

VALIDACIÓN DE LA INTERCAMBIABILIDAD DE GASES EN EL CONTEXTO COLOMBIANO:

JAIME HERNÁN CORTÉS TORRES

JAIME ALBERTO HERNANDEZ VELEZ

ASESOR ACADÉMICO ANDRÉS ADOLFO AMELL ARRIETA. Ingeniero Mecánico.
Msc. Economía de la energía. Coordinador Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas.
U de A.

UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE MECÁNICA

ESPECIALIZACIÓN EN GASES COMBUSTIBLES.

MEDELLÍN, 2003

Tabla de contenidos

..	1
..	3
AGRADECIMIENTOS .	5
INTRODUCCIÓN .	7
MARCO TEORICO [1]. .	11
Inicios de la intercambiabilidad de gases en Norte América [2]. . .	12
Recuento histórico de métodos existentes [1]. .	13
Clasificación de los Métodos de intercambiabilidad por grupos [1]. .	15
2.3.1 Grupo1: Métodos de índices simples. .	15
2.3.2. Grupo 2: Métodos de Índices múltiples. .	18
Grupo 3. Métodos con diagramas (método gráfico). .	22
Grupo 4. Otros métodos. .	40
Comparación entre métodos de intercambiabilidad [1]. . .	41
Predicción de intercambiabilidad y opciones futuras [4]. .	43
Método de la presión de suministro variable. . .	44
Método de la presión de suministro constante. . .	45
Método del módulo constante. . .	45
3. DESCRIPCIÓN DE LOS GASES EMPLEADOS EN EL ESTUDIO. . .	47
DESCRIPCIÓN DE LOS ARTEFACTOS DE PRUEBA: CALENTADORES INSTANTÁNEOS DE AGUA [15], [16]. .	49
Definición. .	50
Características generales. .	50
Elementos constitutivos. .	51
Condiciones de instalación y referencias empleadas. .	54
Descripción técnica de los quemadores. .	54
METODOS DE INTERCAMBIABILIDAD APLICADOS A LOS GASES COLOMBIANOS. .	57

Aplicación del método de Dutton. . .	58
Implicaciones teóricas del cambio de las propiedades de los gases en la operación de un gasodoméstico. .	59
Análisis de la potencia térmica. . .	59
Análisis de la tasa de aireación. . .	62
Implicaciones teóricas de la variación de los pisos térmicos en la intercambiabilidad de gases. .	65
Análisis del consumo calorífico nominal. . .	65
Análisis de la combustión y disponibilidad del Oxígeno en el aire. . .	67
DISEÑO DE EXPERIMENTOS [20], [21]. .	69
Formulación del problema. .	69
Factores y niveles empleados. .	69
Selección de las variables de respuesta. .	70
Variables de respuesta cuantitativas. .	70
Variables de respuesta cualitativas. .	70
Selección del modelo. .	71
Protocolo de ensayos. .	72
Condiciones y especificaciones generales. .	73
Resultados esperados (parámetros de aprobación o rechazo). . .	73
Procedimiento de ensayo. .	74
Procedimientos de cálculo [14]. . .	75
Descripción de equipos de medición. . .	77
Características técnicas. . .	77
Observaciones sobre los equipos de medición. .	77
Descripción del montaje. .	79
DATOS EXPERIMENTALES. .	83
Resultados experimentales de las variables cuantitativas. .	83
Resultados experimentales de las variables cualitativas. .	86
ANÁLISIS DE RESULTADOS. .	87
Emisiones de Monóxido de Carbono y análisis bajo el criterio de Delbourg. .	87

Emisiones de Monóxido de Carbono y análisis bajo la norma técnica colombiana NTC 3531. . .	89
Emisiones de monóxido de carbono: comparación del criterio de Delbourg respecto a las exigencias de la NTC 3531 [6], [14]. .	94
Análisis del consumo calorífico nominal (potencia térmica) bajo el criterio de Delbourg. .	95
Análisis del incremento en la temperatura del agua y la carcasa del artefacto. . .	97
Variables cualitativas. . .	98
CONCLUSIONES. .	99
BIBLIOGRAFÍA. . .	103
ANEXO . .	107

DEDICATORIA Cuando pienso en el futuro lo hago sin esperanza, pero con asombro. Lo veo crecer exacto entre los techos de las casas y las demás imágenes que se consumen, sabiendo que todo sucede de una forma rigurosa e inevitable. Esta monografía, la cual me ha sido prefijada desde siempre, es solo una parte de la misma construcción, esta hecha de las mismas cosas... Quae sint, quae fuerint, quae mox futura trahantur. Agradezco que en este documento de modelos matemáticos indescifrables para la gran mayoría de las personas, tenga el derecho propio a resistir la existencia plasmando un pequeño párrafo nacido de la intuición y no de las leyes de la física o la química (Aunque esto solo pueda afirmarse por ignorancia). Estas páginas fueron construidas por los que no conozco, por aquellos posibles rostros infantiles y manitos redondas que quizás se levanten hacia mí algún día. Por ellos resisto, por ellos que hacen que la llamada de la selva y de las letras se pierda en el tumulto que es el presente. Para ellos este obligado e insignificante trabajo. **Jaime H. Cortés Torres.**

Una vez más tengo la oportunidad para reflexionar y buscar muy adentro, cuales han sido los motivadores que me llevaron a emprender esta tarea. Ante la incapacidad de mis sentidos, trato precariamente de comprender todas las maravillas que me rodean, utilizando las matemáticas, la intuición, el ensayo y error, y lógicamente el trabajo de otros, que gracias a este tipo de esfuerzo han resistido el olvido. He llegado a importantes conclusiones, pero son insignificantes piezas del infinito rompecabezas. Sé que mi tiempo no será suficiente, por ello espero que el altruismo me permita continuar con la búsqueda de aquellas cosas, cuya existencia solo son sustentadas por la fe. Tengo la esperanza que ante la ley de Kafka, su guardián me permita la entrada por la puerta: la única, la de siempre, la mía. A mi hermano Jaime H. y a todas ellas, por ser siempre motivadoras de las empresas más nobles y honrosas, pueriles y lunáticas.

Jaime A. Hernández Velez.

AGRADECIMIENTOS

LOS AUTORES EXPRESAN SUS AGRADECIMIENTOS A:

Andrés Amell Arrieta, ingeniero Mecánico Msc. en Economía de la energía y Coordinador Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas de la Universidad de Antioquia, quien se desempeña como profesor de planta de la Universidad de Antioquia. A él muchas gracias por el apoyo académico y logístico.

Empresa Colombiana de Petróleos, ECOPETROL, quien apoyo económicamente la realización de esta monografía.

Miguel Ángel Núñez, ingeniero Eléctrico Jefe del área de Investigación y Desarrollo de Industrias Haceb S.A. y **Alberto Restrepo Penagos**, ingeniero químico Director del área de Calidad de Industrias Haceb S.A., por su apoyo incondicional.

Luis Fernando Henao, ingeniero Metalúrgico especialista en calidad y **Jhon Jairo Yepes**, ingeniero Industrial especialista en Calidad, por facilitar la culminación de este proyecto.

Duván Euclides Arboleda, Tecnólogo electromecánico con énfasis en gasodomésticos, quien gracias a su rigurosidad experimental participó directamente en las mediciones.

Liliana Velez, ingeniera Msc. en Ingeniería Ambiental, por sus apoyo en el tratamiento estadístico de este proyecto.

Jorge Mario García, estudiante de ingeniería Mecánica, quien soportó logísticamente el desarrollo de la especialización.

INTRODUCCIÓN

Colombia es un país con una riqueza energética considerable, en cuanto al gas natural que yace a lo largo de su subsuelo. A nivel mundial dichos gases se clasifican dentro de los más puros, con elevados porcentajes de Metano que van desde el 75% hasta el 97%. Sin embargo, los gases naturales que tengan menores porcentajes de Metano, van acompañados de otros hidrocarburos pesados como Etano, Propano y Butano, además de óxidos de azufre, dióxido de carbono y demás inertes, los cuales alteran notoriamente su composición química y en consecuencia todas sus propiedades.

Estos hidrocarburos pesados alteran básicamente el poder calorífico, la densidad relativa y la velocidad de deflagración. Las dos primeras características están involucradas en el denominado índice de Woobe. Dicho parámetro, determinado por la relación entre la energía disponible en el combustible por metro cúbico sobre la raíz cuadrada de la densidad relativa, establece posibilidad de que un gas sea intercambiable con otro; es decir, que se permita el uso de dos gases pertenecientes a la misma familia en un artefacto determinado, sin que se vea alterada la eficiencia ni la seguridad de los usuarios, sin tener que modificar el diseño del mismo.

El gas natural de la Guajira ($d=0.567$, $PCS=39.4 \text{ MJ/m}^3(\text{std})$) y el gas natural de Cusiana ($d=0.734$, $PCS=47.71 \text{ MJ/m}^3(\text{std})$) son nuestros dos gases de composiciones extremas: Mayor y menor contenido de Metano respectivamente, y serán los llamados a validar su intercambiabilidad en el parque de artefactos gasodomésticos instalados en Colombia, cuando se tenga la necesidad de disponer de ambas fuentes de suministro como alternativa de atención a la demanda en caso de verse entorpecida por guerras o

conflictos comunes en nuestro país.

El empleo de gas natural en diferentes aplicaciones ha venido acrecentando la demanda de artefactos que operan con este combustible, principalmente para el calentamiento de agua. La instalación de este tipo de artefactos se ha visto afectada por la reducción de los espacios en la concepción de la vivienda moderna y por la falta de la obligatoriedad en el cumplimiento de las normas técnicas establecidas para su instalación. Es por esta razón que se hace énfasis en este trabajo sobre los calentadores de paso continuo, porque a pesar de ser un equipo compacto y con eficientes sistemas de seguridad, posee una potencia nominal relativamente alta comparada con los demás artefactos usados a nivel doméstico y sobre los cuales ya se han registrado algunos accidentes graves en ciertas zonas del país.

Bajo esta perspectiva, tendríamos dos situaciones aparentemente aisladas que revierten una importancia elevada cuando se las mira desde el punto de vista de la seguridad de los usuarios:

- Es necesario un suministro confiable de gas natural y esto involucra el uso de gases de diversas composiciones químicas,
- El empleo de esta variedad de gases de composiciones químicas diferentes puede ser riesgoso en equipos donde la potencia térmica nominal es relativamente alta, y donde el estado como ente legislador, ha tenido una participación muy distante.
- Adicionalmente, los análisis teóricos demuestran que la altitud afecta la operación de los sistemas de combustión atmosféricos de premezcla, ya que se modifica la potencia térmica de entrada y la higiene de la combustión [30].

Los dos puntos de vista mencionados anteriormente, pueden ser agrupados bajo un estudio de intercambiabilidad para los gases colombianos, reportado para un parque de aparatos que representan un alto riesgo debido a su empleo masivo a nivel residencial.

El tema de intercambiabilidad cobra mayor importancia cuando se prevé por parte Ecopetrol en nombre del gobierno, la inversión necesaria para el tratamiento de este gas, el cual posee un alto porcentaje de CO_2 (5.2%), gas inerte que afecta la transportabilidad del mismo y demás propiedades físico - químicas. El uso del yacimiento de Cusiana se hace imprescindible en las termoeléctricas, previendo una posible disminución en la capacidad de generación de las hidroeléctricas debido a fenómenos climáticos, además del agotamiento de los yacimientos en uso actual. Luego de abastecer de combustible las termoeléctricas, el gas de Cusiana se emplearía a nivel industrial, comercial y finalmente en el sector doméstico, el cual sería nuestro caso de estudio.

Es de gran importancia para los fabricantes de gasodomésticos, distribuidores y comercializadores de gas, diseñadores e instaladores, y demás agremiaciones, entes privados y gubernamentales el conocimiento de este fenómeno y las posibles implicaciones que trae sobre el desempeño de los artefactos y la seguridad de los usuarios. Sumado a esto, la evaluación abarcará dos diferentes pisos térmicos donde podrían ser instalados, ya que el efecto de la altitud puede convertirse en una variable de alta influencia sobre los límites de intercambiabilidad aplicables a un parque de artefactos gasodoméstico.

MARCO TEORICO [1].

El empleo de gases combustibles como fuente de energía ha sido uno de los principales factores de peso, al analizar el desarrollo del hombre. Inicialmente, y a principios de siglo XX, el uso de gases combustibles provenientes de la quema del carbón o coque fue generalizado. A medida que los desarrollos tecnológicos avanzaban y permitían a su vez la exploración de nuevas fuentes naturales energéticas, la cantidad de gases disponibles se fue diversificando, hasta llegar a los actuales gases naturales.

La disponibilidad de una amplia variedad de gases combustibles, asociadas a sus diferentes propiedades físicas y químicas, dejaba entrever que las condiciones de funcionamiento, operación y seguridad para los artefactos a gas, también fueran diferentes. Fue esta última inquietud la que generó el concepto de intercambiabilidad de gases, como un área de estudio que permitiría determinar el rango bajo el cual puede variar la composición del gas, sin deteriorar el desempeño del quemador, en lo relacionado con su potencia térmica, estabilidad de llama, combustión (emisiones de Monóxido de Carbono) y formación de hollín (puntas amarillas).

La intercambiabilidad de gases persigue dos objetivos:

- Conocer cuales son las variaciones en la composición del gas, admisibles dentro de una misma familia.
- Prever como aminorar cualquier situación inadmisible en el funcionamiento del aparato con el uso de un gas sustituto al de diseño o de ajuste.

Todos los estudios de intercambiabilidad conocidos hasta la fecha, han tenido su fundamentación en estudios empíricos, asociados a una gran componente experimental. Dichos ensayos partían de la premisa de conseguir un desempeño satisfactorio en los artefactos de gas, representados por sus quemadores. Los cuatro parámetros que fueron empleados son:

- Potencia térmica constante.
- Estabilidad de llama (desprendimiento y retroceso).
- Emisiones de Monóxido de carbono.
- Hollín (punta amarilla + superficie fría).

Los estudios de intercambiabilidad de gases conocidos, pueden agruparse en dos categorías: métodos europeos y métodos americanos. Ambos basan sus criterios en las propiedades físico – químicas del gas asociadas al cálculo de magnitudes llamadas “índices de intercambiabilidad”; sin embargo, el método europeo adicionalmente, considera varios criterios de diseño asociados al quemador. De ello se puede inferir una mejor caracterización y en consecuencia un rango mas ajustado y preciso de intercambiabilidad. Este último punto es de gran importancia, pues los fenómenos de combustión varían igualmente para un mismo gas, en función de las condiciones de instalación y utilización del artefacto en particular.

Inicios de la intercambiabilidad de gases en Norte América [2].

En 1932 la Asociación Americana de Gases A.G.A. completó un extensivo proyecto de investigación sobre intercambiabilidad de gases manufacturados y mezclas de gases combustibles, cuyos poderes caloríficos eran menores a los 700 Btu/pe^3 [$\square 7 \text{ kWh/m}^3$]. Aproximadamente se realizaron unas 175000 pruebas, para unas 250 mezclas de gases.

En la década siguiente, con el incremento de la demanda de gas natural en E.U., la necesidad de tener a disposición reservas de gas para satisfacer picos de demanda y suplir fugas por fallas en las líneas de transporte se hizo de mayor importancia. Es por eso que la A.G.A. en compañía del Comité para el Uso de Mezclas Gaseosas (Committee on Mixed Gas Research) inició una investigación en los años 1942 y 1943, que tenía como objetivo principal, el desarrollo de un método que pudiera predecir con confianza, qué gases podrían ser sustitutos del gas natural o de mezclas gaseosas de elevado poder calorífico (superior a los 800 Btu/pe^3 $\square 8 \text{ kWh/m}^3$).

El carácter de gases sustitutos y el alcance bajo los cuales ellos podrían ser utilizados, depende de factores económicos y técnicos. En el caso de las compañías distribuidoras de gas, los criterios para medir la pertinencia y el aseguramiento del servicio para el usuario final, al momento de emplear gases sustitutos en picos de demanda fueron:

- La sustitución depende enteramente de factores económicos asociados a la disponibilidad y naturaleza del combustible, así como de sus respectivas plantas de tratamiento, equipos de manejo y medición.
- Se debe garantizar un funcionamiento continuo, satisfactorio y seguro para los gasodomésticos en servicio. Este punto involucra que los artefactos gasodomésticos deben tolerar cambios en la potencia térmica de entrada, tasa de aireación primaria y fenómenos asociados a la combustión y estabilidad de la llama. Se introduce entonces, el concepto de flexibilidad del gasodoméstico, referido como la capacidad para funcionar en óptimas condiciones bajo los parámetros antes mencionados, sin ejecutar ningún cambio en los inyectores de gas, la graduación del aire primario ni la presión de suministro.

