principalmente a la velocidad de deflagración del gas, puesto que esta determina la estructura y la estabilidad de la llama. Por consiguiente, una disminución de la velocidad de deflagración causará que la llama se separe del quemador. Una disminución en la velocidad de deflagración puede ser debido a la mezcla excesivamente rica en el quemador, o altos niveles de inertes en el gas combustible.

Retroceso de la llama. La velocidad de deflagración determina la estructura y la estabilidad de la llama. Un incremento en dicha velocidad causará que la llama se

²²D.D. Montaña Herrera, Óp. cit. P. 33.

²³D.A. Flórez, Métodos para el estudio de la intercambiabilidad de una mezcla de gas natural y gas natural syngas en quemadores de premezcla de régimen laminar: un artículo de revisión, Medellín, Facultad de ingeniería, Universidad De Antioquia. P. 28.

acorte hacia el puerto del quemador. En casos extremos esto puede acarrear que la llama ingrese al quemador, causando la denominada retro llama. Se asocia principalmente con la concentración de H_2 en el gas combustible, debido a su alta velocidad de quemado. El hidrógeno, como un constituyente del gas combustible, era un problema cuando el gas manufacturado representaba una porción significativa del suministro de gas local. Con la transición hacia el gas natural y con la ausencia relativa de H_2 en el gas natural, esta preocupación desapareció.

Apagado de llama. Se conoce como “blow-off”, cuando la llama visible se separa suficientemente del puerto para extinguir la combustión, este es un caso extremo de un desprendimiento de llama y se debe a los motivos asociados con este.

6.2.2 Autoignición del gas²⁴. La temperatura de ignición, es la mínima que debe alcanzar una mezcla combustible/oxidante para que se inicie la combustión y se auto propague. Esta temperatura depende de la composición de la mezcla, la presión y de la presencia de algunas sustancias que pueden disminuir o aumentar el punto de ignición (sensibilizadores e inhibidores respectivamente).

La autoignición consiste en el autoencendido y sostenimiento de la combustión sin una fuente de ignición.

6.2.3 Puntas de llama amarillas²⁵. Un elemento importante para la combustión es el color de la llama, los quemadores de gases naturales están usualmente 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. Este fenómeno es causado por la formación de hollín en el frente primario de llama. Las puntas amarillas no son por si solas una preocupación, siempre que el hollín formado en el frente primario sea quemado en el frente secundario de llama.

²⁴ *Ibidem*. P. 32.

²⁵ *Ibidem*. Pp. 30-31.

El fenómeno de puntas amarillas en intercambiadores de calor, puede causar depósitos de hollín, ya que este puede no quemarse totalmente. Afectando así el desempeño de ellos y su vida útil. Un incremento en el radio de equivalencia acrecentara la tendencia a las puntas amarillas. Sin embargo, la composición del combustible también es un factor, debido a que distintos componentes tienen tendencias diferentes a la formación de hollín.

6.2.4 Generación elevada de contaminantes. Los contaminantes asociados con los problemas de combustión y la intercambiabilidad del gas incluyen producción elevada de CO, hollín y NOX. Se presta especial atención a la producción de monóxido de carbono, toda vez que se considera como el aspecto más sensible de los electrodomésticos con respecto a la intercambiabilidad de gases, puesto que se puede ver afectada la seguridad y el bienestar de los consumidores. Sin embargo, las discusiones técnicas a menudo ignoran las causas de la producción elevada de monóxido de carbono.

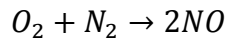
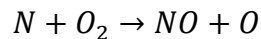
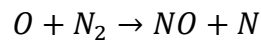
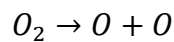
Monóxido de carbono²⁶. La exposición y generación de CO es una preocupación, puesto que en grandes dosis es un veneno agudo hipóxico y es un problema para los equipos no venteados, o venteados, pero trabajando con una aireación ineficiente. La producción de CO no es evaluada directamente por los índices de intercambiabilidad de gases de los Estados Unidos, con la excepción del Índice Incompleto de Combustión de Weaver. La causa más común del incremento de la producción de CO es la insuficiencia de aire secundario para completar la combustión.

A mayor cantidad de hidrocarburos pesados en el combustible, aumentan los requerimientos de oxígeno para completar la combustión. Una elevada producción

²⁶ D.D. Montaña Herrera, Óp. cit. P. 26.

de CO en una operación aplicada, puede ser inferida observando las puntas amarillas de las llamas.

Óxidos de nitrógeno²⁷. Los NO_x son formados durante la combustión de hidrocarburos a través de una variedad de mecanismos. Los NO_x son creados a través de la oxidación del Nitrógeno introducido con la combustión. El mecanismo térmico consiste de tres acciones elementales:



La energía de activación para esta reacción es muy alta (0.137 MBtu/lb-mole) y como consecuencia esta reacción es fuertemente dependiente de la temperatura, ocurriendo a temperaturas mayores de 3950 °F.

6.3 INDICES DE INTERCAMBIABILIDAD

En la actualidad existen diversos métodos para hallar la intercambiabilidad de gases combustibles, en un principio fueron establecidos para gases manufacturados y progresivamente incluyeron el gas natural y el GLP, se basan en el cálculo de magnitudes llamadas “índices de intercambiabilidad” las cuales relacionan las propiedades fisicoquímicas del gas y los fenómenos de combustión, permitiendo una mejor caracterización, y en consecuencia un rango más ajustado y preciso de

²⁷ Zeldovich, Y. B., P. Y. Sadonikov, and D. A. Frank-Kamenetskii. Oxidation of nitrogen in combustion (M. Shelef, Transl.). 1947. USSR. Inst. Chem. Phys., Moscow–Leningrad

intercambiabilidad, asimismo, determinan el comportamiento de la combustión del gas sustituto. Estos métodos se agrupan así:²⁸

Tabla 3. Clasificación de los métodos de intercambiabilidad

Grupo	Se subdividen en:
Métodos de Índices simples	Índice de Wobbe Índice de Wobbe modificado Índice de Willien Índice de Knoy Índice de Schuster Índice C de la AGA
Métodos de Índices múltiples	Índices de la AGA Índices de Weaver
Métodos con Diagramas o Gráficos	Diagrama de Delbourg Diagrama de Gilbert y Priggs Diagrama de Grumer Diagrama de Grumer, Harris and Rowe Ven Krevelen and chermin Diagrama de Dutton Diagrama de Holmqvist Diagrama de Van der Linden
Otros métodos	Método Sommers – Ruhrgas

6.3.1 Métodos de índices simples. Son expresiones empíricas, las cuales relacionan los valores de entrada de energía del gas ajustado y el gas sustituto. Estos representan los primeros intentos por afrontar el tema de la intercambiabilidad de gases combustibles, e incluso en la actualidad algunos tienen vigencia por ejemplo el Índice de Wobbe.

Índice de Wobbe²⁹. Es el índice simple más conocido, fue desarrollado en Italia cerca del año 1927 por ingeniero de gas Goffredo Wobbe, A veces se le denomina

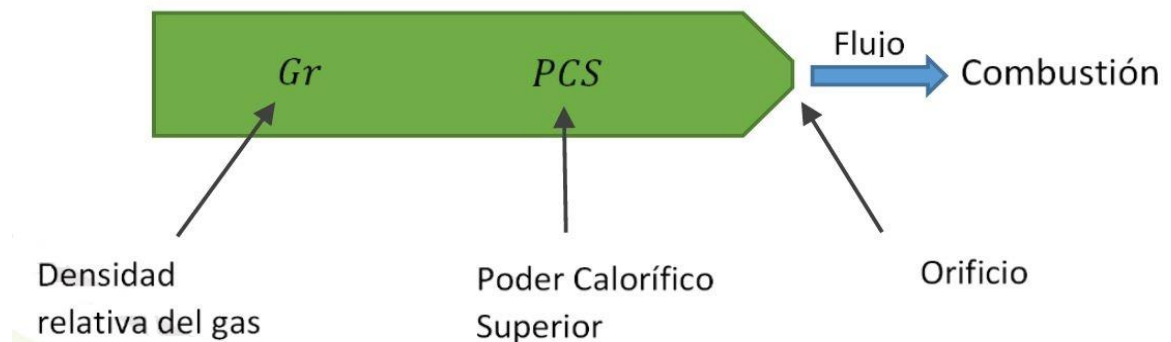
²⁸ D.D. Montaña Herrera, Óp. cit. P. 34.