Es de gran importancia asociado al problema de intercambiabilidad, el control que se debe ejercer sobre el gas sustituto, dentro de los límites permisibles de operación del artefacto. Para ello se pueden realizar ensayos sobre un grupo de artefactos durante un periodo de tiempo o emplear quemadores de ensayo (patrones) que homologuen los diferentes diseños. Esto deja entrever, que dentro de la metodología de intercambiabilidad, no es suficiente el uso de un método específico; para garantizar el éxito de la sustitución, es de vital importancia el seguimiento de los artefactos intervenidos.

Analizando los resultados experimentales obtenidos, se pudo concluir que:

- Cuando el poder calorífico y la gravedad específica del gas sustituto causa una disminución en la potencia térmica, existe una tendencia hacia el desprendimiento y al retroceso de llama. El desprendimiento es más notorio para gases manufacturados, mientras que el retroceso es mas crítico para las mezclas aire – Butano.
- Cuando el poder calorífico y la gravedad específica del gas sustituto causa un incremento en la potencia térmica, existe una tendencia hacia las puntas amarillas y a la combustión incompleta.
- Fue común el fenómeno de puntas amarillas, para las mezclas de gases combustibles donde se excedían en: 50% Propano, 40% Butano y 20% hidrocarburos saturados.
- La tendencia a la inestabilidad de llama, puntas amarillas y combustión incompleta en los gasodomésticos evaluados, depende de la composición del gas de referencia y el respectivo ajuste en los artefactos para el mismo.

Recuento histórico de métodos existentes [1].

Como la industria del gas se inició con el uso de gases manufacturados, el propósito de estos métodos fue inicialmente evaluar el tema de intercambiabilidad de estos gases, con

los gases naturales. No obstante, la exploración y explotación de nuevas reservas gasíferas amplió el alcance de la intercambiabilidad entre los grupos de gases naturales. La **TABLA 1** muestra según su origen, los métodos desarrollados:

INTERCAMBIABILIDAD PARA GASES NATURALES	
Métodos Americanos	Métodos Europeos
- Indice de Kroy - Indices múltiples de la A.G.A - Indice múltiple de Weaver - Diagramas de Grumer	- Delbourg - Harris – Lovelace - Harris – Wilson - Francis - Sommers - Dutton

TABLA 1. MÉTODOS AMERICANOS Y EUROPEOS DE INTERCAMBIABILIDAD [1].

Los quemadores empleados para validar los métodos europeos, no tienen aplicación a los métodos de intercambiabilidad americanos. De hecho, existen diferencias entre los quemadores empleados durante los experimentos de ambas corrientes (Ver **TABLA 2**):

Origen del Método	Gases	Potencia Específica [Btu/h.pulg ²]	Tasa de Aireación Primaria [%]
Europeo	1ra Familia (450<FIC<550 Btu/pulg ²)	40000 – 70000	60 – 80
	2da Familia (800<FIC<1100 Btu/pulg ²)	25000 (quemadores con estabilizadores de llama)	55 – 70
Americano	1ra Familia	28000	40 – 50
	2da Familia	20000	60 – 80

TABLA 2. PRINCIPALES DIFERENCIAS ENTRE LOS MÉTODOS DE INTERCAMBIABILIDAD AMERICANOS Y EUROPEOS [1].

En la evaluación de cada uno de los métodos, el desempeño en la combustión está influenciado por la composición del gas combustible:

- Retroceso de llama: % de Hidrógeno.
- Desprendimiento de llama: % de Nitrógeno.
- Puntas Amarillas/Combustión incompleta: % de hidrocarburos pesados.

La interpretación de los límites de intercambiabilidad está influenciada por el ajuste del artefacto con el gas de referencia o gas original, así como la población de quemadores para las cuales fueron determinadas.

Clasificación de los Métodos de intercambiabilidad por grupos [1].

Dependiendo de los parámetros involucrados en la estimación de la intercambiabilidad de gases, los métodos se agrupan de la siguiente manera:

Grupo 1. Métodos de Índices Simples. Grupo 2. Métodos de Índices Múltiples. Grupo 3. Métodos con Diagramas (gráficos). Grupo 4. Otros métodos.

2.3.1 Grupo1: Métodos de índices simples.

Su aplicación es limitada en cuanto al alcance de las potencias térmicas, es decir solo tienen validez para gases con poderes caloríficos inferiores a 7.76 kWh/m^3 (750 Btu/pie^3).

Índice de Wobbe.

1.

Expresión que relaciona el poder calorífico superior del gas con la raíz cuadrada de la gravedad específica del gas:

$$W = \frac{H}{\sqrt{s}} \quad (1)$$

Este índice no puede emplearse por sí mismo como un parámetro predictivo de intercambiabilidad. No provee una medición total y completa de la intercambiabilidad. Se empleó para agrupar los gases, en función de su contenido energético.

Criterio de intercambiabilidad:

Dos o más gases son intercambiables si poseen igual número de Wobbe.

a. Índice de Willien.

Se basa en las siguientes cuatro consideraciones: la mezcla en la cabeza del quemador posee un poder calorífico de 175 Btu/pie^3 (1.81 kWh/m^3), la caída de presión es igual para diferentes gases (con el ajuste adecuado en el quemador), el diámetro del inyector es igual para los diferentes gases y la tasa de aireación primaria es independiente de la gravedad específica del gas.

$$F = \frac{H \times (S_a)^{1/2}}{(S_a)^{1/2} + \left(\frac{H_a - 175}{175} \right) \times (S)^{1/2}} \quad (2)$$

Donde:

H: Poder calorífico (Btu/pie³), gas de reemplazo. S: Gravedad específica, gas de reemplazo. El subíndice “a” relaciona el gas de ajuste o gas de 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 superior entre 165 y 185 Btu/pie³. Respecto al factor F, se determinó que para valores menores a 165 Btu/pie³, los quemadores de los artefactos tendían al retroceso, mientras que para valores superiores a los 185 Btu/pie³, la combustión incompleta era inminente.

Este método posee desventajas como su restricción para gases con poderes caloríficos muy bajos y que no considera los fenómenos al interior de la llama, como la velocidad de deflagración.

Criterio de intercambiabilidad:

Dos o más gases son intercambiables si el cálculo de su número F se encuentra entre 160 y 190.

a. Índice de Knoy.

Se toma la relación de Williem y se adapta para mezclas GLP - aire, las cuales servirían para sustituir a gases manufacturados y gases naturales.

$$C = \frac{H - 175}{s^{1/2}} \quad (3)$$

Sin embargo, si la composición del gas sustituto, no se aproxima a la del gas de ajuste, los resultados de este método, pueden ser erróneos. La **FIGURA 1** ilustra su representación gráfica.

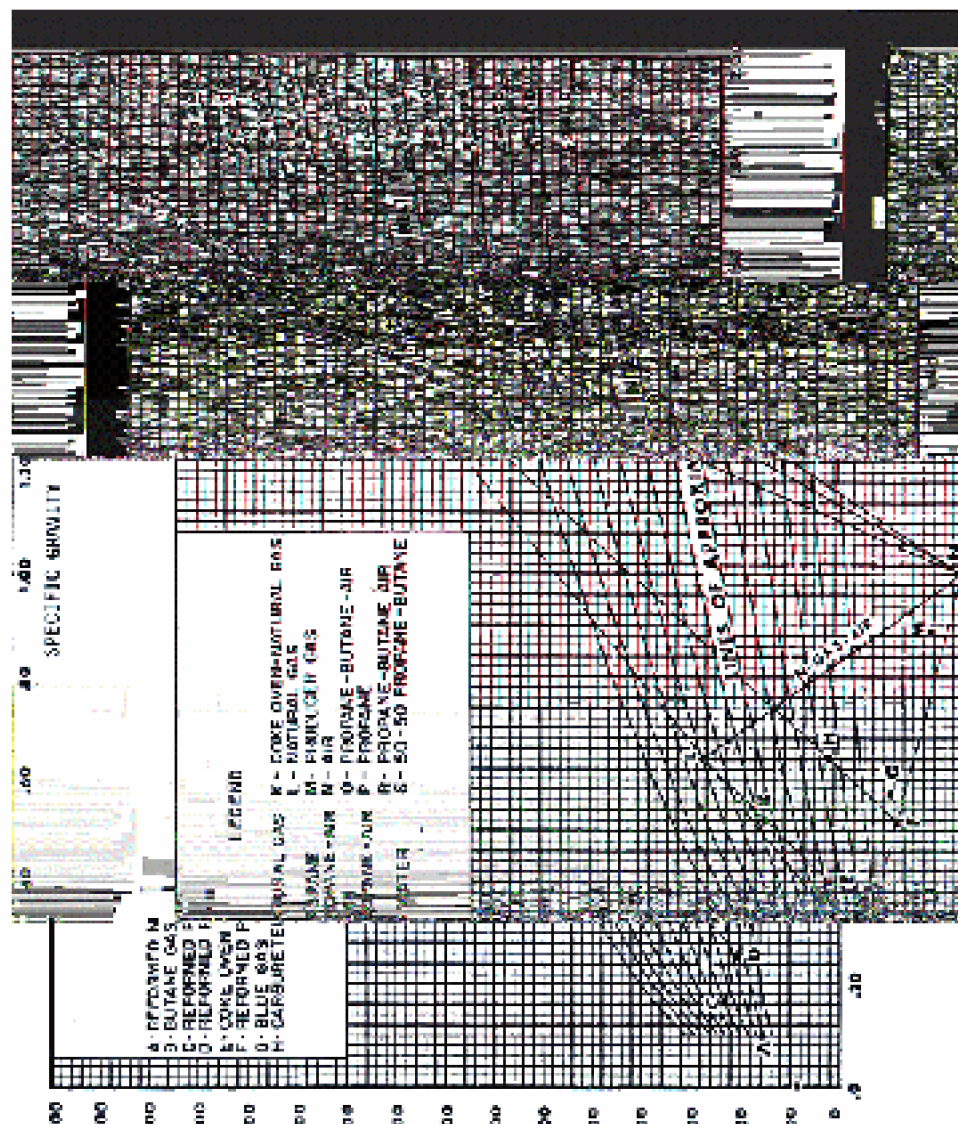


FIGURA 1. DIAGRAMA DE LÍNEAS DEL ÍNDICE DE KNOY

Criterio de intercambiabilidad:

Dos o mas gases son intercambiables si el cálculo de su número C es igual, con una desviación tolerable de $\pm 7.5\%$.

a. Índice de Schuster.

Se deriva de la consideración del balance entre la densidad de suministro de calor, representado por el índice de Wobbe y la tasa de producción de calor, representado por la velocidad de quemado (velocidad de deflagración):

$$S_c = \frac{W}{S_u} \quad (4)$$

Donde:

S_C : Índice de Schuster. W : Índice de Wobbe. S_U : Velocidad de deflagración.

El método es interesante, pues involucra la medición de propiedades fundamentales involucradas en la combustión. La velocidad de deflagración se determinó por los métodos gráficos de France y Pritchard.

Criterio de intercambiabilidad:

Dos gases o más gases son intercambiables, si el cálculo de su número de Schuster es igual.

a. Índice “C” de la A.G.A.

Se determinó que para gases con poderes caloríficos inferiores a 750 Btu/ pie^3 (7.76 kWh/ m^3) se tiene la expresión:

$$C = \frac{H \times A \times S_a}{H_a \times A_a \times S} + \frac{H_a \times A_a}{5000 \times E_a \times F_a} - \frac{H \times A}{5000 \times E \times F} \quad (5)$$

Donde: A : Aire teórico requerido para la combustión estequiométrica. E : calor específico teórico de los humos, producto de la combustión de 60°F a 1600°F [Btu/ pie^3].

El subíndice “a” relaciona las propiedades del gas de ajuste o gas de referencia. Los términos restantes se relacionan con el gas sustituto.

$$E = 0.029 \times V_{CO_2} + 0.023 \times V_{H_2O} + 0.0189 \times v_{N_2} \quad (6)$$

V : Volumen de cada producto formado por la combustión de un pie cúbico de gas con el aire teórico requerido para la combustión completa. H : Poder calorífico [Btu/ pie^3].

S : Gravedad específica F : Sumatoria de todas las fracciones molares para cada combustible (gas sustituto y gas de ajuste)

$$F = X_{H_2} + 5.36 \times X_{CO} + 35.2 \times X_{CO_2} + 27.3 \times X_{CH_4} + 38.7 \times X_{C_2H_6} + 82.8 \times X_{C_3H_8} \quad (7)$$

Donde X_{H_2} : Fracción de gases radiantes en la mezcla.

Criterio de intercambiabilidad:

Dos o más gases son intercambiables idealmente, si el cálculo del número “C” se encuentra entre 0.85 y 1.15. En la práctica se admite una desviación, ampliando el rango para “C” entre 0.775 y 1.225. Para valores de “C” < 1.0, se presenta el retroceso de llama y para valores de “C” > 1.0 se presenta el fenómeno de combustión incompleta.

2.3.2. Grupo 2: Métodos de Índices múltiples.

Los métodos descritos como simples, están relacionados con la intercambiabilidad en lo concerniente a la potencia térmica de entrada al artefacto. Estos no se direccionan a

otros parámetros de intercambiabilidad, tales como retroceso y desprendimiento de llama, puntas amarillas y combustión incompleta. Debido a estas limitaciones, sumadas a que su empleo solo es válido para gases de poder calorífico bajo, se desarrollaron otros métodos, que se detallan a continuación:

a. Índices de la A.G.A.

Fueron desarrollados para enfrentar el problema de la intercambiabilidad para los gases manufacturados. La introducción del consumo de diferentes gases naturales, generó la necesidad de los criterios de intercambiabilidad, los cuales deberían predecir de forma confiable los gases que podrían ser sustitutos de otros, durante periodos de gran demanda de gas.

Se desarrollaron entonces, índices para el desprendimiento, retroceso y puntas amarillas, basados en las mediciones efectuadas en un quemador de precisión. Las mediciones involucraron el gas natural como combustible base y con una amplia variedad de combustibles sustitutos, los cuales poseen un poder calorífico, alrededor de los 800 Btu/pie³ (8.28 kWh/m³).

Estos índices son básicamente modelos empíricos puros, obtenidos del estudio de los 3 tipos de gases más representativos de Estados Unidos y los cuales se presentan a continuación:

- Índice de Desprendimiento de Llama:

$$I_C = \frac{K_A}{\frac{f_a \times a}{f \times a_a} \times \left[K - \log \left(\frac{f_a}{f} \right) \right]} \quad (8)$$

- Índice de Retroceso de Llama:

$$I_R = \frac{K_f}{K_A \times f_a} \times \left(\frac{H}{1000} \right)^{1/2} \quad (9)$$

- Índice de Puntas Amarillas:

$$I_{PA} = \frac{f \times a_a \times y_a}{f_a \times a \times y} \quad (10)$$

Donde:

Subíndice "a": relaciona las propiedades del gas de ajuste o referencia. f: Factor de aire primario = $1000s^{1/2}$ /H. S: Gravedad específica. a: Aire teórico requerido para la combustión estequiométrica. H: Poder calorífico (Btu/pie³). K: Constante de la A.G.A. para el desprendimiento de llama.

$$K = \frac{\sum F_i \times X_i}{s} \quad (11)$$

Y: Constante de la A.G.A. para puntas amarillas

$$y = \frac{100 \times \sum (T_i \times X_i)}{\left[A + 7 \times (X_{N_2} + X_{CO_2}) - 26.3 \times X_{O_2} \right]} \quad (12)$$

Donde F_i y T_i son constantes empíricas de desprendimiento y puntas amarillas, que dependen de cada gas (X_i : fracción molar de cada gas componente de la mezcla) [*]:

GasFiTi Metano 0.672.18 Etano 1.425.80 Propano 1.939.80 Butano 2.5516.85
Etileno 1.778.70 Propileno 2.0613.0 Hidrógeno 0.60--- Monóxido de Carbono 1.41---
Nitrógeno 0.69--- Dióxido de Carbono 1.08---

Criterio de intercambiabilidad:

Dos o más gases son intercambiables si el cálculo de los índices de retroceso, desprendimiento y punta amarilla es igual. La validez del criterio aplica para el cumplimiento simultáneo con los tres índices.

a. Índices de Weaver.

Introdujo como parámetro adicional, la velocidad de deflagración. Los índices de Weaver mostrarán mayor confiabilidad que el método de la A.G.A. para los gases de bajo poder calorífico (gases de primera familia, manufacturados).

Los índices se detallan a continuación:

- Índice de entrada de calor (J_H):

$$J_H = \frac{H}{H_a} \times \left(\frac{S_a}{S} \right)^{1/2} \quad (13)$$

- Índice de aireación primaria (JA):

$$J_A = \frac{A}{A_a} \times \left(\frac{S_a}{S} \right)^{1/2} \quad (14)$$

- Índice de desprendimiento de llama (JL):

$$J_L = J_A \times \frac{S}{S_A} \times \left(\frac{100 - Q}{100 - Q_a} \right) \quad (15)$$

- Índice de retroceso de llama (JF):

$$J_F = \frac{S}{S_A} - 1.4 \times J_A + 0.4 \quad (16)$$

- Índice de puntas amarillas (JY):

$$J_Y = J_A + \left(\frac{N - N_A}{110} \right) \quad (17)$$

- Índice de combustión incompleta (JI):

$$J_I = J_A - 0.366 \times \frac{R}{R_a} - 0.634 \quad (18)$$

- Factor de velocidad de deflagración de Weaver (S):

$$S = \frac{\sum(a_i \times B_i)}{A + 1 + 5 \times Z - 18.8 \times Q} \quad (19)$$

Donde:

ai: Fracción volumétrica del componente i, en el combustible. A: Aire teórico requerido para la combustión estequiométrica. Bi: coeficiente de Weaver de velocidad de deflagración del componente i. H: Poder calorífico del combustible [Btu/pie³]. N: Número de átomos fácilmente liberados por la combustión de 100 moléculas de gas. Q: Fracción volumétrica de Oxígeno en la premezcla R: relación del número de átomos de Hidrógeno al número de átomos de Carbono en el hidrocarburo. Z: Fracción volumétrica de inertes (N₂, CO₂) en el gas combustible.

El subíndice “a” relaciona las propiedades del gas de ajuste o gas de referencia. Los términos restantes se relacionan con el gas sustituto.

Criterio de intercambiabilidad:

Dos o más gases son intercambiables teóricamente y de forma completa, si los índices de entrada de calor y desprendimiento de llama, son iguales a 1.0; y los índices de retroceso de llama, puntas amarillas y combustión incompleta, son iguales a 0.0. Sin embargo en la práctica, Weaver propone unos rangos dentro de los cuales la intercambiabilidad es todavía aplicable:

- Índice de entrada de calor: $0.925 < JH < 1.075$
- Índice de desprendimiento de llama: $JL > 0.46$
- Índice de retroceso de llama: $JF < 0.12$
- Índice de combustión incompleta: $JI < 0.0$
- Índice de puntas amarillas: $JY < 0.21$

Grupo 3. Métodos con diagramas (método gráfico).

La ventaja inherente de los métodos gráficos es que el grado del potencial intercambiable puede ser determinado en un diagrama, según la posición del gas sustituto, en relación con el gas de ajuste y las líneas límites de desempeño en combustión. El diagrama puede también mostrar la mezcla de gases que pudiera resolver algún tipo de problema de intercambiabilidad.

Tanto el método de Delbourg como el método de Gilbert y Priggs involucran la medición de la velocidad de deflagración como parámetro fundamental de caracterización.

Criterio de intercambiabilidad:

Dos o más gases son intercambiables, si ambos se encuentran dentro del área establecida por los diagramas.

a. Diagrama de Delbourg [1], [3].

En su gráfico se utilizan como ejes el índice de Wobbe modificado, (lo cual se explica para considerar la variación del coeficiente de descarga del inyector con la composición del gas) y el potencial de combustión. Ambos definen gráficamente el área de

intercambiabilidad aceptable de los gasodomésticos franceses. El potencial de combustión empírico es propuesto como una expresión de la velocidad de deflagración y relaciona la densidad del gas combustible con la altura del cono azul de la llama.

Conociendo la composición del gas sustituto, se procede a calcular los índices de intercambiabilidad y a ubicarse en la gráfica. Si el punto se encuentra en el interior de la gráfica y si los índices son inferiores a los valores límites, entonces el gas es considerado como intercambiable con el gas de referencia o de ajuste. En el caso contrario, es necesario alterar la composición del gas sustituto para volverlo intercambiable.

La ilustración del método se observa en las **FIGURAS 2 y 3**.

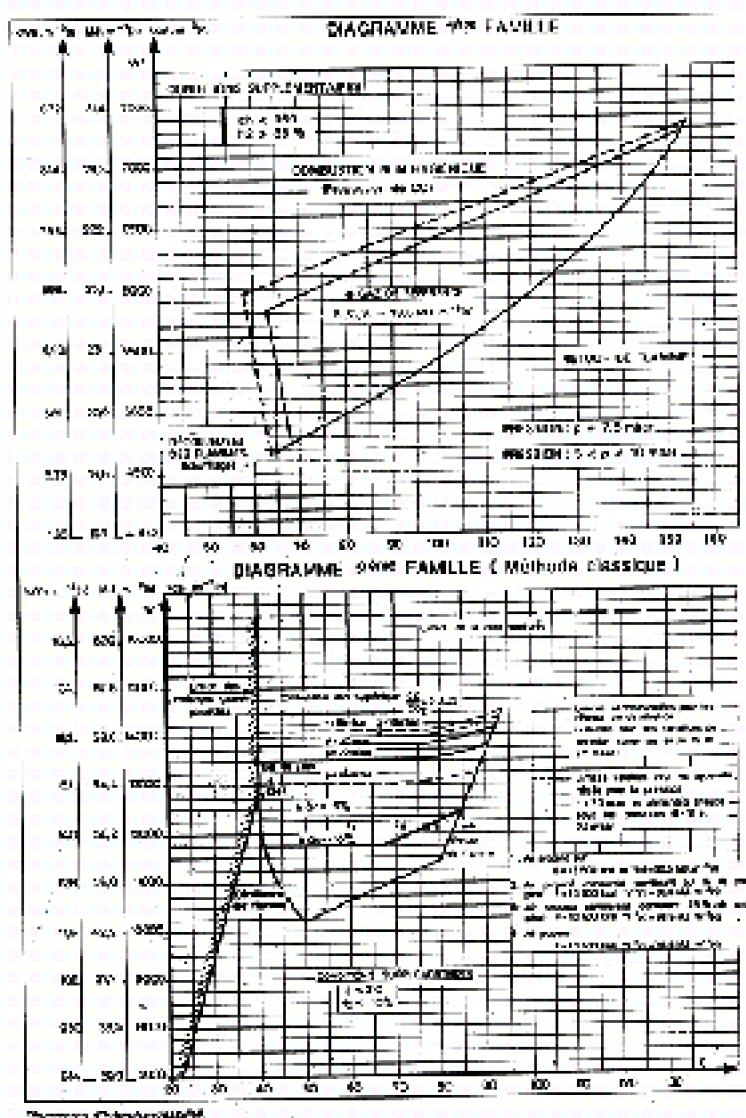


FIGURA 2. DIAGRAMA DE INTERCAMBIABILIDAD DE DELBOURG

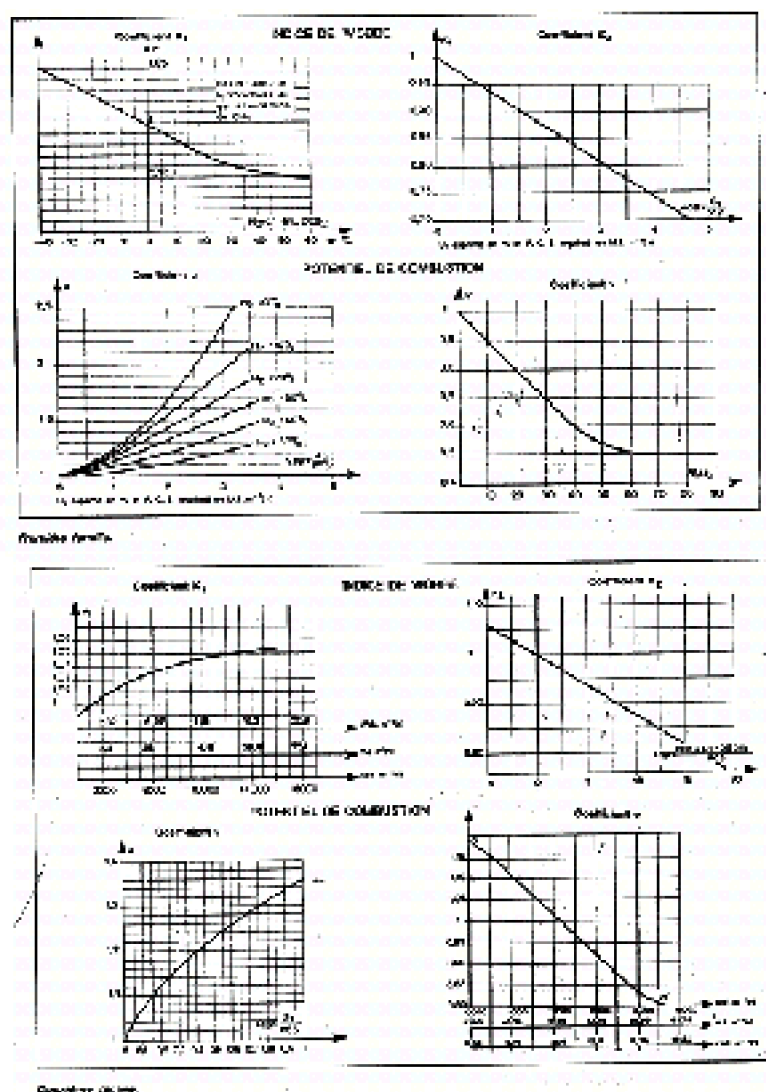


FIGURA 3. DIAGRAMAS PARA EL CÁLCULO DE COEFICIENTES DE DELBOURG

Los índices se calculan como sigue a continuación:

- Índice de Wobbe modificado:

$$W = K_1 \times K_2 \times \frac{PCS}{d^{1/2}} \quad (20)$$

- Potencial de combustión:

$$C = k \times \frac{H_2 + 0.7 \times CO + 0.3CH_4 + V \times \sum (a \times C_n H_m)}{\sqrt{d}} \quad (21)$$

- Índice de puntas amarillas:

$$I_j = \frac{\sum(j \times A)}{\sqrt{d}} \times \left(1 - 0.418 \times \frac{O_2}{PCS} \right) \quad (22)$$

- Índice de hollín:

$$i_f = \frac{1 + 0.01 \times H_2 + 0.01 \times CO}{\sqrt{d}} \times \sum(b \times A \times (1 - 0.013 \times O_2)) \quad (23)$$

Donde:

PCS: Poder calorífico superior.

d: Densidad relativa del gas.

K1: Expresión en función de de la siguiente expresión $(XCO + 4XO_2 - 0.52XCO_2) / PCS$, con PCS en kcal/m^3 .

K2: Función del número de kcal/m^3 que producen los hidrocarburos, con excepción del Metano.

u: Factor de corrección empírico para el potencial de combustión, que representa cambios en la velocidad de deflagración, relacionados con variaciones en la concentración del Oxígeno y la contribución térmica de los hidrocarburos pesados.

A: Porcentaje de cada hidrocarburo.

CnHm: Porcentaje de cada hidrocarburo superior al CH₄.

O₂: Fracción volumétrica.

a, b, j: Propiedades calculadas para cada hidrocarburo en particular.

Variaciones al método de Delbourg tradicional.

El método de Delbourg clásico, no tenía en cuenta todos los parámetros ligados a las condiciones reales de instalación y de utilización de los aparatos; en particular en el reglaje del mismo, maniobra que debe ser efectuada por personal capacitado. Actualmente, se toman en cuenta los aspectos relacionados con la composición del gas, sumados al parque de artefactos instalados y las condiciones de funcionamiento de los mismos, asociadas a dicha instalación (Ver **FIGURA 4**).

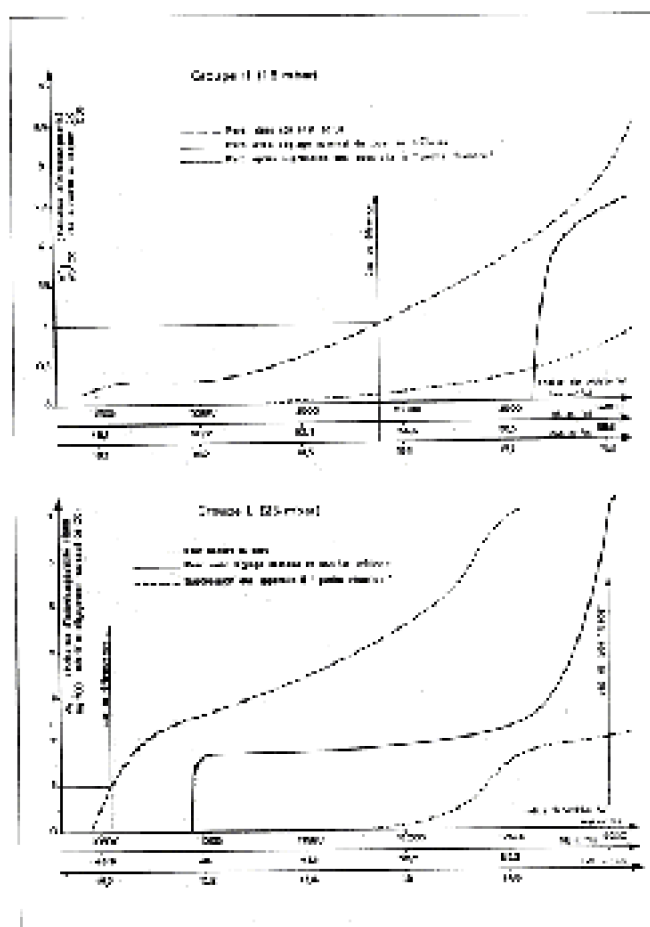


FIGURA 4. DIAGRAMA MODIFICADO PARA EL MÉTODO DE DELBOURG

Criterio de Intercambiabilidad:

Dos o más gases son intercambiables bajo el método gráfico de Delbourg, si se cumplen con los parámetros detallados en la **TABLA 3** [3]:

Fenómenos de Combustión Inadmisible	Valores Límites	Índice Característico del Fenómeno
Desprendimiento de Llama	Curva de $W = 10$, correspondiente a la zona donde aparecen los fenómenos.	Índice de Wobbe (W) Potencial de Combustión (C)
Retorno de Llama	Curva de $W = 1$ (C)	
Producción de Altavoces de Carbono	Curva de $W = 1$ (C) $CO_2(\%) \geq 5.01$ (1ra familia) $CO_2(\%) \geq 11.57$ (2da familia)	
Puntas Amarillas	$210 \geq U_1$ (2da familia) $150 \geq U_2$ (1ra familia)	U_1 : Índice de puntas amarillas U_2 : Índice de formación de punta.
Distribución de Potencia Térmica	100% Potencia Nominal	W: Índice de Wobbe

TABLA 3. PARÁMETROS EMPLEADOS EN EL MÉTODO DE DELBOURG [3]

b. Diagrama de Gilbert y Priggs.

Este método fue desarrollado inicialmente para gases de primera familia y con el tiempo se extendió su alcance a los gases de segunda familia, con los trabajos de Harris y Lovelace. Este diagrama se encuentra basado en el Metano y delimita la zona de intercambiabilidad para los gases de segunda familia, según las características de relevancia de los ensayos.

Los ejes de este diagrama son el número de Wobbe y el factor de velocidad de deflagración, elegido sobre el potencial de combustión, porque permite una mejor presentación de los datos en forma gráfica. Se empleó un quemador estándar para determinar las líneas límites con relación al gas de ajuste. El desprendimiento de llama se determinó aumentando la presión de suministro hasta generar el levantamiento de la llama sobre la cabeza del quemador, sin que se presente la extinción total de la llama. Mientras que obturando la aireación primaria, se determinó el límite de retroceso.

En general los métodos gráficos proporcionan una indicación de los problemas potenciales de intercambiabilidad a ser considerados por un gas sustituto, y es un medio para determinar el ajuste requerido para dicho gas y así asegurar su intercambiabilidad. Ver **FIGURA 5 y 6**.