²⁹ J.M. Ortiz y L. Valero. Óp. cit. P. 17.

“factor de intercambiabilidad”. Se basa en el poder calorífico y la gravedad específica del gas, y su relación con la entrada de energía a un quemador (Btu/hr).

Este índice describe el 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.

Figura 3. Fundamentos de índice de Wobbe³⁰



El flujo de gas en términos de la entrada de energía al quemador ($Q_{Energía}$) equivalente al producto entre el poder calorífico (PC) y el caudal volumétrico (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 (GE).

$$Q_{Energía} = PC * Q_v \qquad Q_v \propto \frac{1}{\sqrt{GE}}$$

Usando las 2 ecuaciones anteriores, Wobbe estableció una proporcionalidad y desarrolló lo que hoy conocemos como índice de Wobbe.

³⁰ Ídem

$$Q_{Energia} \propto \frac{PCS}{\sqrt{GE}} = \text{Indice de Wobbe (IW)}$$

IW representa entonces la energía de un gas inyectada a un quemador, y a partir de este planteamiento Wobbe formuló las siguientes conclusiones:

- Considerando un quemador con diámetro y presión del inyector constantes la energía que suministra es directamente proporcional al caudal volumétrico de gas que ingresa.
- 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.

La gran utilidad del índice de Wobbe (IW), consiste en que, para cualquier orificio, todos los gases con el mismo IW van a suministrar la misma cantidad de energía.

En la norma española UNE 60.002 se clasifica los combustibles gaseosos según el índice de Wobbe en familias.

Tabla 4. Clasificación combustibles gaseosos

Familia de Gases	Descripción	Grupo	Índice de Wobbe [MJ/m³]
Primera Familia	Incluye los gases manufacturados (grupo a) y otros	Grupo a	22.4 – 24.8
		Grupo b	22.36 – 27.64
		Grupo c (aire propanado)	23.84 – 24.07
		Grupo d	19.13 – 24.15

Tabla 4. Continuación

Familia de Gases	Descripción	Grupo	Índice de Wobbe [MJ/m ³]
Primera Familia	Incluye los gases manufacturados (grupo a) y otros	Grupo e (aire metanado)	21.07 – 22.93
		Grupo H	45.7 – 54.7
		Grupo L	39.1 – 44.8
		Grupo E	40.9 – 54.7
		Grupo B/P	72.9 – 87.3
		Grupo P	72.9 – 76.8
		Grupo B	81.8 – 87.3

Índice de Wobbe modificado³¹. El índice de Wobbe toma un papel central en las especificaciones del combustible de las turbinas a gas. Solamente hay una diferencia con el índice de Wobbe modificado, definido como:

$$IW_{mod} = \frac{PCI}{\sqrt{GE * T_{gas}}}$$

Donde T_{gas} es La temperatura en rankine del gas a la entrada de la tobera de combustible y se usa el poder calorífico inferior (neto), en lugar de usar el poder calorífico superior (Bruto). La corrección por temperatura refleja el hecho de que el gas combustible es precalentado previamente a ser mezclado con el aire, para prevenir la condensación de líquidos e incrementar la eficiencia de las plantas de ciclo combinado. Normalmente las temperaturas varían entre 80°F y 360°F.

Los fabricantes de turbinas usan el PCI por que los gases de exhosto dejen la turbina con el agua en fase vapor.

³¹ D.A. Flórez, Óp. cit. P. 8.

Índice de Willien³². Fue desarrollado en Estados Unidos en el Año 1938 y se basa en cuatro consideraciones, las cuales se enunciarán a continuación:

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

$$F = \frac{PCS(GE_a)^{1/2}}{(GE_a)^{1/2} + \left(\frac{PCS_a - 175}{175}\right)(GE)^{1/2}}$$

Donde:

PCS: Poder calorífico superior

GE: Gravedad específica

El subíndice “a”: Relaciona el gas de ajuste o referencia

Este método fue aplicado a 131 gases manufacturados de diferente composición. Se concluyó que la operación satisfactoria se conseguía cuando los gases poseen un poder calorífico entre 165 y 185 Btu/ft³. Con respecto al factor F se determinó

³²J. A. Hernández y J. H. Cortés, Validación de la intercambiabilidad de gases en el contexto colombiano, Medellín: Universidad de Antioquia, 2003.

que para valores menores de 165 Btu/ft³, los quemadores afectados tendrían retroceso, mientras para valores superiores a 185 Btu/ft³ la combustión incompleta era inminente.

Entre las desventajas que este método posee, son que está restringido a gases con poderes caloríficos muy bajos y que no considera fenómenos al interior de la llama como la velocidad de deflagración.

Como criterio de intercambiabilidad se puede decir que 2 o más gases son intercambiables si su número F se encuentra entre 160 y 190.

Índice de Knoy^{33 34}. Fue desarrollado en estados unidos por Frank Knoy en 1940, quien tomó la relación de Willien y la adapto para mezclas GLP- aire, las cuales servirían para sustituir a gases manufacturados y gases naturales. Knoy asume que la mezcla aire-gas en el cabezal del quemador atmosférico tiene un poder calorífico de 175 Btu/ft³, derivando la expresión:

$$C_{Knoy} = \frac{H - 175}{\sqrt{S}}$$

Donde S es densidad relativa del gas y H es el poder calorífico superior. Se asume que los gases que tengan el mismo valor de la constante serán intercambiables, Sin embargo, si la composición del gas sustituto no se acerca a la del gas ajuste, los resultados de este método, pueden ser erróneos. Una desviación del índice de $\pm 5\%$ se considera satisfactoria y una desviación superior a $\pm 10\%$ es considerada inaceptable.

³³D.D. Montaña Herrera, óp. cit, P. 36

³⁴ J.M. Ortiz y L. Valero, óp. cit, P. 19-20.

Índice de Schuster³⁵. Desarrollado en Alemania, el índice de Schuster se deriva de la consideración del balance entre la velocidad de suministro de calor y la tasa de producción de calor, siendo estos representados por el índice de Wobbe (IW) y velocidad de deflagración (S_u) respectivamente, presenta un primer intento en medir los efectos en la combustión al variar la composición del combustible, sin limitarse tan solo al flujo de energía de entrada del combustible.

$$S_c = \frac{IW}{S_u}$$

El criterio de intercambiabilidad de este método plantea que dos o más gases son intercambiables, si el cálculo de su número de Schuster es igual. Aunque su uso estuvo limitado a la poca disponibilidad de velocidades de deflagración confiables en el momento de su desarrollo.

Índice C de la A.G.A³⁶. La Asociación Americana del Gas en 1933, terminó un proyecto de investigación sobre la intercambiabilidad para gases con poderes caloríficos menores a 750 Btu/ft³. Este proyecto incluyó aproximadamente 175000 pruebas independientes, la preparación y evaluación de diferentes mezclas de gas.

Se determinó que para gases con poder calorífico inferior a 750 Btu/ft³. La fórmula desarrollada para calcular el “índice de cambio en el desempeño del equipo”, C , está dada por la siguiente expresión:

$$C = \frac{H_s B_s G_a}{H_a B_a G_s} + \left(\frac{H_a B_a}{5000 E_a F_a} - \frac{H_s B_s}{5000 E_s F_s} \right)$$

Donde:

³⁵ Ídem

³⁶ Ibídem. P.21.

C: Es el índice de cambio de desempeño del equipo

H: Es el poder calorífico del gas en Btu por pie cúbico

B: Es la relación de aire requerido teóricamente para la combustión en pies cúbicos de aire por pies cúbicos de gas

G: Es la densidad relativa del gas (Aire = 1)

E: Es el contenido calórico de los productos de combustión desde 60°F hasta 1600°F, en Btu por pie cúbico

F: 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

Los subíndices *a* y *s* son el gas de ajuste y el gas sustituto, respectivamente.

Como criterio de intercambiabilidad podemos decir que dos o más gases son intercambiables si el cálculo del número *C* se encuentra entre 0.85 y 1.15. Sin embargo, en la práctica se admite una desviación, ampliando el rango entre 0.75 y 1.225. Podemos agregar que para valores de $C > 1$ se presenta el fenómeno de combustión incompleta y para valores de $C < 1$, el retroceso de llama.