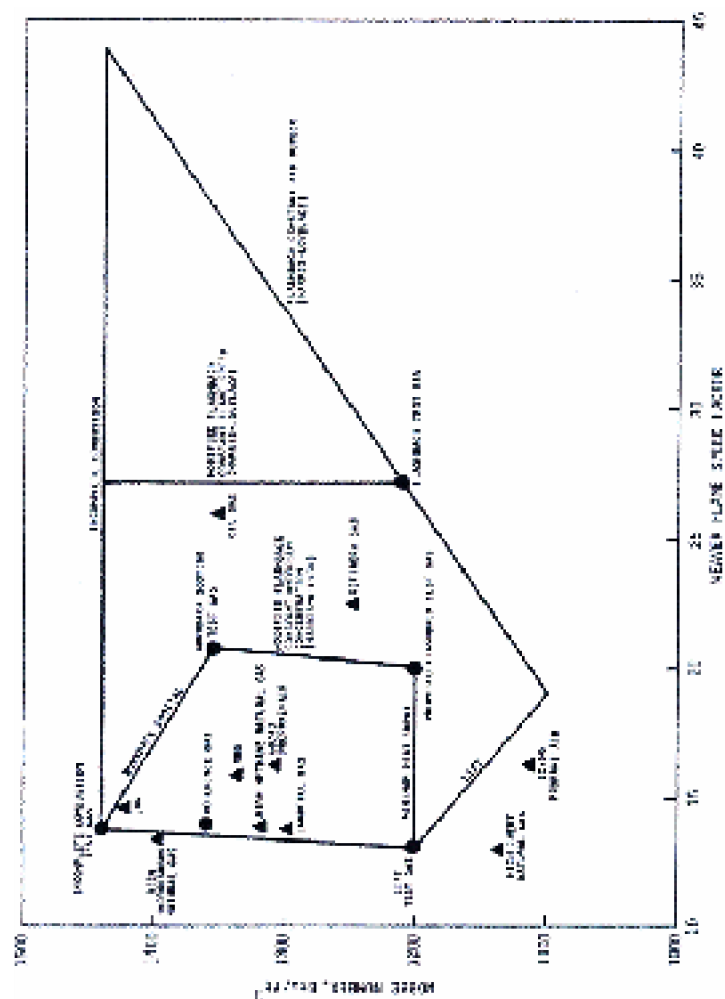


FIGURA 5. DIAGRAMA GILBERT – PRIGG MODIFICADO POR HARRY Y LOVELACE, Y HARRY Y WILSON.

c. Diagrama de Grumer.

Grumer, Harris y Rowe propusieron un diagrama de estabilidad de llama, basados 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 retroceso (g_F) y desprendimiento (g_B) fueron determinadas experimentalmente, empleados tubos cilíndricos largos. La **FIGURA 7** enseña este comportamiento para diferentes combustibles.

Van Krevelen y Chermin reportaron una generalización del diagrama para predecir la intercambiabilidad de gases multicomponentes (Ver **FIGURA 8**). En esta figura, el pico en

la curva de retroceso sobre el diagrama de estabilidad de llama generalizado, tiene las coordenadas (1.0, 1.0), para F_R y g_R . Las coordenadas del diagrama son determinadas por:

- Gradiente crítico reducido: $g_R = g/g_m$
- Concentración reducida de gas: $F_R = 1 + (F - F_m)$

Donde:

g : Gradiente límite de velocidad.

F : Concentración del gas como fracción estequiométrica.

g_m : Gradiente crítico de velocidad límite en el pico de la curva de retroceso.

F_m : concentración del gas a g_m .

La elección de la curva de desprendimiento está determinada por el porcentaje de Hidrógeno en el volumen libre de inertes.

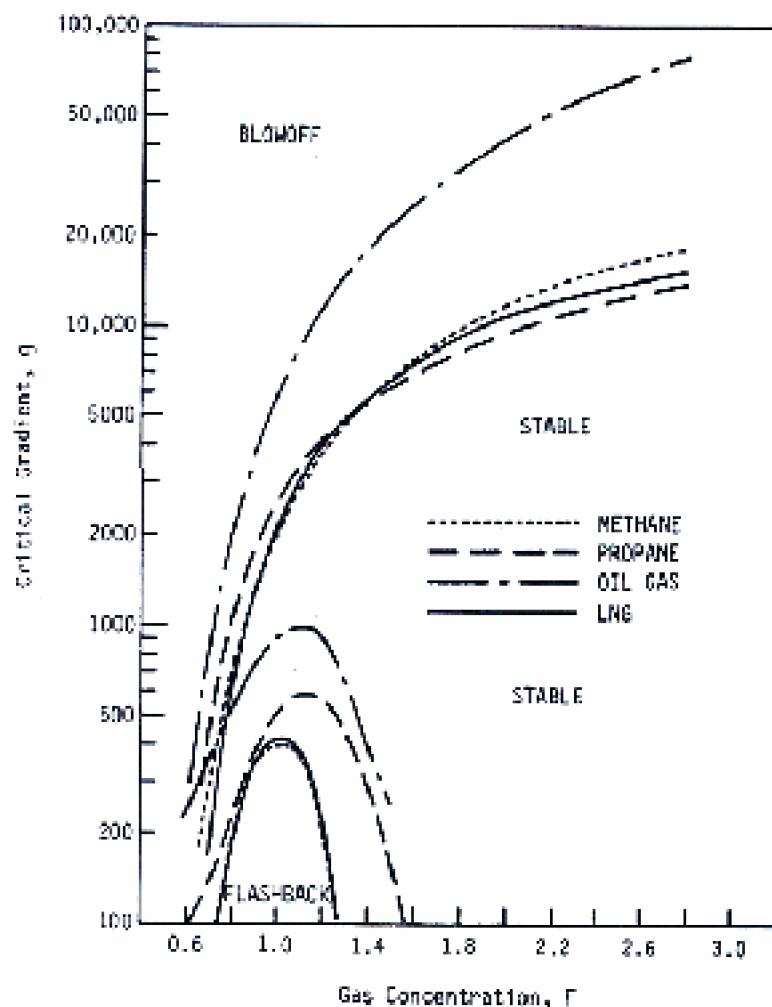


FIGURA 7. DIAGRAMA DE ESTABILIDAD DE LLAMA DE GRUMER

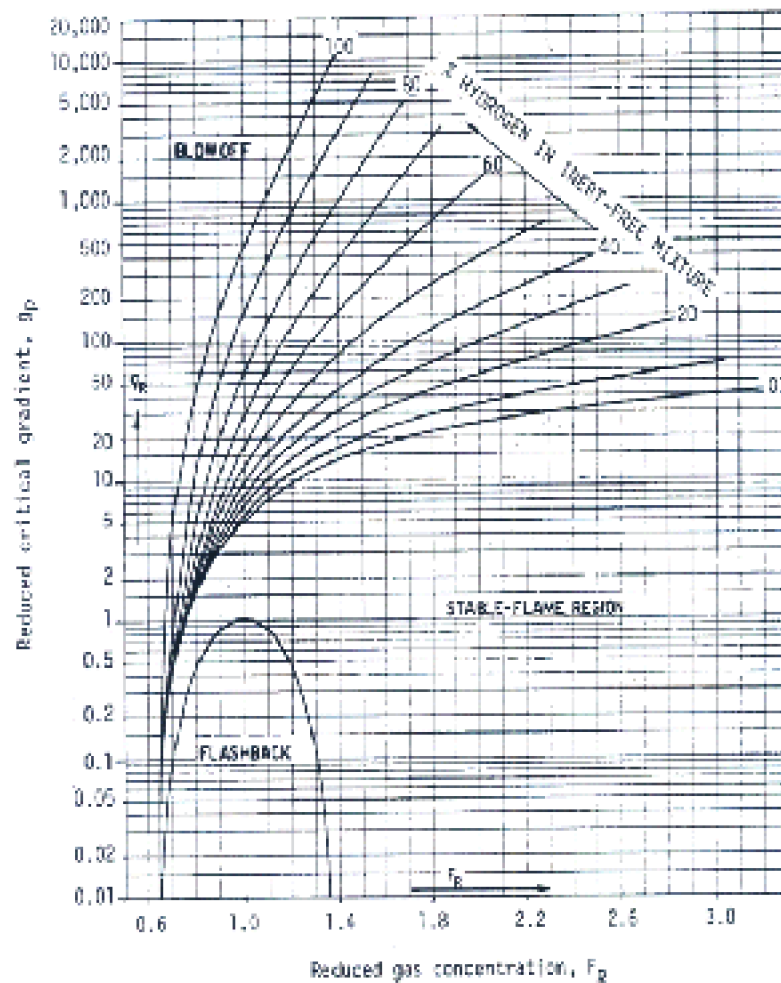


FIGURA 8. DIAGRAMA DE ESTABILIDAD DE LLAMA GENERALIZADO

d. Diagrama de Dutton.

El desarrollo de los métodos de intercambiabilidad gráficos se inició con los diagramas dos ejes. En uno, se evalúa el contenido energético del combustible que es suministrado a los quemadores, representado por el número de Wobbe. En el otro eje, se evaluaba la tasa de liberación de energía, representado por la velocidad de deflagración del mismo.

Esta metodología, suscitaba varios inconvenientes [11], [12]:

- El factor utilizado para calcular la velocidad de deflagración no era lo suficientemente preciso, por las deficiencias tecnológicas en los equipos empleados.
- Ciertos fenómenos en la llama no dependen de la tasa de alimentación del combustible ni de la velocidad de deflagración. Si un fenómeno particular de la llama

depende únicamente de estos dos parámetros, cualquier otro que se deseara estimar sería inadecuadamente pronosticado. Parámetros como las puntas amarillas o el hollín, no serían tomados en cuenta.

- Un punto ubicado en la gráfica, no representa una mezcla única de gases.

Para solucionar este inconveniente, se propuso la idea de incluir dentro del diagrama un tercer eje. Con ello dos gases con el mismo índice de Wobbe y velocidad de deflagración, no se ubicarían en un mismo punto del diagrama a menos que la tercera propiedad también fuera igual. Este método propuso clasificar el comportamiento de los gases por su composición química, generando 3 ejes para mezclas de Metano, Etano, Propano, Hidrógeno e inertes (Ver **FIGURA 9**).

Dutton, 6 años más tarde planteó nuevos métodos alternativos al diagrama de tres dimensiones con solo dos dimensiones, para el cálculo del índice de hollín, formación de CO y desprendimiento de llama [8], [9], [10].

- **Índice de formación de hollín**. Este índice de intercambiabilidad fue obtenido para 90 mezclas de gases compuestas por CH₄, C₃H₈, H₂ y N₂, reduciendo sucesivamente el suministro de aire primario a un quemador atmosférico hasta el punto donde se presentaba el primer indicio de deposición de hollín. La tasa de aireación bajo estas condiciones dividido la tasa de aireación de diseño, permite obtener el índice de formación de hollín. De los resultados experimentales se obtuvo el siguiente modelo matemático:

$$SI = 0.896 \times \tan^{-1} (0.0255 \times C_3H_8 - 0.0233 \times N_2 - 0.0091 \times H_2 + 0.617) \quad (24)$$

Como en la práctica algunas mezclas de gases pueden contener CO₂, C₂H₆, C₃H₆ y C₄H₁₀, es necesario tener en cuenta las equivalencias en fracción molar con los gases utilizados como base en el análisis, así:

$$CO_2 \square 0.8 \text{ N}_2 \quad C_2H_6 \square 0.5 \text{ C}_3H_8 \quad C_3H_6 \square C_3H_8 \quad C_4H_{10} \square 1.5 \text{ C}_3H_8$$

En la práctica el error que puede resultar de esta consideración no es superior al 4% (Ver **FIGURA 10**). Como criterio de intercambiabilidad se admite un valor máximo de 0.66 para el índice de formación de hollín [12].

- **Índice de combustión incompleta**. El estudio de las variables mas influyentes en el cálculo de este índice, arrojó los siguientes aspectos mas relevantes:
 - El índice de Wobbe es la característica más determinante para la formación de CO en un artefacto.
 - Existe una relación logarítmica entre el CO y el número de Wobbe: un aumento de 1.5 MJ/m³ en este último, representa duplicar las emisiones de CO.
 - El efecto del Hidrógeno solo se considera por su efecto en el cálculo del número de Wobbe, pues para las demás variables es despreciable.
 - Un incremento del 50% en la mezcla de (C₃H₈ + N₂) duplica las emisiones de

CO.

El estudio anterior arrojó varios modelos matemáticos para el cálculo del índice de combustión incompleta, teniendo una mejor aceptación el siguiente (Ver **FIGURA 11**):

Donde:

W: Índice de Wobbe (MJ/m^3).

PN: Porcentaje en volumen de ($\text{C}_3\text{H}_8 + \text{N}_2$).

H_2 : Porcentaje de Hidrógeno.

Como en la práctica algunas mezclas de gases pueden contener CO_2 , C_2H_6 , C_3H_6 y C_4H_{10} , es necesario tener en cuenta las equivalencias en fracción molar, con los gases utilizados como base en el análisis, así:

$0.6 \text{ CO}_2 \square \text{ N}_2 \quad \text{C}_3\text{H}_6 \square \text{ C}_3\text{H}_8 \quad \text{C}_4\text{H}_{10} \square 1.5 \text{ C}_3\text{H}_8 - 0.5 \text{ CH}_4 \quad \text{C}_2\text{H}_6 \square 0.5 \text{ C}_4\text{H}_{10} + 0.5 \text{ C}_3\text{H}_8$

Como criterio de intercambiabilidad se admiten valores para el índice de combustión incompleta de hasta 1.18, para gases cuyo índice de Wobbe se encuentre alrededor de 52 MJ/m^3 [12].

· **Índice de elevación de llama**. Se definieron dos estados de inestabilidad de llama para los puertos de un quemador:

- Parcialmente desprendido.
- Completamente inestable o extinta.

Para medir la condición de inestabilidad se definió un número L, conocido como número o índice de elevación de llama, el cual puede ser calculado con la siguiente expresión (Ver **FIGURA 12**):

$$L = (\tan^{-1}(8.59 \times X_{\text{CO}_2} - 5.01 \times X_{\text{C}_2\text{H}_6} - 2.89 \times X_{\text{H}_2} - 1.37) + 73.8) / 23.8 \quad (26)$$

Donde X es la fracción molar de cada componente.

El método propone que la estabilidad de llama puede relacionarse de la siguiente manera:

L = 0: No hay elevación de llama (desprendimiento).

L = 1: Entre el 1 y el 10% de las llamas se encuentran parcialmente desprendidas de los puertos.

L = 2: Entre el 11 y el 25% de las llamas están parcialmente desprendidas de los puertos.

L = 3: Entre el 26 y el 100% de las llamas están parcialmente desprendidas de los puertos.

L = 4: Entre el 1 y el 25% de las llamas están completamente desprendidas de los

puertos.

L = 5: Entre el 26 y el 50% de las llamas se encuentran completamente desprendidas de los puertos.

L = 6: Entre el 51 y el 100% de las llamas se encuentran completamente desprendidas de los puertos.

Como criterio de intercambiabilidad se sugiere valores para L de hasta 1.38 para asegurar la estabilidad de la llama ante el desprendimiento [12].

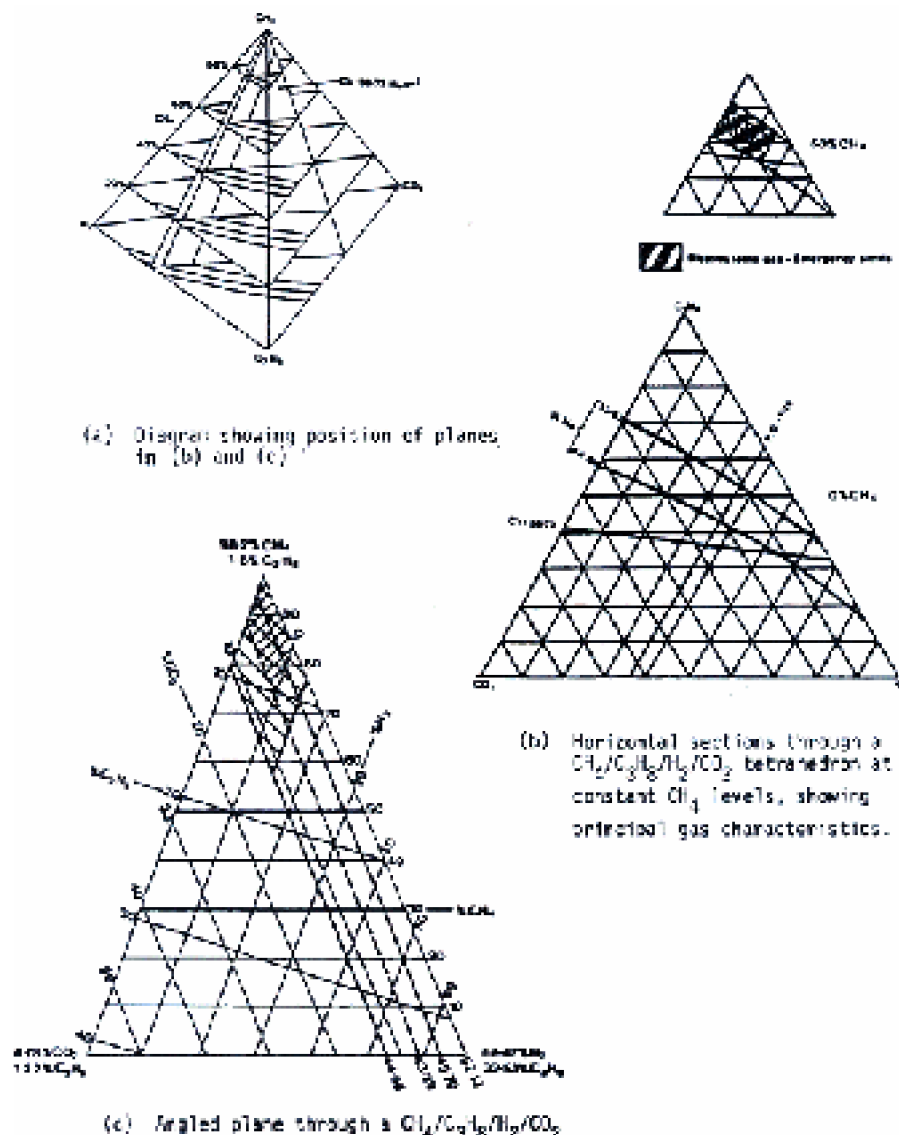


FIGURA 9. DIAGRAMA DE 3 EJES PARA LA PREDICCIÓN DE INTERCAMBIABILIDAD DE DUTTON

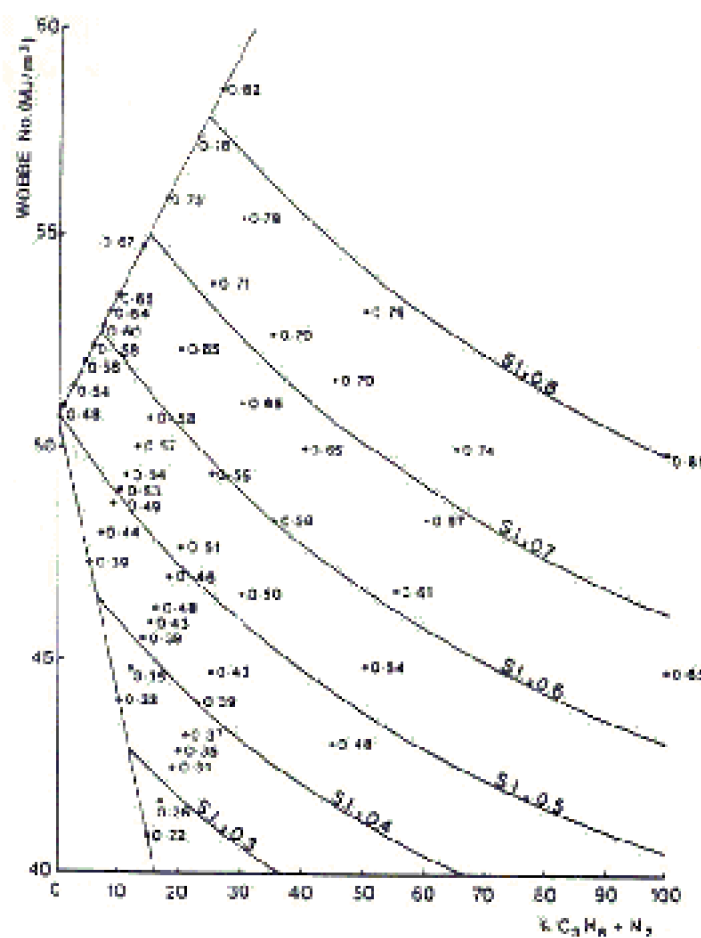


FIGURA 10. DIAGRAMA DEL ÍNDICE DE DEPOSICIÓN DE HOLLÍN DE DUTTON

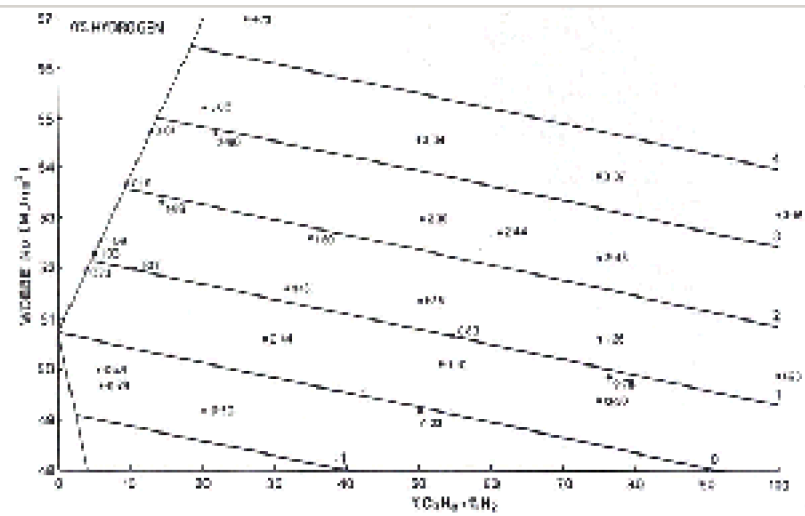


FIG. 2. Combustion of C_2H_6 with H_2 (combustion products: CO_2 , H_2O , CO , H_2)

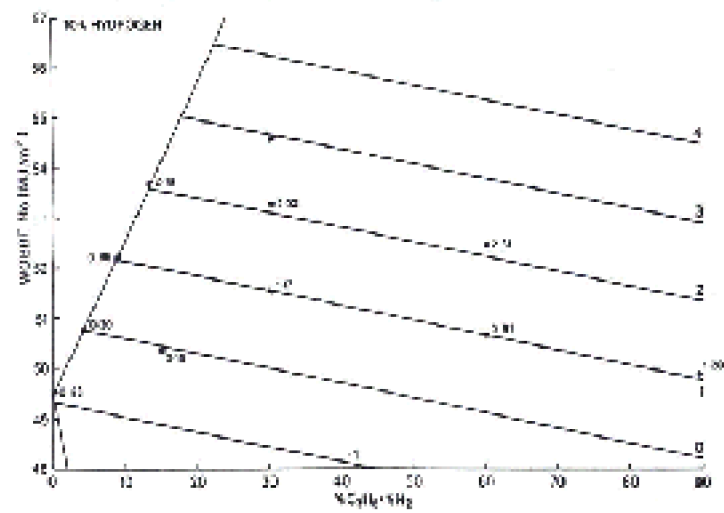


FIGURA 11. DIAGRAMAS DE PREDICCIÓN DE COMBUSTIÓN INCOMPLETA DE DUTTON

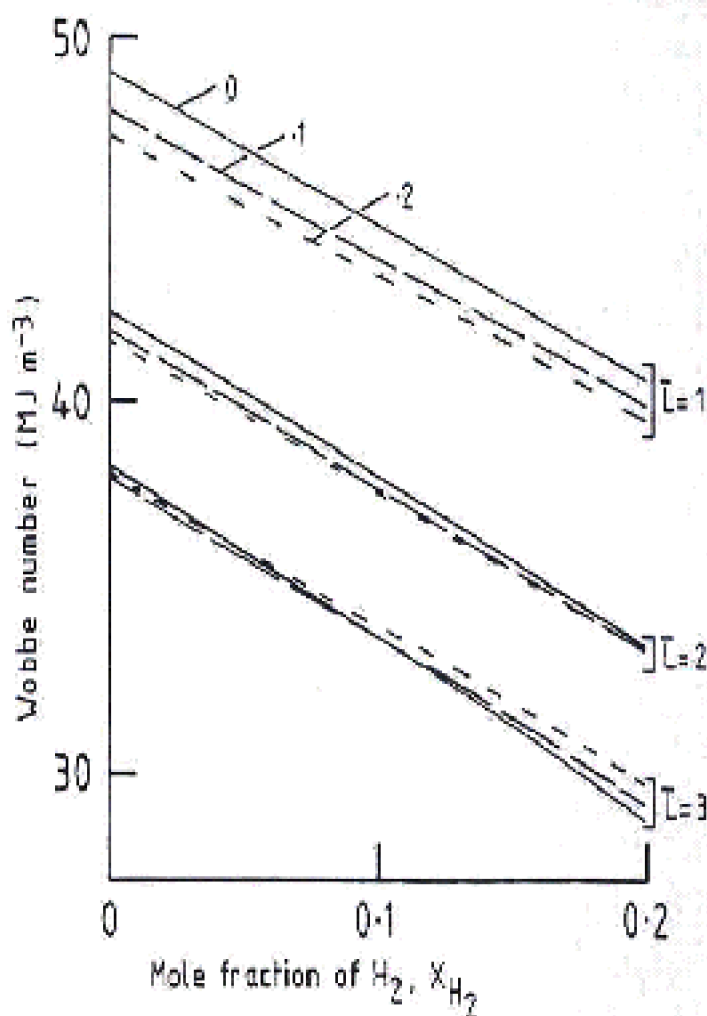


FIGURA 12. DIAGRAMA DE PREDICCIÓN DE ELEVACIÓN DE LLAMA DE DUTTON

e. Diagrama de Holmqvist

Se basa en la caracterización del número C_k , relacionado con la altura de cono azul en la llama de un quemador estándar:

$$C_K = \frac{K_i \times \sum (X_i \times X_{K_i})}{S^{1/2}} \quad (27)$$

Donde:

X_i : Concentración volumétrica del componente i .

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

S: Gravedad específica del gas.

Ki: Factor de corrección según la concentración de gases inertes. (Ver FIGURA 13).

El área de intercambiabilidad se indica en la FIGURA 14. Se permiten pequeñas variaciones respecto al gas de referencia: CK $\square$ 3%, W $\square$ 5%.

f. Diagrama de Van der Linden.

Se basa en el diámetro del inyector, la presión de suministro del gas y el número de Wobbe. Los ejes $D.P^{1/2}/Da.Pa^{1/2}$ y $D.W/Da.Wa$ fueron seleccionados para representar escalas diagonales para el "modulo de gas" y poder calorífico. El diagrama no representa variaciones de la velocidad de deflagración relacionada con cambios en la composición del gas.

Para un gas particular y un gasodoméstico (quemador), es posible derivar líneas que representan los límites del fenómeno de combustión, tal como se indica en la FIGURA 15.

Para caracterizar la población general de quemadores, se requiere un trabajo experimental extensivo con los diferentes gases y con los quemadores más críticos. Desde el diagrama es posible deducir si un gas de alto o bajo índice de Wobbe podría ser aceptado sin ajuste en el quemador, de igual forma para cuantificar el cambio en la presión o el diámetro del inyector requerido para proporcionar un aceptable suministro de gas sustituto.

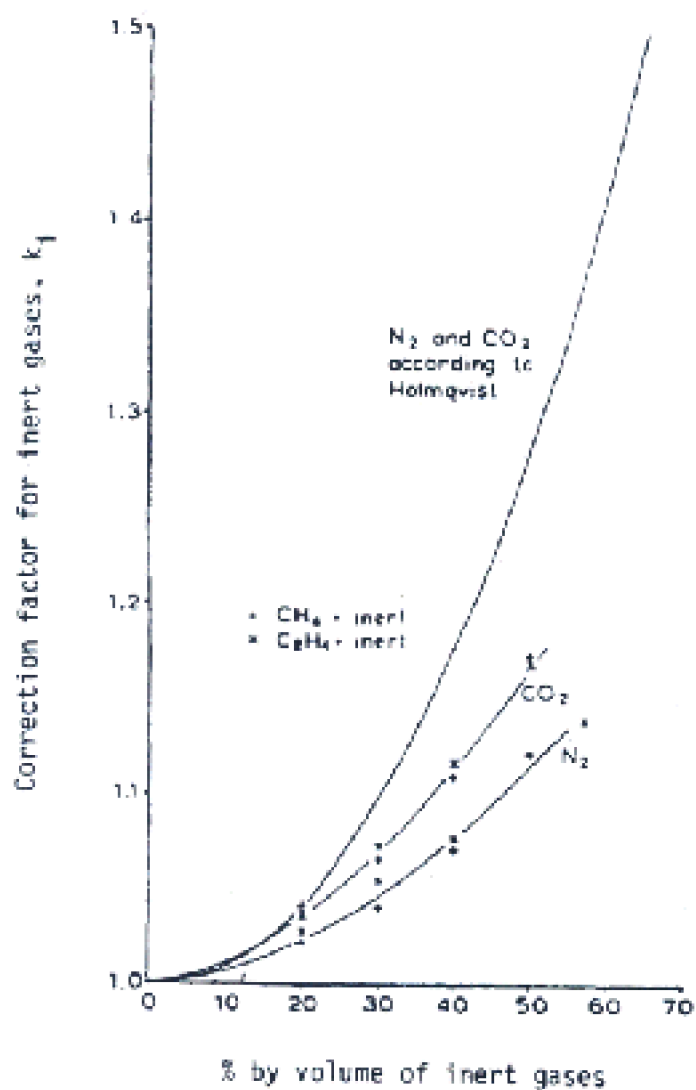


FIGURA 13. FACTOR DE CORRECCIÓN HOLMQVIST PARA CK

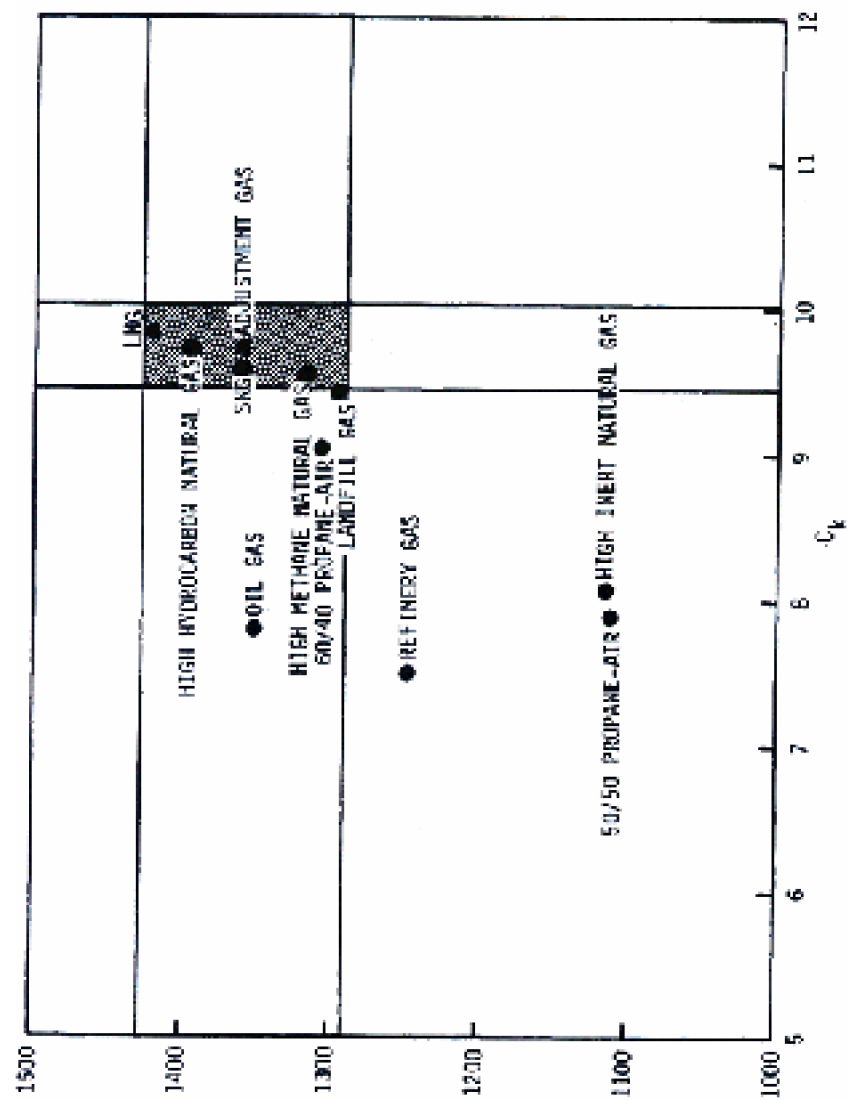


FIGURA 14. DIAGRAMA DE PREDICCIÓN DE HOLMQVIST

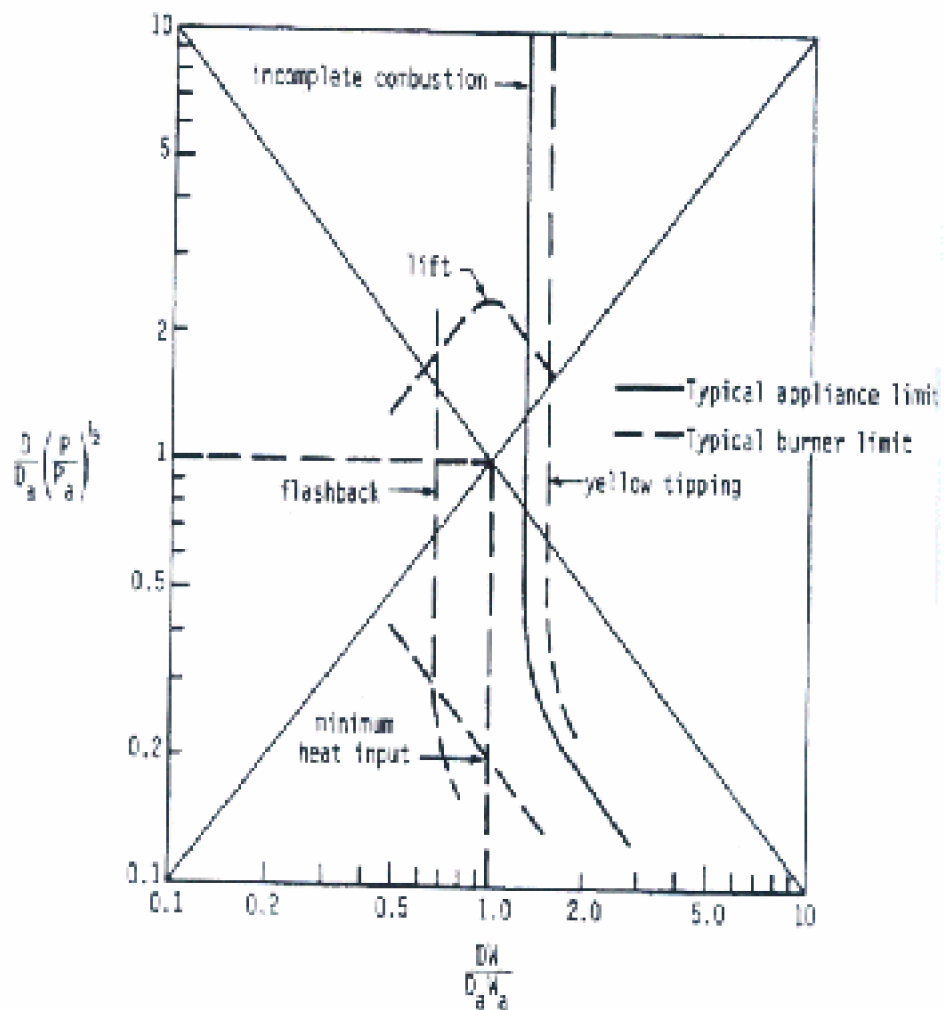


FIGURA 15. DIAGRAMA TÍPICO DE VAN DER LINDEN

Grupo 4. Otros métodos.

a. Sommers – Ruhrgas.