6.3.2 Métodos de índices múltiples. Fueron desarrollados en Estados Unidos en 1940. Debido a que los métodos simples, están basados en la entrada de energía al artefacto, estos métodos incluyen fenómenos fundamentales de la combustión, como la estabilidad de llama, puntas amarillas y combustión incompleta. En este grupo tenemos los índices de la Asociación Americana del Gas AGA por sus siglas en inglés y los índices de Weaver.

Índices de la A.G.A.³⁷. Fueron desarrollados con la intención de enfrentar el problema de la intercambiabilidad para los gases manufacturados, comprenden los índices de desprendimiento, retroceso y puntas amarillas, basados en las mediciones realizadas en un quemador de precisión. Las mediciones involucraron el gas natural como combustible base y una amplia variedad de combustibles sustitutos. Son fundamentalmente modelos empíricos puros obtenidos y se presentan a continuación:

Tabla 5. Índices múltiples A.G.A

Índice de desprendimiento de llama	$I_L = \frac{K_a}{\frac{f_a A_s}{f_s A_a} \left(K_s - \log \frac{f_a}{f_s} \right)}$
Índice de retroceso de llama	$I_F = \frac{K_s f_s \sqrt{\frac{h_s}{1000}}}{K_a f_s}$
Índice de puntas amarillas	$I_y = \frac{f_s A_a Y_a}{f_a A_s Y_s}$

Donde:³⁸

K : Constante límite de desprendimiento = F/d

f : Factor de aire primario = $\frac{1000\sqrt{d_a}}{h_a}$

A : Pies cúbicos de aire teóricamente requeridos para la combustión completa por 100 Btu

h : Poder calorífico superior (Btu/ft³)

³⁷ J. A. Hernández y J. H. Cortés, Óp. cit. P. 25.

³⁸ J.M. Ortiz y L. Valero, óp. cit, P. 24.

$$Y: \text{Límite de puntas amarillas (porcentaje de aire primario)} = \frac{100T}{A_a + 7E_a - 26.3 O_{2a}}$$

d : Densidad relativa

F : Constante de desprendimiento

T : Constante de puntas amarillas

O_2 : Oxígeno contenido por pie cúbico

a y s : Subíndices que designan gas de ajuste y gas sustituto, respectivamente

Tabla 6. Límites de intercambiabilidad para varios gases³⁹

Índices de intercambiabilidad	GN alto poder calorífico		GN alto contenido de metano		GN con alto contenido de inertes	
	Preferibl	Objetabl	Preferibl	Objetabl	Preferibl	Objetabl
	e	e	e	e	e	e
I_L	<1.00	>1.12	<1.00	>1.06	<1.00	>1.03
I_F	<1.18	>1.20	<1.18	>1.20	<1.18	>1.20
I_Y	>1.00	<0.70	>1.00	<0.80	>1.00	<0.90

Los límites objetables corresponden a valores que proveen 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.⁴⁰

Índices de Weaver⁴¹. Elmer R. Weaver desarrolló en 1951 un conjunto de 6 índices, apoyado en los trabajos desarrollados por la AGA, Frank Knoy y otras

³⁹ Idem

⁴⁰ ISO, UNE-EN-ISO 13686 Gas natural designación de la calidad, 2014

⁴¹ J. M. Ortiz, Fundamentos de Intercambiabilidad del Gas Natural, MET&FLU, vol. 9, pp. 6-15, 2014

investigaciones; lo novedoso de este trabajo fue que introdujo aspectos como la velocidad de deflagración y la combustión incompleta. Además, sus índices mostraron mayor confiabilidad que el método de la AGA para los gases de bajo poder calorífico.

Los índices de Weaver se presentan en la *tabla 7*. Con estos índices se puede conformar un marco referencial para intercambiabilidad mucho más completo que el uso del índice de Wobbe simple o combinado con otra propiedad (ilustración 3). Está limitado por el tipo de quemadores y de mezclas que fueron usados 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 más modernos. En lo que respecta a los tipos de gas, en ese momento existía una fuerte dependencia del gas manufacturado, con alto contenido de hidrógeno, hoy en día es un componente prácticamente ajeno al gas natural, por lo que las mezclas usadas en los experimentos no son muy representativas para las necesidades actuales.

Figura 4. Marco de referencia para intercambiabilidad según los índices AGA y Weaver⁴²

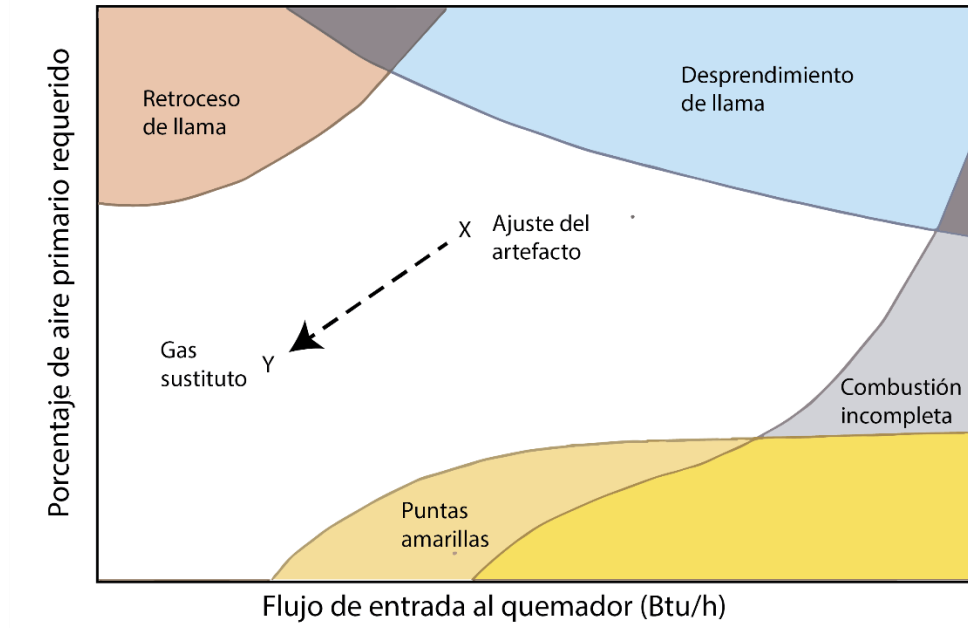


Tabla 7. Índices de Weaver⁴³

Índice	Ecuación	Descripción	Rango aceptable
Índice de entrada de calor (J_H)	$J_H = \frac{H_s \sqrt{D_a}}{H_a \sqrt{D_s}}$	H es el poder calorífico (Btu/ft ³) D es la densidad relativa del gas.	$0.925 < J_H < 1.075$
Índice de aireación primaria (J_A)	$J_A = \frac{A_s \sqrt{D_a}}{A_a \sqrt{D_s}}$	A es el volumen de aire [ft ³] requerido para la combustión completa de 1 ft ³ de gas.	$J_A = 1$

⁴² Ídem.

⁴³ J.M. Ortiz y L. Valero, óp. cit, P. 25.

Tabla 7. Continuación

Índice	Ecuación	Descripción	Rango aceptable
Índice de desprendimiento de llama (J_L)	$J_L = J_A \frac{S_s}{S_a} \frac{100 - Q_s}{100 - Q_a}$	Q es el porcentaje de contenido de oxígeno en el gas. 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	$J_L > 0.46$
Índice de retroceso de llama (J_F)	$J_F = \frac{S_s}{S_a} - 1.4J_A + 0.4$		$J_F < 0.12$
Índice de puntas amarillas (J_V)	$J_V = J_A \frac{N_s - N_a}{110} - 1$	N es el número de átomos de carbono liberados fácilmente por cada cien moléculas de gas.	$J_V < 0.21$
Índice de combustión incompleta (J_I)	$J_I = J_A - 0.366 \frac{R_s}{R_a} - 0.634$	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.	$J_I < 0.0$

Nota: El subíndice "a" se refiere al gas de ajuste y el "s" se refiere al sustituto

Las constantes de los índices son definidas a continuación

$$S = \frac{aF_a + bF_b + cF_c + \dots}{A + 5Z - 18.8Q + 1}$$

a, b, c, \dots , son las fracciones volumétricas de los diferentes combustibles que constituyen el gas; F_a, F_b, F_c son los valores correspondientes del coeficiente F ; Z y Q son las fracciones volumétricas de los gases inertes, principalmente dióxido de carbono y nitrógeno y la cantidad de oxígeno en el combustible.

Tabla 8. Propiedades de gases usados para calcular la intercambiabilidad por el método de Weaver⁴⁴

Gas	Formula química	H	D	A	F	a	J
Monóxido de carbono	CO	315.3	0.97	2.39	61	-----	0
Hidrogeno	H ₂	318.5	0.07	2.39	339	-----	0
Metano	CH ₄	994.1	0.55	9.55	148	-----	1
Etano	C ₂ H ₆	1757	1.04	16.71	301	0.95	2.85
Propano	C ₃ H ₈	2535	1.56	23.87	398	0.95	4.80
Butano	C ₄ H ₁₀	3330	2.09	31.03	513	1.10	6.80
Etileno	C ₂ H ₄	1572	0.97	14.32	454	1.75	2.65
Propileno	C ₃ H ₆	2337	1.45	21.48	674	1.25	4.80
Acetileno	C ₂ H ₂	1464	0.91	11.93	776	3	2.40
Benceno	C ₆ H ₆	3700	2.70	35.79	920	0.90	20
Nitrógeno atmosférico	N ₂	-----	0.97	-----	-----	0	0
Dióxido de carbono	CO ₂	-----	1.53	-----	-----	0	0
Oxigeno	O ₂	-----	1.11	(-4.78)	-----	0	0
Aire	-----	-----	1.00	-----	-----		

H: Poder calorífico

D: Densidad relativa

A: Aire requerido para la combustión

F: Factor de velocidad de llama

⁴⁴ Ídem.

a: potencial de combustión

J: Índice de puntas amarillas

6.3.3 Métodos gráficos (diagramas). Los países europeos tienen a determinar la intercambiabilidad de un gas de una forma gráfica. En este método se usan graficas en un plano cartesiano, donde el eje Y suele ser el índice de Wobbe y, en el eje X, el índice de Wobbe modificado u otro valor que tenga en cuenta los cambios en las propiedades o composición del gas combustible.

La gran ventaja de los métodos gráficos es que el grado del potencial intercambiable puede ser determinado en un diagrama, según la posición del gas sustituto con respecto al de ajuste y las líneas límites de desempeño en combustión.

La forma de definir si dos gases son intercambiables es si ambos se encuentran dentro del área establecida por los diagramas.

Diagrama de Delbourg⁴⁵. Es un método creado en Francia, este define gráficamente el área aceptable de intercambiabilidad entre los gases de una misma familia, se desarrolló en 1953 y se empezó a construir a partir de los datos del índice modificado de Wobbe en uno de sus ejes y el potencial de combustión en el otro. Fue desarrollado para gases de la primera familia y segunda familia (*ver Tabla 4*), los cuales fueron probados en un quemador tipo Bruleur para caracterizar equipos residenciales franceses y quemadores industriales.

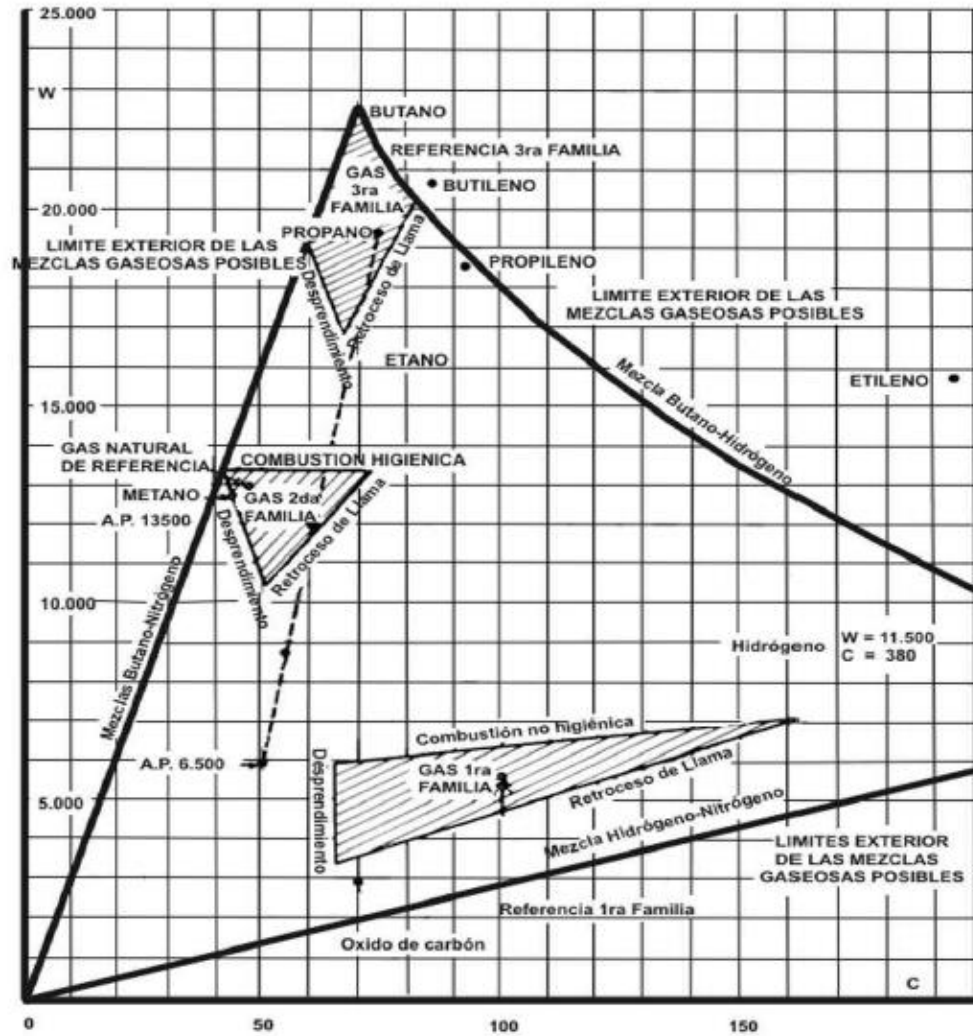
Delbourg agrupa 3 familias de gases combustibles como se muestra en la figura 4 cada gas se ubica mediante coordenadas rectangulares en un punto del diagrama. Por simple comparación entre un punto de un gas con aquella del gas para el cual

⁴⁵ *Ibíd.* P. 33.

el equipo fue ajustado, puede saberse inmediatamente el tipo de inconvenientes que pueden ocurrir al reemplazar el gas base por el gas sustituto. La gran ventaja de este método es que nos permite ver la situación, pues entre más alejado está del punto del gas base, más probabilidad hay de que ocurran defectos como la combustión no higiénica, desprendimiento de la llama, retrollama y la insuficiencia de entrada de calor.

Delbourg afirma que dos gases de diferentes familias nunca pueden ser intercambiables (mínimo requiere un cambio de inyectores), por lo tanto se considera que el problema de intercambiabilidad está restringido a gases de una misma familia.

Figura 5. Representación gráfica de Delbourg⁴⁶



A continuación, se detallan las ecuaciones para calcular los índices según el método de Delbourg

- Índice de Wobbe corregido

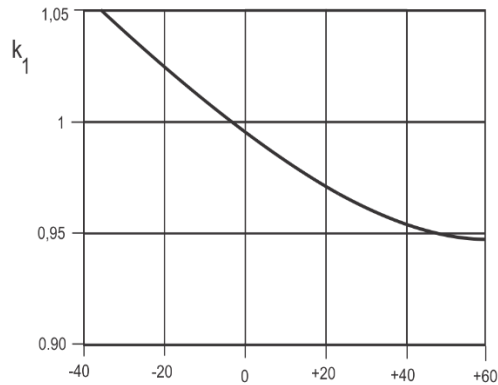
$$W' = K_1 * K_2 * \frac{PCS}{\sqrt{d}} = K_1 * K_2 * IW$$

⁴⁶ D.D. Montaña Herrera, óp. cit, P. 42.