El método propone que dos gases a presión de suministro constante y sin ajuste en el quemador son intercambiables si se permiten cambios limitados en la potencia de entrada. Sommers demostró que cambiar gas natural L por gas natural H a presión constante, no involucra cambios apreciables en el gasodoméstico. Sin embargo, la potencia se reduce en un 16%, correspondiente a la relación existente entre los índices de Wobbe. Este método no contempla criterios de estabilidad de llama y su aplicación se restringe solamente para los gases de segunda familia.

Comparación entre métodos de intercambiabilidad [1].

- Todos los métodos de intercambiabilidad descritos, son empíricos e introducen información fenomenológica únicamente de una simplificada.
- Mejorar los métodos de intercambiabilidad existentes, requiere de información fenomenológica respecto a los mecanismos involucrados en las llamas, básicamente en las incertidumbres inherentes al cálculo de la velocidad de deflagración.
- Involucrando información referente a la combustión del gas y al diseño mismo del quemador, se pueden refinar los métodos actuales de intercambiabilidad, desde el punto de vista predictivo.
- Las siguientes tablas, ilustran un resumen de los métodos.

GRUPO	Apellido (Año)	Alcance de Fases	Demanda de Datos	Edad de Datos	Parámetros de Datos	Región de Datos	Condición de Datos
1	Wobbe (1812)	X					
	A.G.A. (1933)	X					
	Wobbe (1941)	X					
	Wobbe (1941)	X					
	Wobbe (1941)	X					
2	A.G.A. (1933)	X	X	X	X		
	Weaver (1933)	X	X	X	X		X
3	Wobbe (1941)	X	X	X	X	X	X
	Wobbe (1941)	X	X	X	X	X	X
	Wobbe (1941)	X	X	X	X		
	Harris (1941)	X	X	X			X
	Lewis (1941)	X	X	X			X
	France (1941)	X		X			
	Wobbe (1941)	X	X	X	X		
	Wobbe (1941)	X	X	X	X		
	Wobbe (1941)	X	X	X	X	X	X
	Wobbe (1941)	X	X	X	X	X	X
4	Wobbe (1941)	X					

TABLA 4. RESUMEN DE LOS MÉTODOS DE INTERCAMBIABILIDAD AMERICANOS Y EUROPEOS SEGÚN LOS PARÁMETROS QUE INVOLUCRA EN SU PREDICCIÓN [1]

TÍPO GAS	WILLIAM	ANDY	A.G.A.	ACA			WEAVER				
	160 ± 1%	160 ± 1%	0.775 ± 0.025	L	F	Y	0.325 ± 0.075	JL = 0.16	JF = 0.13	JO = 0	JY = 0.2
GAS LÍQUIDO	I	I	I	I		I		I	I	I	I
GAS LÍQUIDO Cálculo	I	M	I	I		M		I	I	A	X
GAS LÍQUIDO Varios	X	X	X	X		I	X	I	I	I	I

TABLA 5. COMPARACIÓN DE LAS PREDICCIONES DE INTERCAMBIABILIDAD, SEGÚN LOS MÉTODOS AMERICANOS [1]

Diagrama	Sección				Alto y Bajo (modificación Harris – (Melano))			Alto y Bajo (modificación Harris – (Melano))		Especific	
Gaseo/Ajuste	Gas natural Leq (alto Melano)				Melano			Melano		Melano	
Perímetro	Desar.	Rebuc.	Comb. Incom.	Pla. Ana.	Desar.	Rebuc.	Comb. Incom.	Rebuc.	Poder. Termic.	Estab. Llama	Poder. Termic.
GN a lo Cl. A	I			I		I	I	I	I		
GN a lo Cl. B	I			M		I	I	I	I		
GN a lo Cl. C	X			I	X	I	I	I	X	X	X

I Interconvertible; M Moderadamente intercambiables; X No son intercambiables

TABLA 7. COMPOSICIÓN DE LOS GASES NATURALES UTILIZADOS EN LOS ENSAYOS DE INTERCAMBIABILIDAD PARA LOS MÉTODOS AMERICANOS Y EUROPEOS [1]

Elemento/Propiedad	GN, alto % de CH_4	GN, alto % de C_2H_6	GN, alto % de $inert$
Melano	28.1	80.8	79.3
Evano	2.0	7.8	3.0
Propano		4.9	1.1
Butano		2.0	0.4
Hidrocarburos saturados		0.7	0.2
Nitrógeno	2.30	3.7	15.3
Unidad de Calor	1.5	11.1	11.1
PCS (BTLN)	294.5	1162.1	201.4
Gravedad Específica	0.5702	0.6539	1.6539

TABLA 7. COMPOSICIÓN DE LOS GASES NATURALES UTILIZADOS EN LOS ENSAYOS DE INTERCAMBIABILIDAD PARA LOS MÉTODOS AMERICANOS Y EUROPEOS [1]

Predicción de intercambiabilidad y opciones futuras [4].

Como ya se ha mencionado, se consideran gases totalmente intercambiables aquellos donde la potencia de entrada al artefacto se mantiene en un valor razonablemente constante, se garantiza una combustión completa, estabilidad de llama y un adecuado encendido de los quemadores sin necesidad de realizar ningún ajuste en el artefacto.

Es de anotar, antes de detallar cuales son las perspectivas futuras, que el concepto de intercambiabilidad de gases ha modificado su connotación al de calidad de gases. Los últimos estudios realizados por la Asociación Australiana de Gases denotan este concepto, relacionándolo con las propiedades físicas del gas, tales como poder calorífico, gravedad específica e índice de Wobbe. Esta última propiedad continúa vigente, proporcionando una medida en el cambio de la energía entregada por la cabeza del

quemador, teniendo sus conocidas implicaciones en la combustión y el desempeño mismo del artefacto [5].

Debe tenerse en cuenta que un amplio número de gases de diferentes composiciones puede ser usado si se posibilita la realización de algunas modificaciones sobre el artefacto y/o la presión de suministro. A continuación se presentan tres posibles opciones para permitir empleo de una gran variedad de gases, con base en la experiencia del Reino Unido, y más recientemente desde Europa, donde algunas ciudades han tenido que adaptarse al uso de gases de la familia L y H.

Método de la presión de suministro variable.

Este método involucra el cambio en la presión de suministro del gas, buscando mantener constante la potencia en el artefacto sin modificación del artefacto. Este procedimiento fue adoptado hace algunos años por Francia y Bélgica. La principal ventaja y desventaja de este método se presenta a continuación:

Ventaja	Desventajas
No se requiere ninguna modificación sobre el diseño del artefacto.	- El desempeño del artefacto puede ser malogrado como resultado de un cambio considerable en la aireación del quemador: - Desprendimiento de llama cuando se tiene un bajo número de Wobbe - Combustión incompleta cuando se tiene un alto número de Wobbe - Es más de lo práctico para controlar la regulación de la presión de suministro dentro de los límites

TABLA 8. MÉTODO DE LA PRESIÓN DE SUMINISTRO VARIABLE

Se observa claramente que la principal ventaja de este método es que no se requieren ajustes o modificaciones sobre el artefacto. En contra tenemos la dificultad de controlar la presión de distribución del gas dentro de unos límites lo suficientemente cerrados que garanticen una solución, y el hecho de necesitar un artefacto que presente una tolerancia considerable a los cambios en la rata de aireación primaria y la velocidad de flujo en los puertos asociados a cambios en el número de Wobbe y la presión de suministro. Por ejemplo, considerar un cambio desde un gas de referencia del grupo H a un gas de referencia del grupo L, puede involucrar un decremento en el número de Wobbe del 18%. En un quemador atmosférico diseñado para operar con una aireación primaria del 50% con un gas de referencia del grupo H, tiene que desempeñarse satisfactoriamente con un gas de referencia del grupo L, donde se presenta una elevación de la aireación primaria a un 61% y la presión del quemador debe aumentarse en un 40%.

El problema de diseño de los quemadores para ajustarse a estos cambios en la composición del gas, se reduce a la necesidad de evitar la inestabilidad de llama (desprendimiento) para gases con bajo número de Wobbe debido al incremento de la velocidad de flujo en los puertos del quemador y el requerimiento de una buena combustión para gases con alto número de Wobbe. Adicionalmente, el sistema de ignición del artefacto debe poder tolerar los cambios en el tamaño de la llama asociado

con los cambios en la aireación primaria y a presión de suministro.

El diseño de los quemadores y los artefactos que permitan el controlar los factores anteriores es factible, pero probablemente la eficiencia de operación del artefacto dependiendo de la variación de la composición de los gases de trabajo. La aplicación de este método en el Reino Unido se dificulta debido al control que se requiere realizar sobre la presión de suministro dentro de unos límites muy cerrados y por el hecho de que la presión de suministro es regulada normalmente dentro de un margen acostumbrado por el usuario gracias a reguladores instalados en el artefacto mismo.

Método de la presión de suministro constante.

Este método involucra cambios menores en los componentes del artefacto (inyectores de gas) y el mantenimiento de la presión de suministro constante, para mantener la potencia de entrada constante. La principal ventaja y desventaja de este método se presenta a continuación:

Ventaja	Desventajas
No se requiere cambio en la presión de distribución del gas	- Algunos artefactos requieren modificaciones para ser utilizados con este método - Es posible aumentar el desempeño del artefacto generado por una disminución adecuada en la tasa de aireación de quemador

TABLA 9. MÉTODO DE LA PRESIÓN DE SUMINISTRO CONSTANTE

El método tiene menos restricciones sobre el diseño del artefacto que el método de la presión de suministro variable, pero puede observarse alguna variación en la tasa de aireación cuando el número de Wobbe es cambiado. Para un cambio de gas de referencia del grupo H al grupo L, el mantener la potencia adecuada en el artefacto implica un aumento en el diámetro del inyector de aproximadamente un 22%, lo cual hace que el momentum lineal del gas se incremente, con el consecuente aumento de la aireación primaria del quemador aproximadamente en un 4%. Sin embargo, estos cambios son considerados pequeños en comparación con los que se presentan con el método de la presión de suministro variable.

El método de la presión de suministro variable fue adoptado en Alemania para el uso de gases del grupo H y L.

Método del módulo constante.

El método del módulo del gas, es el método más completo de todos. Este procedimiento involucra adaptar las condiciones de operación para que el módulo del gas permanezca constante, entendiéndose por módulo del gas a la relación entre la raíz cuadrada de la presión de suministro y el número de Wobbe, acompañado por un adecuado cambio en el diámetro del inyector. La principal ventaja y desventaja de este método se presenta a continuación:

Ventaja	Desventajas
Adaptación constante del tamaño del artefacto con conservar la rata de aireación, presión de suministro y la columna de entrada del artefacto	- Se requiere realizar modificaciones al artefacto. Cambio de inyectores. - Se requiere variar nuevamente las condiciones de suministro.

TABLA 10. MÉTODO DEL MÓDULO CONSTANTE

La adaptación de acuerdo al principio del módulo del gas, mantiene la potencia de entrada al artefacto constante y la aireación primaria del quemador en niveles adecuados. Considerando por ejemplo un cambio en el gas de referencia del grupo H al grupo L, el tamaño del área de salida puede necesitar un incremento para mantener la potencia de entrada y la presión de suministro disminuida para que el módulo del gas permanezca constante. En consecuencia, como el número de Wobbe fue disminuido, la velocidad del gas mantiene el mismo momentum y la rata de aireación es la adecuada para la misma potencia de diseño.

Este método ha sido usado con éxito cuando se tiene grandes cambios en el número de Wobbe. Donde la gran ventaja es que mantiene el mismo nivel de servicio y desempeño del artefacto.

Una alternativa que presenta al método del módulo del gas para mantener constante el desempeño del artefacto es realizar un ajuste en el diámetro del inyector para corregir la potencia de entrada y ajustar la aireación del quemador por medio de un obturador de la entrada de aire primario. Sin embargo, es reconocido que la rata de aireación primaria no puede ser tarada fácilmente dentro de unos límites aceptables, pero la llama puede ser ajustada de acuerdo al tamaño del cono de la llama. Esta dificultad puede ser superada, por ejemplo, fijando un orificio de control de aire en la garganta del quemador.

Conclusión preliminar.

¿Quién tiene la última palabra en este debate? ¿Es el distribuidor de gas quien tiene que garantizar una mayor flexibilidad en las condiciones de suministro? ¿Es el fabricante del artefacto quien debe asegurar una mayor competitividad de su producto? ¿O es el usuario quien se beneficia con el buen desempeño del artefacto y debe pagar el precio de los ajustes para garantizar su intercambiabilidad a los diferentes gases existentes?

3. DESCRIPCIÓN DE LOS GASES EMPLEADOS EN EL ESTUDIO.

Los gases naturales colombianos poseen diversas composiciones, siendo los gases de Cusiana y Guajira, los más interesantes para su análisis desde el punto de vista de la intercambiabilidad. Ambos gases poseen los valores extremos en su contenido de Dióxido de Carbono, gas de gran influencia al momento de evaluar el índice de Wobbe.

Se analizará el escenario de mayor factibilidad, correspondiente a una reducción del contenido de CO_2 hasta el 2%. Se considero este caso por tres razones fundamentales:

- La normativa sobre calidad del gas en cuanto a su transporte por gasoducto, limita la concentración del CO_2 hasta un 2% [19]. La eliminación de este gas se ve justificada para prevenir daños por corrosión en el gasoducto debido a la formación de hidratos de carbono además de evitar la pérdida de capacidad de transporte de gas combustible.
- El CO_2 se debe eliminar al máximo para atenuar la disminución del contenido energético por unidad de volumen en el gas, debido a que este inerte no contribuye energéticamente al proceso de combustión.
- El CO_2 disminuye la velocidad de deflagración lo cual puede generar inestabilidad de llama por desprendimiento.

El tema de la eliminación del CO_2 toma más importancia ahora, por la necesidad de

abastecer el centro del país con el gas de Cusiana frente a la inminente escasez de petróleo y gas, proyectada para el año 2005 [19].

La Empresa Colombiana de Petróleo, ECOPETROL y la Agencia para el Comercio y Desarrollo de los Estados Unidos TDA, firmaron un acuerdo para desarrollar los estudios de la planta de tratamiento de gas de Cusiana. Esta agencia subvencionará el proyecto con 395 000 dólares para los estudios de la planta, la cual se proyecta para tener una capacidad de 180 millones de pies cúbicos por día. [17], [18].

Presentamos a continuación en la **Tabla 11**, la composición de estos gases y algunas de sus propiedades físico – químicas más importantes:

Elemento / Propiedad	G20	Guajira	Cusiana sin tratamiento	Cusiana con 2% CO ₂	Cusiana Preparado N° 1	Cusiana Preparado N° 2
Metano (%Vol.)	100	97.70	75.63	70.32	75.44	75.53
Etano (%Vol.)	---	0.30	11.15	11.79	12.49	12.56
Propano (%Vol.)	---	0.2	4.7	5.34	5.26	5.28
n-Butano (%Vol.)	---	---	2.36	3.0	2.71	2.73
Nitrógeno (%Vol.)	---	1.29	0.91	1.55	2.2	2.0
Óxido de Carbono (%Vol.)	---	0.37	5.2	3.0	1.9	1.9
Densidad relativa d	0.555	0.566	0.7417	0.7317	0.732	0.732
PCS (kWh/m ³)	10.49	12.38	12.03	12.63	13.263	13.299
Inclina de Volúmenes (kWh/m ³)	14.00	17.79	14.01	14.77	15.5014	15.544
γ _g (gr/aire/m ³ agua)	9.52	9.44	11.04	11.43	11.35	11.38

TABLA 11. GASES COLOMBIANOS EMPLEADOS EN EL ESTUDIO DE INTERCAMBIABILIDAD.