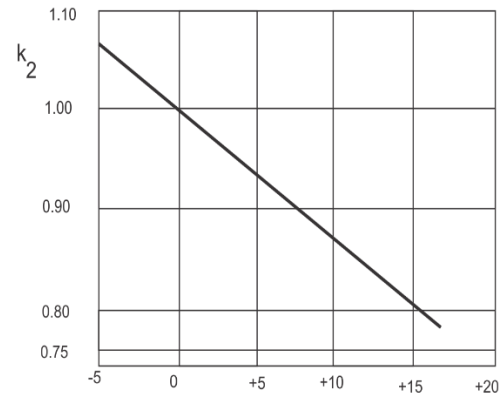
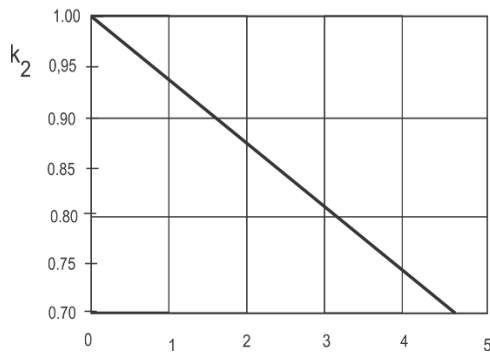
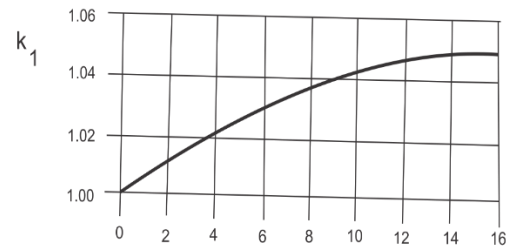
Los coeficientes K_1 y K_2 se muestran en la siguiente figura para la primera y segunda familia

Figura 6. Los coeficientes K_1 y K_2 se muestran en la siguiente figura para la primera y segunda familia⁴⁷

CALCULO DEL NUMERO DE WOBBE
(1 Familia)



CALCULO DEL NUMERO DE WOBBE
(2 Familia)



El potencial de combustión “c” o índice de Delbourg, es un número que caracteriza la velocidad de combustión, el cual se asemeja a la velocidad de deflagración laminar, pero es más fácil de calcular. Este viene dado por la expresión

⁴⁷ D.A. Flórez, Óp. cit. P. 22.

$$C = u \frac{H_2 + 0.7CO + 0.3CH_4 + v \sum aC_nH_m}{\sqrt{d}}$$

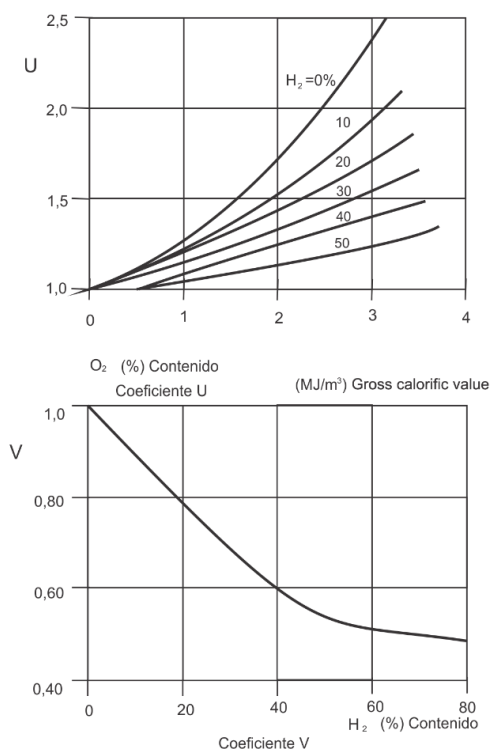
Donde:

u, v = parámetros que dependen del contenido O₂ e H₂ del gas, se hallan gráficamente según la familia (figura 5)

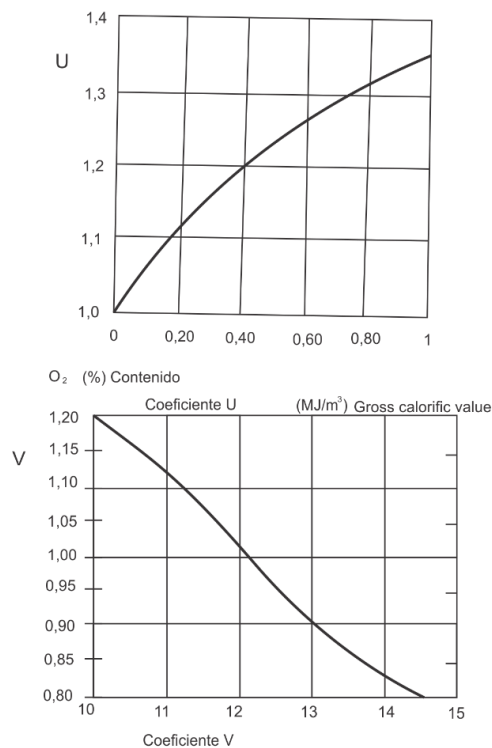
a: Coeficiente específico para cada hidrocarburo mostrado en la Tabla 8

Figura 7. Coeficientes u y v para hallar el índice de Delbourg⁴⁸

CALCULO DEL POTENCIAL DE COMBUSTIÓN
(1 FAMILIA)



CALCULO DEL POTENCIAL DE COMBUSTIÓN
(2 FAMILIA)



⁴⁸ Ídem.

Los índices de intercambiabilidad secundarios usados son:

El índice de puntas amarillas (I_j) y el índice de formación de hollín (I_{ch}) los cuales serán descritos a continuación

Índice de puntas amarillas:

$$I_j = \frac{\sum(j * A)}{\sqrt{d}} \left(1 - 0.418 \frac{O_2}{H}\right)$$

Donde:

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

d : densidad relativa

Índice de formación de hollín:

$$I_{ch} = \frac{1 + 0.01H_2 + 0.01CO}{\sqrt{d}} \sum b * A * (1 - 0.013O_2)$$

Donde:

a , b y j son propiedades calculadas para cada hidrocarburo en particular

Diagrama de Gilbert y Priggs⁴⁹. Es un método gráfico desarrollado en el Reino Unido por Gilbert y Prigg en 1956, en un principio para los gases de la primera familia. Posteriormente fue adoptado y adaptado para realizar estudios de predicción sobre las características de la combustión de los gases de la segunda familia en Gran Bretaña, con las investigaciones de Harris y Lovelace y Harris y Wilson.

Este diagrama está basado en el índice de Wobbe en función del factor de velocidad de llama de Weaver y proporciona los límites para desprendimiento de llama, combustión incompleta y retroceso, y se complementa con un quemador de prueba para caracterizar hollín. Para delimitar los límites con relación al gas de ajuste se empleó un quemador estándar, el desprendimiento de llama se estableció aumentando la presión de suministro hasta generar el levantamiento de la llama sobre la cabeza del quemador, sin que esta se apagara. El límite de retroceso se determinó obstruyendo la aireación primaria. Con el paso del tiempo este método ha sido usado con algunas modificaciones en el cálculo de los valores en los ejes y las líneas límites. Los valores usados varían dependiendo de los gases usados, la aplicación o el país. Este método gráfico ha sido acogido por los Estados Unidos, en parte porque la composición doméstica del gas natural ha sido bastante constante. En este diagrama los gases se distribuyen en cuatro grupos y a cada uno le corresponde una gráfica de intercambiabilidad como se observa a continuación.

⁴⁹ J.M. Ortiz y L. Valero, óp. cit, P. 32.