DESCRIPCIÓN DE LOS ARTEFACTOS DE PRUEBA: CALENTADORES INSTANTÁNEOS DE AGUA [15], [16].

En los países con estaciones y en general, aquellos que posean zonas climáticas frías, el calentamiento del agua se convierte en una necesidad.

En el caso doméstico el uso de agua caliente tiene dos aplicaciones generales:

- *Cocina.* Generalmente los lavaplatos automáticos requieren temperaturas del agua que oscilan entre 40 °C y 60 °C.
- *Baño.* Para efectos de aseo personal, las temperaturas en los baños son muy subjetivas y se asocian directamente a las necesidades particulares de confort de cada usuario. Sin embargo se maneja un rango entre 30 °C y 35 °C, amparado en criterios mínimos de seguridad.

Los calentadores de acuerdo al método empleado para realizar su función, se clasifican en calentadores de acumulación, artefactos que centralizan la producción de agua caliente en un tanque y los calentadores instantáneos de agua o calentadores de paso, artefactos que son el objeto de este estudio.

Definición.

Un calentador de paso a gas es un artefacto que emplea gas combustible para la producción instantánea de agua caliente, es decir al paso del agua por una tubería o serpentín, esta es calentada inmediatamente por la transferencia de calor generada en el proceso de combustión, de los humos calientes (hasta 160° °C) con la tubería conductora del agua.

La principal característica de estos calentadores es que calientan el agua a medida que esta se consume: cuando se abre la llave del agua correspondiente, se establece la circulación de agua y se permite el encendido automático o manual del quemador, calentándose el agua al pasar por un serpentín de calentamiento.

Este calentador se debe ubicar cerca de los puntos de consumo, para evitar las pérdidas de calor que involucran los recorridos largos de tubería. Una de sus principales características, es que solo calientan el agua que se requiere utilizar, deteniendo el flujo del gas y parándose automáticamente al cesar su consumo, con el consiguiente ahorro de energía.

Características generales.

- El encendido del quemador de gas está mecánicamente relacionado con la presión de suministro del agua. Una presión hidráulica superior a 15 psi,
- posibilita la apertura de la válvula de gas y su consecuente paso hacia el quemador. La presión del agua realiza su trabajo al momento de iniciar la demanda de agua caliente (apertura de una llave).
- Una variación del caudal (cuando se abre o se cierra otra llave de agua caliente) o de la presión del agua (fluctuaciones de la presión hidráulica durante el día), ocasiona la variación de la temperatura del agua a la salida del calentador.
- No poseen aislamiento térmico en la zona de calentamiento.
- Ocupan muy poco espacio, lo cual permite su instalación en recintos pequeños.
- La cantidad de agua caliente que se puede obtener es ilimitada, a diferencia de un calentador de acumulación donde la reserva de agua caliente depende del volumen de agua calentado (acumulado).
- Las temperaturas finales del agua caliente se ven afectadas por las distancias entre el calentador y los puntos de consumo, además de la demanda simultánea en dichos puntos.

Elementos constitutivos.

Esencialmente, en un calentador instantáneo de agua tenemos varios elementos básicos constitutivos (Ver **IMAGEN 1 y 2**):

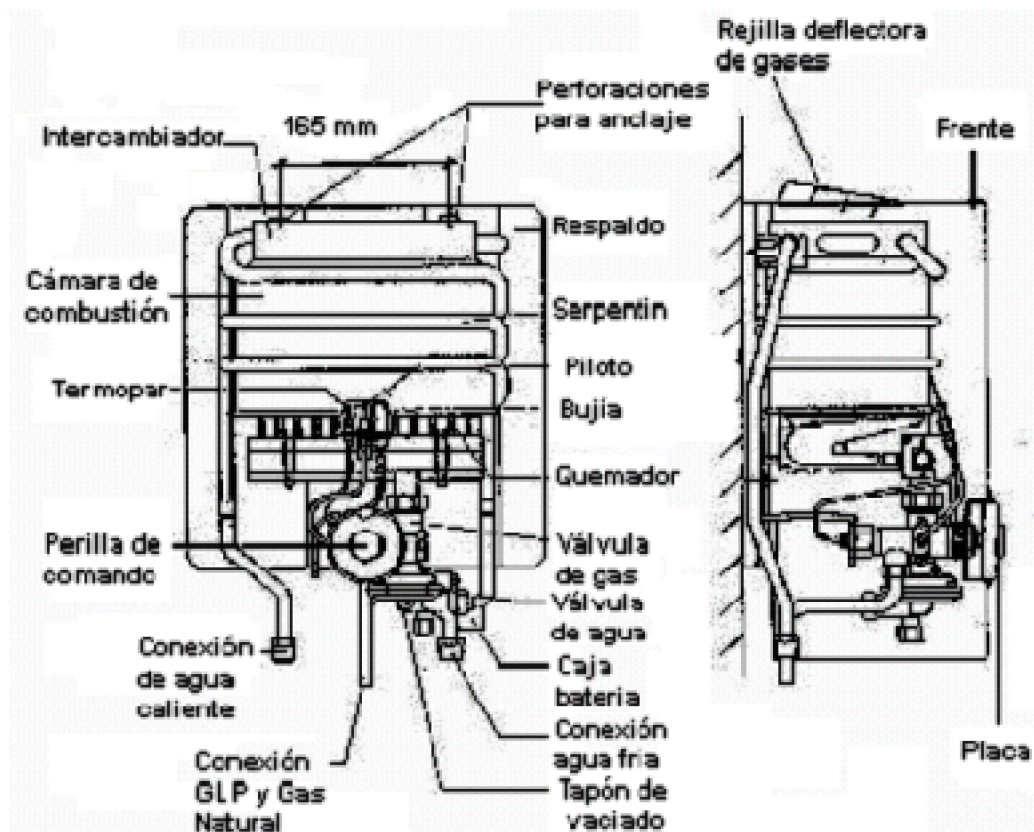


IMAGEN 1. ELEMENTOS CONSTITUTIVOS DE UN CALENTADOR INSTANTÁNEO DE AGUA.

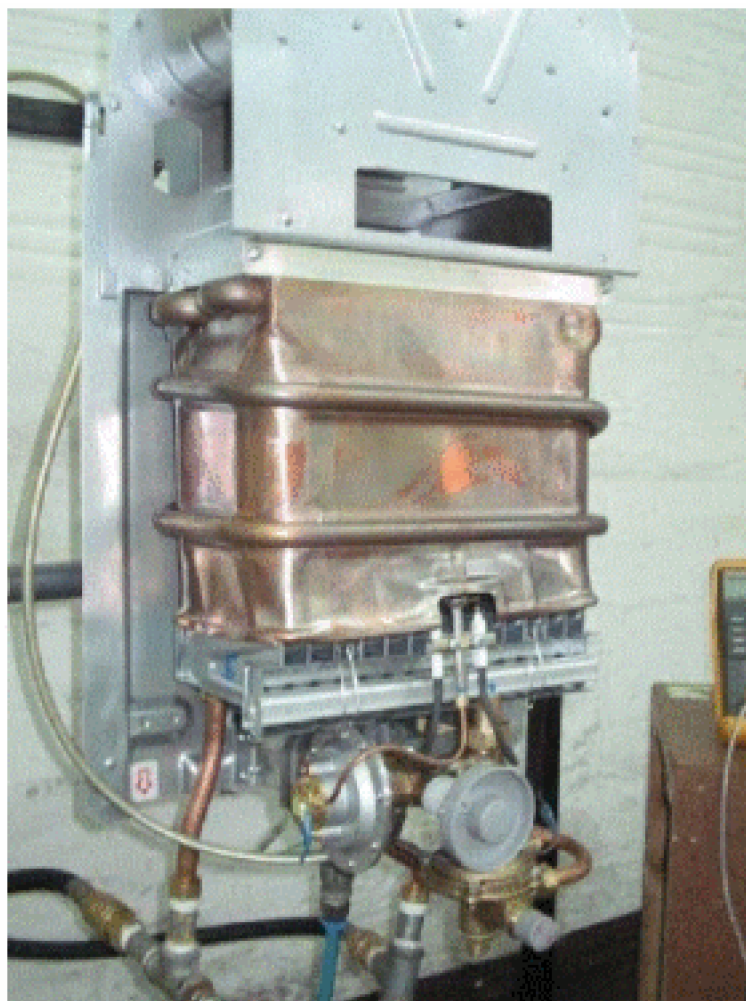


IMAGEN 2. VISTA GENERAL DEL CALENTADOR INSTANTÁNEO DE AGUA.

- Quemador atmosférico de gas.

Este elemento es el encargado de canalizar al máximo la transformación físico - química que sufre el combustible en el momento de la combustión, en forma de calor al agua. Se le denomina atmosférico porque tanto las condiciones de descarga de combustible como las de arrastre de aire por el efecto combinado del chorro de gas y el mezclador convergente - divergente (vénturi) se realizan bajo los efectos de la presión y la temperatura atmosférica del lugar.

Generalmente para este tipo de calentadores, se disponen en serie varios quemadores constituidos por dos placas troqueladas, cada una formando en alto relieve las zonas convergente – divergente del vénturi, las cuales quedan completamente definidas al unir ambas partes.

- Serpentín o intercambiador de calor por donde circula el agua.

Este serpentín va fijado alrededor de una cámara de combustión, sitio donde los humos calientes (producto de la combustión) transfieren el calor al serpentín y este a su vez, la

transmite al agua cuando circula por su interior. Este serpentín es fabricado en tubería de Cobre.

- Válvula de agua.

Elemento que se encuentra ubicado antes del serpentín. Posee un diafragma interno, el cual sufre una deformación al momento de circular el agua. Esta deformación permite el desplazamiento de un tapón, el cual facilita el paso del gas hacia los quemadores. Como características básicas, podemos mencionar las siguientes:

- Posee a la entrada del flujo de agua, una malla metálica que evita la entrada de elementos extraño que pudieran bloquear el movimiento libre del diafragma al paso del agua.
- Tiene un tornillo regulador del flujo de agua, empleado para ajustar la temperatura del agua cuando se tienen fluctuaciones en la presión hidráulica: a menor caudal, mayor temperatura.
- Algunos modelos de calentadores poseen incorporada una válvula de alivio contra sobre presiones en la línea hidráulica (150 psi).
- Válvula de gas.

Elemento que integra el funcionamiento de la válvula de agua, el sistema de termoprotección, el piloto de encendido y la tasa de flujo de gas hacia los quemadores, por intermedio de la perilla de mando. La operación integradora de estos elementos se describe a continuación:

- *Encendido del piloto.* La perilla de control se gira hasta cierta posición que permite el paso de gas al piloto. Este se enciende generalmente, con la ayuda de un arco eléctrico proveniente de una batería.
- *Calentamiento del termopar.* Este elemento hace parte del sistema de termoprotección. El termopar es un bimetálico que se encuentra adyacente a la llama del piloto y que al momento de calentarse, genera una diferencia de potencial que permite el accionamiento de un electroimán, el cual abre o cierra una compuerta para el paso de gas a los quemadores del calentador. Si se presenta el apagado accidental de la llama, el termopar se enfría y automáticamente. Se debe tener en cuenta que la posición de la termocupla respecto al piloto debe permanecer invariable, aproximadamente entre 3 y 4 mm.
- *Encendido de los quemadores.* La perilla de mando puede girarse a la posición deseada (alto – bajo), pero solo hasta que se de la circulación del agua, se hace posible el encendido de los quemadores con la llama piloto.
- Sistema de control de atmósfera [14].

La instalación de artefactos a gas requiere ductos de evacuación de los productos de la combustión en función de su potencia nominal. Aquellos con una potencia menor o igual

a 12 kW (referido al poder calorífico superior) se clasifican como Tipo A y no necesitan ducto de evacuación. En este caso y según la norma NTC 3531 (Artefactos domésticos que emplean gases combustibles para la producción instantánea de agua caliente para usos a nivel doméstico. Calentadores de paso) expone como requisito adicional el empleo de un dispositivo de control de la contaminación de la atmósfera, el cual debe interrumpir el paso de gas cuando en la atmósfera del local exista una concentración mayor a 100 ppm de CO. Este dispositivo se acciona por bajo nivel de oxígeno o por acumulación de partículas en el intercambiador de calor.

Condiciones de instalación y referencias empleadas.

La Norma Técnica Colombiana NTC 3643 *“Especificaciones para la instalación de gasodomésticos para la producción instantánea de agua caliente para uso doméstico: Calentadores de paso continuo”*, es la encargada de hacer las recomendaciones para la instalación de dichos equipos.

Las especificaciones básicas para el suministro de gas en este tipo de artefactos se encuentran consignadas en la NTC 3527 – Reglas comunes aplicables a la construcción y ensayo de artefactos que emplean gases combustibles para usos domésticos, comerciales e industriales -. La conexión y puesta a punto del calentador de paso a gas, debe realizarse por personal técnicamente capacitado, donde antes de la puesta a punto del equipo se deben verificar las condiciones de ventilación y evacuación de humos establecidas en la NTC 3631 y NTC 3833.

El HA-5 por su potencia no requiere ser conectado a ducto de evacuación de humos, pero debe cumplir con la NTC 3631 referente a la ventilación del recinto (esto, según la NTC 3531, primera actualización. Junio 24/1998). No obstante este equipo trae un sistema de detección de contaminación de atmósfera, lo cual impide el viciado del recinto.

La instalación general del calentador de paso, depende en gran medida de su clasificación en función de la potencia nominal que se indica en la placa de especificaciones. Por lo general, se consiguen tres referencias que denotan tres caudales de agua a calentar: HA5 (5 litros por minuto), CPG 10 (10 litros por minuto) y CPG 13 (13 litros por minuto). Los equipos para 10 y 13 litros por minuto, por ejemplo, requieren obligatoriamente ser conectados a un ducto de evacuación de humos.

Descripción técnica de los quemadores.

En todos los artefactos se tiene el mismo tipo de quemador atmosférico de premezcla, donde el gas y el aire primario se mezclan previamente en un mezclador antes de llegar a la zona de combustión. El aire secundario se toma directamente de la atmósfera circundante a la llama a la entrada de la cámara de combustión. Los puertos del

quemador son de configuración ranurada, tal como se observa en la **IMAGEN 3 y 4**.

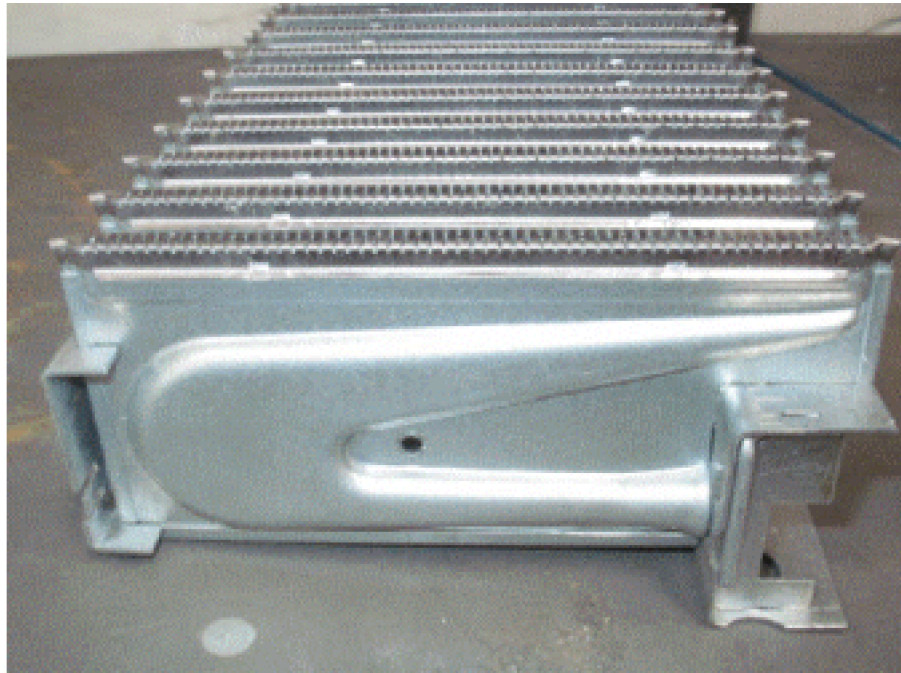


IMAGEN 3. VISTA LATERAL DE LOS QUEMADORES ATMOSFÉRICOS DE LOS CALENTADORES INSTANTÁNEOS DE AGUA



IMAGEN 4. VISTA FRONTAL DE LOS QUEMADORES ATMOSFÉRICOS DE LOS CALENTADORES INSTANTÁNEOS DE AGUA.