Figura 8. Diagrama de predicción de intercambiabilidad de Gilbert-Prigg, modificado por Harris/Lovelace y Harris/Wilson⁵⁰

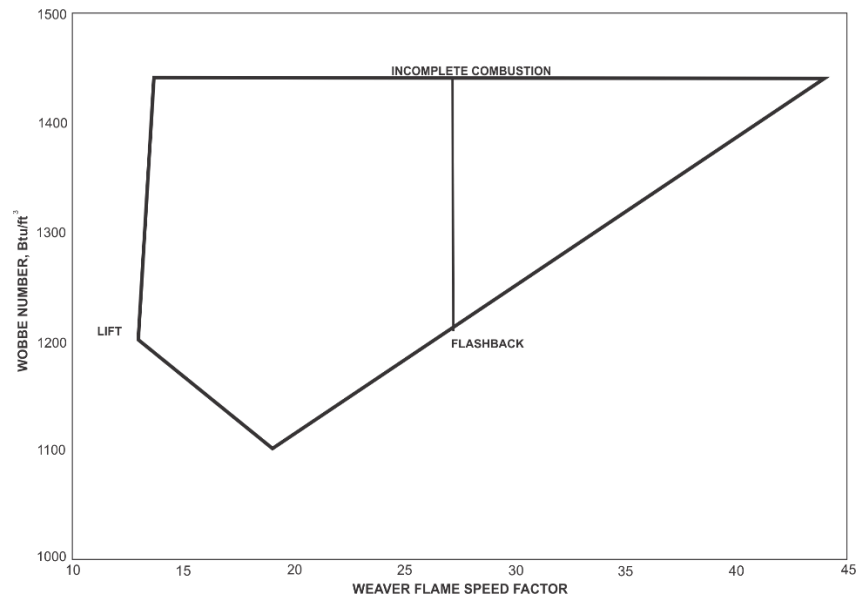


Diagrama de Holmqvist⁵¹. Es un método gráfico desarrollado en Suecia en 1957, ese se basa en la caracterización del número C_k , relacionando este con la altura del cono azul en la llama de un quemador estándar.

$$C_k = \frac{K_i \sum X_i * X_{ki}}{\sqrt{S}}$$

Donde

X_i : Concentración volumétrica del componente i

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

S : Gravedad específica del gas

⁵⁰ Ídem.

⁵¹ J. A. Hernández y J. H. Cortés, Óp. cit. P. 43.

Ki: Factor de corrección según la concentración de gases inertes.

Figura 9. Factor de corrección de Ck y diagrama de predicción de Holmqvist⁵²

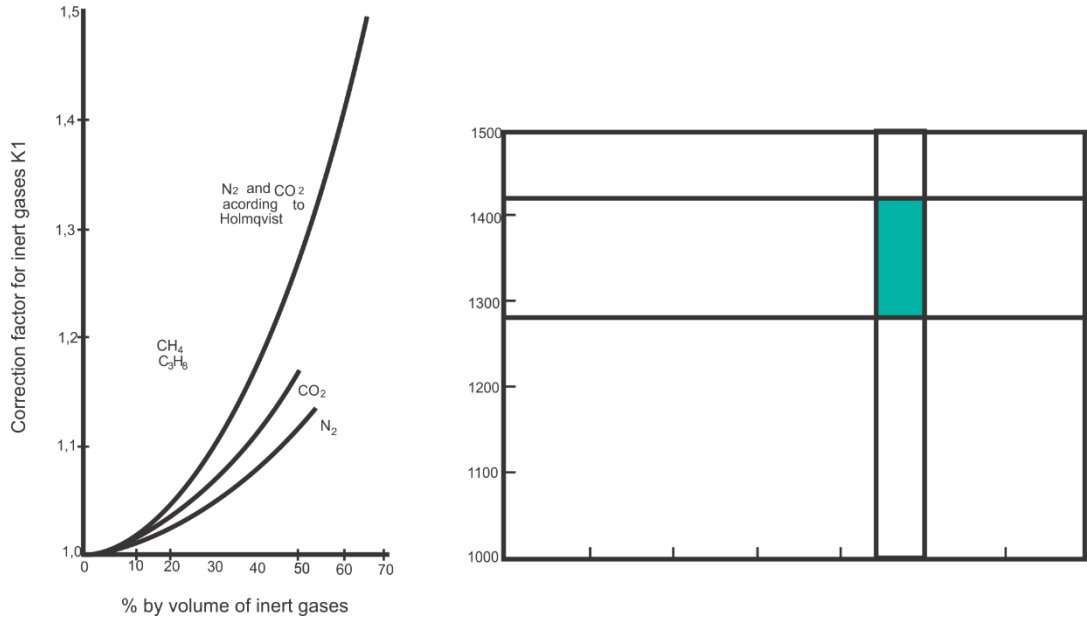


Diagrama de Grumer, Harris and Rowe⁵³. Es un método que fue desarrollado en 1956 en los Estados Unidos, este propone un diagrama de estabilidad de llama, basándose en el gradiente crítico de velocidad límite y el desempeño con la entrada de aire. El concepto de gradiente crítico de velocidad límite fue propuesto por Lewis y Von Elbe como propiedad fundamental de la mezcla aire-gas, independiente de las dimensiones del quemador.

Las mediciones de los gradientes límites de velocidad para desprendimiento (g_B) y retroceso (g_F) fueron determinadas empleando tubos cilíndricos largos, de manera experimental. En la figura se muestran los comportamientos para diferentes combustibles.

⁵² Ídem

⁵³Íbidem, P. 34.

Figura 10. Diagrama de estabilidad de llama de Grumer⁵⁴

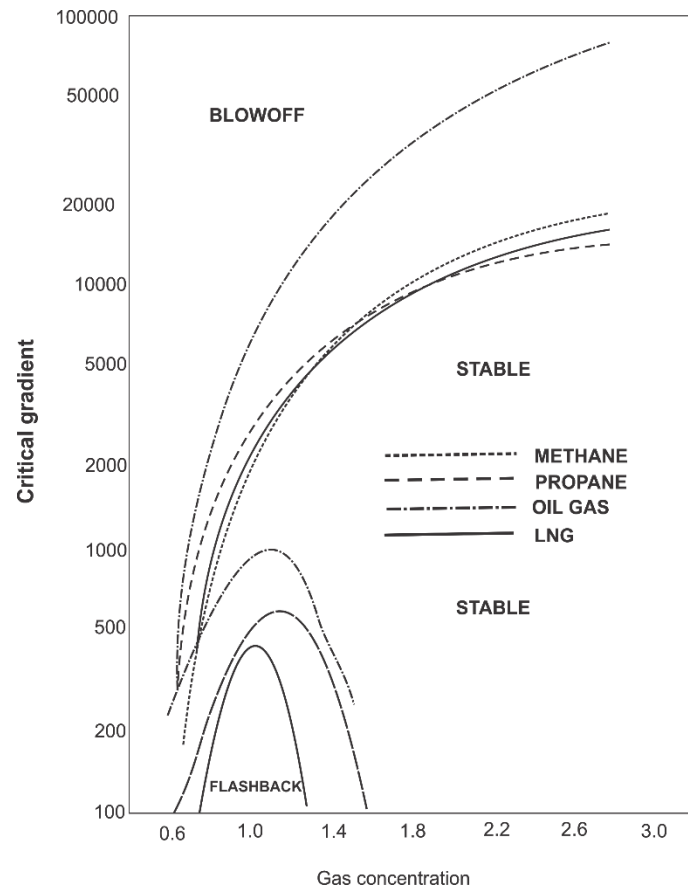


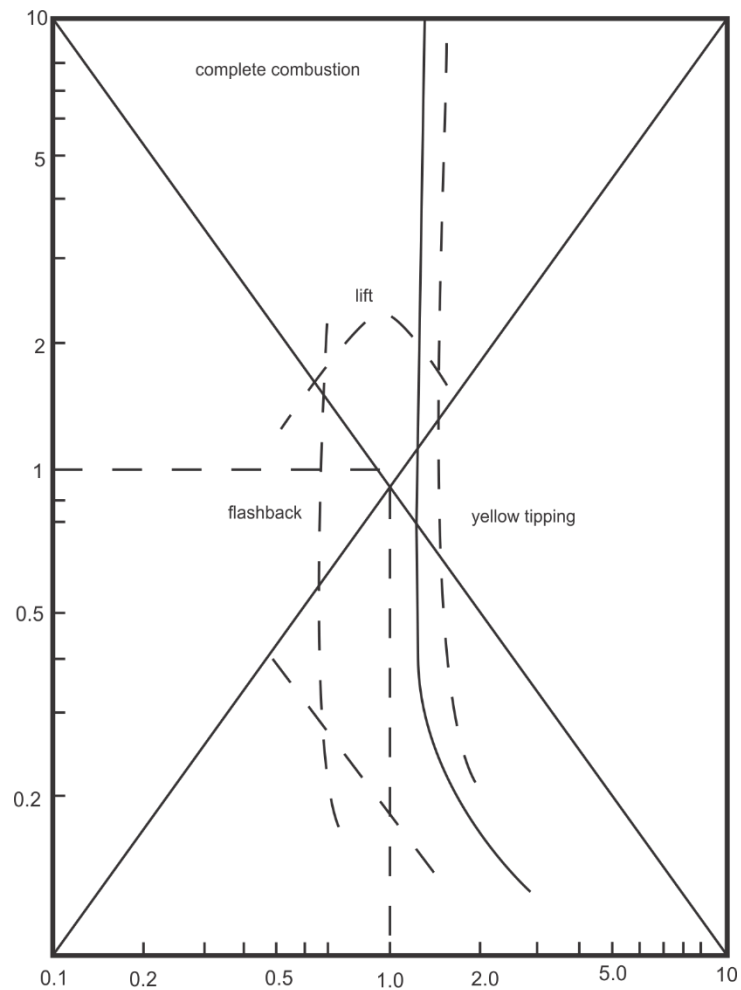
Diagrama de Van der Linden⁵⁵. Fue desarrollado en Holanda en 1970, es un método gráfico aplicable a quemadores residenciales e industriales europeos. El diagrama se basa en el diámetro del inyector, la presión de suministro del gas y el índice de Wobbe. Este diagrama no representa las variaciones de velocidad de deflagración relacionadas con los cambios de composición en el gas.

Para un quemador y un gas particular, se puede derivar en líneas que representarían los límites del fenómeno de combustión. Como se muestra en la figura.

⁵⁴ Ídem

⁵⁵ Ibídem. P .43

Figura 11. Diagrama típico de Van Der Linden⁵⁶



Para caracterizar un gran volumen de equipos de combustión, es necesario realizar un trabajo experimental extensivo con los diferentes gases y con los quemadores más críticos, limitando significativamente su aplicabilidad. Este diagrama permite por una parte deducir si un gas con alto o bajo índice de Wobbe podría ser aceptado sin ajuste en el quemador y por otra parte permite cuantificar el cambio en la presión o en el diámetro del inyector requerido para un aceptable suministro de gas sustituto.

⁵⁶ Idem

Ven Krevelen and chermin⁵⁷. Fue un método desarrollado en 1958, a partir del análisis de mezclas de metano, etano, propano, hidrogeno, nitrógeno, dióxido de carbono y monóxido de carbono. Se ajusta a quemadores atmosféricos industriales y residenciales.

Harris-Lovelace⁵⁸. En el Reino unido por el año 1964, Harris y Lovelace mostraron un diagrama modificado para incluir la entrada del gas natural en Inglaterra y potencial futuro del gas natural sintético (SNG). Casi 15 años después en el año 1978, su enfoque fue pulido por Dutton.

Harris-Wilson⁵⁹. En 1974 en el Reino Unido fue desarrollado este método, siendo enfocado hacia gases naturales, GNL y Syngas, siendo aplicable a quemadores atmosféricos y los equipos británicos.

France⁶⁰. Desarrollado en el 1976 en el Reino Unido, Se buscó representar gas natural, gases manufacturados y gases naturales sintéticos, su estudio fue hecho en quemadores de laboratorio para ser más exacto en unos tubos cilíndricos extensos.

Diagrama de Dutton⁶¹. Los métodos desarrollados anteriormente empleaban diagramas en dos dimensiones en donde uno de sus ejes correspondía a una función relacionada con la velocidad de quema y el otro al índice de Wobbe o alguna derivación de este. Por ejemplo, el método de Gilbert y Prigg que usa el factor de velocidad de llama de Weaver. Estos métodos resultaban satisfactorios para gases manufacturados donde las variaciones en el desempeño de los equipos se atribuyen

⁵⁷ J.M. Ortiz y L. Valero, Óp. cit, P. 34.

⁵⁸ Ídem.

⁵⁹ Ídem.

⁶⁰ Ibídem. P. 28.

⁶¹ J.M. Ortiz y L. Valero, Óp. cit, P. 34

a las variaciones en el contenido de hidrogeno y por lo tanto a la velocidad de quema de una mezcla de gases.

Por otro lado, los gases naturales tienen muy pequeñas variaciones en la velocidad de quema o en el factor de velocidad de llama de Weaver.

En 1980 en el Reino Unido, Geoffrey Dutton desarrolló un método aplicable específicamente para gas natural, así como para gases con contenido de hidrógeno y sus respectivas mezclas. Este método reconocido como “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 Índice de Wobbe 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, correspondientemente.

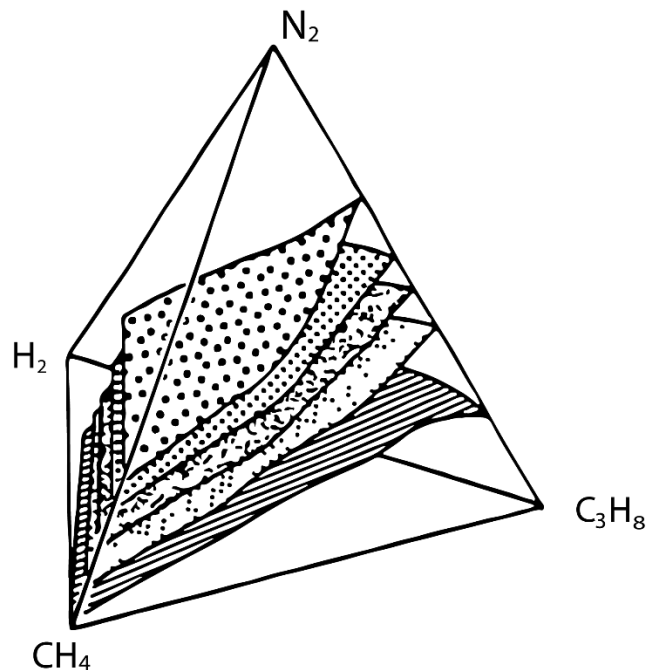
Las investigaciones de Dutton se apoyaron en los fenómenos de combustión asociados a la llama del quemador, es particular la temperatura de llama y la velocidad de la combustión, a lo cual agregó los efectos sobre los artefactos de combustión.

La idea era crear un método sencillo de usar por las empresas vinculadas a la cadena de 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 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 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 empíricos.

Figura 12. Tetraedro de Dutton⁶²



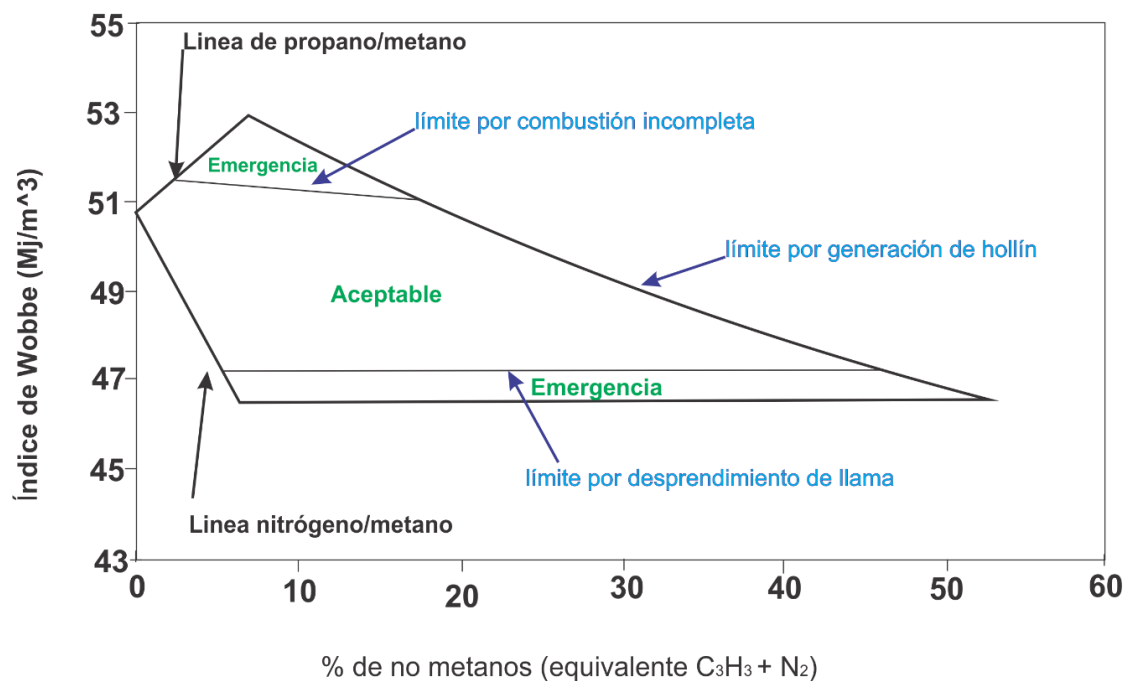
El tetraedro intersectado por las diversas superficies va a corresponder entonces a un “volumen de intercambiabilidad”, no obstante, la enorme mayoría de los gases naturales no contiene hidrógeno, entonces el diagrama se simplifica pasando a ser

⁶² Idem.

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).

A continuación, 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 observar, las líneas límite 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 (límite superior), generación de hollín (límite derecha) y desprendimiento de llama (límite inferior).

Figura 13. Tetraedro de Dutton con uso de mezclas equivalentes⁶³



⁶³ Idem.

6.3.4 Otros métodos

Método Sommers – Ruhrgas⁶⁴. Fue desarrollado en Alemania en 1973, propone que dos gases son intercambiables si se permiten cambios limitados en la potencia de entrada a condiciones de presión constante y sin hacer ajustes en el quemador.

Su aplicación está restringida a gases de la segunda familia (*Tabla 4*) y no contempla criterios de estabilidad de llamas.

Tomando como base este método Sommers demostró que cambiar gas natural “L” por gas natural “H” a presión constante, no involucra cambios apreciables en el gasodoméstico. No obstante, la potencia se reduce un 16%.

⁶⁴J. A. Hernández y J. H. Cortés, Óp. cit, P. 40.

7. MARCO LEGAL⁶⁵ ⁶⁶

En este capítulo se presentan los principales documentos normativos que se han consolidado en relación con la calidad del gas y su capacidad de intercambio a forma de recuento, puesto que con la globalización, se ha hecho necesario establecer normas y estándares de calidad de gas internacionales los cuales permiten la comercialización de los gases sin que se afecte el desempeño operacional de los equipos en términos de su eficiencia, seguridad, emisiones al ambiente, e integridad de las redes.

7.1 INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO)

Es una organización no gubernamental localizada en Ginebra (Suiza), con una membresía de 162 organismos nacionales de normalización.

Ésta, a través de sus miembros, reúne a expertos para compartir conocimientos y desarrollar estándares internacionales, basados en el consenso y relevantes para el mercado, que apoyen la innovación y proporcionen soluciones a los retos globales. A continuación, se presentará una compilación de las normas ISO que nos conciernen al tema y una breve descripción.

ISO 6143: 2001. Análisis de gases: métodos de comparación para determinar y verificar la composición de las mezclas de gases de calibración.

ISO 6327: 1981. Gas natural: determinación del punto de rocío del agua gas natural - Humectadores de condensación de superficie refrigerada.

⁶⁵ International Organization for Standardization. En línea. <https://www.iso.org/about-us.html> (consultado octubre 9 de 2017).

⁶⁶ BP, IGU, Guidebook to gas interchangeability and gas quality, 2011.

ISO 6568: 1981. Gas natural: análisis simple por cromatografía de gases.

ISO 6570: 2004. Gas natural: determinación de hidrocarburos líquidos potenciales contenido - Métodos gravimétricos.

ISO 6976: 1995. Gas natural - Cálculo de valores caloríficos, densidad, relativa densidad y el índice de Wobbe de la composición.

ISO 7504: 2001. Análisis de gas - Vocabulario.

ISO 13443: 1995. Gas natural: condiciones de referencia estándar.

ISO 13686: 2005. Gas natural: designación de calidad.

ISO 14532: 2001. Gas natural - Vocabulario.

ISO 16664: 2004. Análisis de gases: manejo de gases de calibración y gases mezclas - Directrices.

ISO/TR 22302:2014. Natural gas – Calculation of methane number

7.2 NORMAS ESTADOUNIDENSES

Gas Processors Association GPA 2172-96. “Poder calorífico superior, Densidad Relativa y Compresibilidad

Factor para Mezclas de Gas Natural para Análisis Composicional”

AGA Report 4^a. Destaca los parámetros de calidad de gas y las mediciones que deben ser consideradas durante las negociaciones de tarifas y/o contratos.

AGA Report 5. Este informe se publica para fomentar el consenso entre las partes involucradas en la medición basada en la energía del gas natural.

American Gas Association AGA Research Bulletin 36: Intercambiabilidad de otros gases combustibles con gases naturales.

8. CONCLUSIONES

La intercambiabilidad de los gases es un aspecto de vital importancia para la seguridad en el consumo del gas natural, en especial ante la futura apertura de las importaciones de gas natural licuado en Colombia, situación que traerá grandes beneficios y diversidad en las composiciones del gas que entra a la red.

El Índice de Wobbe es un parámetro sencillo e importante para evaluar la intercambiabilidad de gases y es usado ampliamente en todo el mundo, sin embargo, no es capaz de predecir por sí solo, todos los aspectos como fenómenos de combustión indeseados y variación en las emisiones, por lo cual debe ser usado en las combinaciones con otros índices o parámetros de intercambiabilidad.

El Diagrama 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.

Los índices múltiples de AGA y Weaver, en los cuales 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 se configura el artefacto de combustión para operar. Su aplicación es muy compleja y además, la mayoría de los gases y los quemadores usados en los experimentos en dicha época no son un buen reflejo de la actualidad de la industria del gas natural.

Se evidenció en la línea de tiempo que los países europeos tienen tendencia hacia los métodos gráficos para evaluar la intercambiabilidad entre 2 gases.

BIBLIOGRAFIA

A. Amell. Efectos del cambio de composición química del gas natural sobre el comportamiento de turbinas a gas, Medellín: Universidad de Antioquia, 2006.

BP, IGU, Guidebook to gas interchangeability and gas quality, 2011

Carvajal, J, Estudio numérico-experimental de la velocidad de combustión laminar del biogás y de mezclas biogás-hidrógeno, Trabajo de grado, Universidad de Antioquia, Facultad de Ingeniería, 2010

Comisión reguladora de energía y gas, especificaciones de calidad del gas natural en el punto de entrada del sistema nacional de transporte de gas. CREG-062, 25 de julio de 2008

Ecured <https://www.ecured.cu> [En línea]. - 2017. - 1 de Octubre de 2017. - https://www.ecured.cu/Gas_licuado .

Extremadura Gas <http://www.dcgasextremadura.es> [En línea]. - 2017. - 2017. - <http://www.dcgasextremadura.es/el-gas-natural/caracteristicas-principales-de-los-gases-combustibles>.

Gas Interchangeability Task Group. White Paper on Natural Gas Interchangeability and Non-Combustion End Use. Natural Gas Council Interchangeability Task Group, 2005

International Gas Union <http://members.igu.org> [En línea]. - 2017. - 1 de Octubre de 2017. - <http://members.igu.org/old/IGU%20Events/wgc/wgc-2012/wgc-2012-proceedings/working-committee-papers/working-committee-woc5/expert-forum-5.b/status-report-1m-pact-of-gas-quality-variation-on-gas-appliances-in-japan/@@download/download> .

ISO, UNE-EN-ISO 13686 Gas natural designación de la calidad, 2014

J. A. Hernández y J. H. Cortés, Validación de la intercambiabilidad de gases en el contexto colombiano, Medellín: Universidad de Antioquia, 2003.

J. M. Ortiz, Fundamentos de Intercambiabilidad del Gas Natural, MET&FLU, vol. 9, pp. 6-15, 2014

J.M. Ortiz y L. Valero, Estado del arte intercambiabilidad de gases a nivel internacional, Polygon Energy S.A, 2016

McCain, W.D., Jr. (1990). The Properties of Petroleum Fluids (2 Ed.). Tulsa, Oklahoma: Penn Well Books, Penn Well Publishing Co

Montaña Herrera, D. D, 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 grado, Universidad Industrial de Santander, Facultad de ingenierías fisicoquímicas, 2011

Paris De Ferrer, M. Fundamentos de ingeniería de yacimientos, Maracaibo: Ediciones Astro Data. 2009

Registro CDT <http://glosario.registrocdt.cl> [En línea]. - 2001. - 1 de Octubre de 2017. - <http://glosario.registrocdt.cl/word/gas-manufacturado-gm>.

Zeldovich, Y. B., P. Y. Sadonikov, and D. A. Frank-Kamenetskii. Oxidation of nitrogen in combustion (M. Shelef, Transl.). 1947. USSR. Inst. Chem. Phys., Moscow–Leningrad