La **TABLA 12** contienen los principales parámetros geométricos relacionados con el quemador.

Parámetro Geométrico	Referencia		
	HA5	CPG10	CPG13
Diámetro del inyector	1,0 mm	1,05 mm	1,2 mm
Número de quemadores	7	14	14
Número de puertos por quemador	58		
Ancho del puerto	0,59 mm		
Longitud del puerto	6,5 mm		
Altura del puerto	1 mm		
Área del puerto	2,22 cm ²		
Diámetro de entrada al quemador	15 mm		
Diámetro del cuello	10 mm		

TABLA 12. CARACTERIZACIÓN DE LOS QUEMADORES EVALUADOS.

De la información anterior vale la pena mencionar que el área de puerto, es un parámetro de suma importancia al momento de evaluar el fenómeno de estabilidad de llama, ya que la geometría del puerto influye en la ocurrencia de retroceso o desprendimiento de llama. Para esto debe tenerse en cuenta la relación entre la potencia nominal y el área de los puertos. A esta relación se le conoce como potencia específica

La potencia específica recomendada para el uso de gases combustibles de la segunda familia se encuentra entre 1.3 y 1.6 kW/cm² [22]. A continuación se presenta la potencia específica calculada para los calentadores utilizados durante los ensayos, empleando el gas natural de referencia G20:

POTENCIA	HA5	CPG10	CPG13
Nominal con G20 (kW)	11	27	29
Específica (kW/cm²)	1,2571	1,51286	1,45

TABLA 13. POTENCIAS ESPECÍFICAS DE LOS CALENTADORES EVALUADOS.

De la anterior tabla podemos esperar estabilidad de llama, bajo condiciones normales de trabajo para las referencias CPG10 y CPG13. El HA5 a pesar de encontrarse por fuera de los rangos, se encuentra próximo al límite inferior esperando que su desempeño sea aceptable durante los ensayos.

METODOS DE INTERCAMBIABILIDAD APLICADOS A LOS GASES COLOMBIANOS.

Vale la pena mencionar, como se hizo en el *CAPITULO 2*, que la importancia de los métodos europeos de intercambiabilidad frente a los americanos, radica en la relevancia que se le da a los aspectos de estabilidad de llama, procurando incluir de forma indirecta el diseño del artefacto. La aplicación del concepto de intercambiabilidad debe estar siempre relacionada con un parque de gasodomésticos. Por lo tanto se desarrollan a continuación los métodos de Delbourg y de Dutton, empleando sus gráficas y ecuaciones semiempíricas.

Aplicación del método de Delbourg.

Siguiendo el método planteado por Delbourg, y teniendo en cuenta que el funcionamiento de un artefacto depende de la naturaleza del gas utilizado, se obtuvieron los índices de intercambiabilidad detallados en la **TABLA 14**:

PROPIEDAD		Guajira	Cusiana con 2% CO ₂
CÁLCULO: ÍNDICE DE WOBBE MODIFICADO	Índice de Wobbe, W	11,79	12,77
	K ₁ (según el P.C.S)	1,04	1,25
	K ₂	1,00	1,11
	Wobbe Modificado = $K_1 \times K_2 \times W$	11,40	15,46
CÁLCULO: POTENCIAL DE COMBUSTIÓN	H	1,00	1,11
	C ₃ H ₈	29,33	22,30
	v	0,97	0,90
	Potencial de Combustión, C	39,68	43,30
CÁLCULO: ÍNDICE DE PUNTAS AMARILLAS	Índice de puntas amarillas =	130,87	132,79
CÁLCULO: ÍNDICE DE POLVÉN	Índice de polvén =	131,85	155,72

TABLA 14. ÍNDICES DE INTERCAMBIABILIDAD DE DELBOURG PARA LOS GASES COLOMBIANOS.

Con los valores calculados y del empleo de la **FIGURA 2**, podemos realizar el siguiente análisis de intercambiabilidad respecto al gas de referencia empleado por Delbourg:

Tipo de gas	Factores de Intercambiabilidad evaluados				Intercambiabilidad
	Desprendimiento de llama	Retracción de llama	Combustión incompleta	Puntas amarillas	
Guajira	☒	☒	☒	☒	No
Cusiana con 2% CO ₂	☒	☒	☒	☒	Si

TABLA 15. APLICACIÓN DEL MÉTODO DE INTERCAMBIABILIDAD DE DELBOURG PARA LOS GASES COLOMBIANOS.

Teóricamente se observa que el gas de la Guajira, no es intercambiable respecto al gas de referencia usado en el desarrollo de las gráficas de Delbourg. También se puede concluir que el gas de Cusiana con 2% de CO₂ es intercambiable con el gas de referencia.

Aplicación del método de Dutton.

Ahora, aplicando el método planteado por Dutton el cual relaciona el funcionamiento de un artefacto con la naturaleza del gas utilizado, se obtuvieron los índices de intercambiabilidad detallados en la **TABLA 16**:

De los valores calculados o del empleo de las **FIGURAS 10, 11 y 12**, podemos realizar el siguiente análisis de intercambiabilidad respecto al gas de referencia empleado por Dutton:

Teóricamente se puede concluir que bajo el método de Dutton los gases naturales colombianos no son intercambiables entre ellos, ni con el gas de referencia utilizado para el levantamiento de las gráficas. Todos estos aspectos vale la pena revisarlos por medio

de ensayos experimentales, pues la información levantada por Dutton fue producto de su evaluación sobre un parque de gasodomésticos determinado y actualmente, a raíz de las exigencias normativas, los diseños han mejorado notablemente en aspectos como la estabilidad de llama y la combustión.

Implicaciones teóricas del cambio de las propiedades de los gases en la operación de un gasodoméstico.

Análisis de la potencia térmica.

La potencia térmica es un parámetro de análisis relevante, ya que su variación ligada a una geometría constante para los quemadores del artefacto, puede ocasionar alteraciones significativas en la emisión de gases nocivos como el CO, en las temperaturas máximas alcanzadas por el producto, en los gases de combustión y en el agua caliente utilizada por el usuario.

A continuación se realiza un análisis matemático de la variación de la potencia térmica para los diferentes gases colombianos empleados en los ensayos, buscando realizar una aproximación a la intercambiabilidad desde el punto de vista teórico:

- Partiendo de la expresión matemática que permite obtener la potencia térmica, tenemos [22]:

$$P = \frac{\pi}{4} \times C \times d_i^2 \times \sqrt{\frac{2 \times P_{sum}}{\rho_{gas} \times d_{gas}}} \times \frac{P_{atm} + P_{sum}}{1013.25} \times \frac{288.15}{273.15 + t_g} \times PCS \quad (28)$$

Donde:

P: Potencia térmica de entrada. C: Coeficiente de descarga del inyector. d_i : Diámetro del inyector. P_{sum} : Presión de suministro de gas. P_{atm} : Presión atmosférica del sitio de la descarga de gas. PCS: Poder calorífico superior del gas. d_{gas} : Densidad relativa del gas. ρ_{gas} : Densidad del gas. T_{gas} : Temperatura del gas

- Partiendo de la expresión matemática anterior, la cual permite obtener la potencia térmica de un quemador atmosférico alimentado a baja presión, tenemos que para los ensayos, la geometría del quemador y las condiciones de suministro permanecen constantes para los diferentes gases evaluados. La **ecuación 28** puede ser expresada como se indica a continuación:

$$P = K \times \frac{PCS}{\sqrt{d}} \quad (29)$$

$$K = \frac{P \times \sqrt{d}}{PCS} \quad (30)$$

Donde K es una constante general que involucra todas las constantes individuales tales como, las condiciones de suministro del gas y características geométricas del quemador.

- De lo anterior, podemos decir que para gases diferentes tendríamos lo siguiente:

$$K = \frac{P_1 \times \sqrt{d_1}}{PCS_1} = \frac{P_2 \times \sqrt{d_2}}{PCS_2} = \frac{P_3 \times \sqrt{d_3}}{PCS_3} \quad (31)$$

Ahora bien, recordando que el índice de Wobbe puede ser calculado mediante el siguiente modelo, tenemos:

$$W = \frac{PCS}{\sqrt{d}} \quad (32)$$

$$\frac{P_1}{W_1} = \frac{P_2}{W_2} = \frac{P_3}{W_3} \quad (33)$$

- Ahora, se estima la variación de la potencia para cada uno de los gases colombianos definidos para los ensayos, respecto al gas de referencia G20:

Gas de Guajira:

$$P_1 = \frac{P_0}{W_0} \times W_1 = \frac{13.79}{14.08} \times P_0 = 0.9794 P_0$$

Gas de Cusiana sin tratamiento:

$$P_2 = \frac{14.01}{14.08} \times P_0 = 0.995 P_0$$

Gas de Cusiana con 2% de CO₂:

$$P_2 = \frac{14.765}{14.08} \times P_0 = 1.0486 P_0$$

De lo anterior podemos concluir que la variación teórica de la potencia no supera el 10% para ninguno de los gases. Este aspecto, favorece la aplicación del criterio de intercambiabilidad de Delbourg, e incluso permite cumplir con la desviación máxima de potencia establecida en NTC 3531 que habla del 5%. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que debido a la variación de la composición del gas de Cusiana teórico con el gas real utilizado, el cálculo de la aproximación teórica de la desviación de la potencia frente al gas de referencia G20 debe realizarse respecto a estos, como se presenta a continuación:

Gas de Cusiana preparado N° 1:

$$P_2 = \frac{15.5014}{14.08} \times P_0 = 1.1009 P_0$$

Gas de Cusiana preparado N° 2:

$$P_2 = \frac{15.544}{14.08} \times P_0 = 1.1039 P_0$$

Es decir que para los gases de ensayo, se esperarían desviaciones superiores al 10%, en contra de los criterios de intercambiabilidad establecidos por Delbourg, e incluso frente a la máxima desviación de potencia permitida por la NTC 3531. Si este mismo análisis se realiza entre el gas de Guajira y los gases de Cusiana preparados en laboratorio, encontramos una desviación en la potencia superior al 12% como sigue:

Gas de Cusiana preparado N° 1:

$$P_2 = \frac{15.5014}{13.79} \times P_0 = 1.1241 P_0$$

Gas de Cusiana preparado N° 2:

$$P_2 = \frac{15.544}{13.79} \times P_0 = 1.1269 P_0$$

Análisis de la tasa de aireación.

De igual forma, la tasa de aireación es un factor importante porque ligado a sus variaciones pueden presentarse fenómenos indeseables como el retroceso o desprendimiento de llama, la formación de puntas amarillas y/o formación de hollín por fuera de los rangos permitidos para este tipo de artefactos.

A continuación se realiza el análisis matemático de la variación de la tasa de aireación para los diferentes gases colombianos empleados en los ensayos, buscando realizar una aproximación a la intercambiabilidad desde el punto de vista teórico de la disminución de la cantidad de oxígeno en la premezcla:

- Partiendo de una expresión matemática general que permite obtener la tasa de aireación, tenemos [22]:

$$n = \frac{R}{V_a} \quad (34)$$

Donde:

n: Tasa de aireación primaria R: Qa/Qg, de donde, Qa: Caudal de aire primario y Qg: Caudal de gas combustible. Va: Volumen de aire estequiométrico

- A continuación, reemplazamos R por una expresión que relaciona las diferentes variables geométricas de un quemador atmosférico de premezcla y algunas propiedades del gas [22]:

$$n = \frac{1}{V_a} \times \left[\frac{\rho_g}{\rho_a} \right]^{\frac{1}{2}} \times \left[\frac{d_i}{d_c} \times \left(\frac{2}{(1+K) \times C} \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \right] \quad (35)$$

Donde:

n: Tasa de aireación primaria. C: Coeficiente de descarga del inyector. di: Diámetro del inyector. dc: Diámetro del cuello. ρ_a : Densidad relativa del gas. ρ_g : Densidad del gas. Va: Volumen de aire estequiométrico. K: Coeficiente de pérdidas en el mezclador.

- Ahora, teniendo en cuenta que durante la realización de los ensayos la geometría del quemador y las condiciones de suministro permanecen constantes para los diferentes

gases evaluados, la ecuación 35 puede ser expresada como se indica a continuación:

$$n = K \times \frac{\sqrt{d}}{V_a} \quad (36)$$

- Considerando que el volumen de aire estequiométrico V_a , para los combustibles gaseosos es prácticamente proporcional al poder calorífico, entonces:

$$V_a = K_1 \times PCS = K_1 \times W \times \sqrt{d} \quad (37)$$

- Remplazando respectivamente, tendríamos lo siguiente:

$$n = \frac{K_2}{W} \Rightarrow K_2 = n \times W \quad (38)$$

- De lo anterior, podemos decir que para gases diferentes tendríamos:

$$K_2 = n_0 \times W_0 = n_1 \times W_1 = n_2 \times W_2 \quad (39)$$

- Ahora, estimamos la variación de la tasa de aireación para cada uno de los gases definidos para los ensayos frente al gas de referencia G20:

- Gas de Guajira:

$$n_1 = \frac{n_0 \times W_0}{W_1} = \frac{14.08 \times n_0}{13.79} = 1.021 n_0$$

- Gas de Cusiana con 2% de CO_2 :

$$n_3 = \frac{n_0 \times W_0}{W_3} = \frac{14.08 \times n_0}{14.77} = 0.953 \times n_0$$

Se tiene que frente al gas de referencia G20, la utilización del gas de Guajira traería

un aumento en la tasa de aireación de un poco más del 2%, mientras que para los gases de Cusiana, se puede estimar una disminución de un poco menos del 5%.

Aunque debe tenerse en cuenta que la tasa de aireación no es un parámetro directo de intercambiabilidad, este se relaciona directamente con la combustión higiénica de los equipos y la estabilidad de llama de los mismos. Es decir, debe esperarse que el gas que presenta la mayor disminución de la tasa de aireación, (*Gas de Cusiana con 2% de CO 2*) arroje las concentraciones más altas de CO en los productos de la combustión e incluso que presente una tendencia a la formación de hollín. Mientras que en el caso de un aumento en la tasa de aireación debe esperarse una disminución en las emisiones de CO y un leve alargamiento o desprendimiento de la llama.

De igual forma que en el caso anterior, se realiza el cálculo de la aproximación teórica de la variación de la tasa de aireación frente al gas de referencia G20 con los gases empleados en los ensayos:

- Gas de Cusiana preparado N° 1:

$$n_1 = \frac{n_0 \times W_0}{W_1} = \frac{14.08 \times n_0}{15.5014} = 0.9083 n_0$$

- Gas de Cusiana preparado N° 2:

$$n_2 = \frac{n_0 \times W_0}{W_2} = \frac{14.08 \times n_0}{15.544} = 0.9058 n_0$$

Es decir que para los gases de ensayo, se esperarían disminuciones cercanas al 10%. Si este mismo análisis se realiza entre el gas de Guajira y los gases de Cusiana preparados en laboratorio, esperaríamos una disminución en la tasa de aireación del 11%, tal como se ilustra a continuación:

- Gas de Cusiana preparado N° 1:

$$n_1 = \frac{n_0 \times W_0}{W_1} = \frac{13.79 \times n_0}{15.5014} = 0.8896 n_0$$

- Gas de Cusiana preparado N° 2:

$$n_2 = \frac{n_0 \times W_0}{W_2} = \frac{13.79 \times n_0}{15.544} = 0.8871 n_0$$

Implicaciones teóricas de la variación de los pisos térmicos en la intercambiabilidad de gases.

Los estudios de intercambiabilidad realizados hasta la fecha han considerado solo el cambio en la composición del gas asociado al diseño de un parque de artefactos específico, asumiendo que las condiciones atmosféricas permanecen constantes durante el desarrollo de la evaluación. Lo anterior se justifica porque los grandes centros urbanos de los países que desarrollaron dichas metodologías se encuentran ubicados a nivel del mar.

El caso colombiano es muy diferente si se tiene en cuenta que el mercado más amplio se sitúa en la región Andina, la cual se caracteriza por tener asentamientos de población importantes en altitudes que oscilan entre 1000 y 2600 msnm, además de comercializarse el mismo parque de artefactos con la posibilidad de emplear el mismo gas natural en diferentes ciudades.

A continuación se presenta una primera estimación de cual sería el efecto de aplicar los conceptos de intercambiabilidad de gases entre ciudades localizadas en diferentes pisos térmicos.

Análisis del consumo calorífico nominal.

A continuación se realiza un análisis matemático de la variación de la potencia de entrada de un artefacto que incorpora quemadores atmosféricos de premezcla de baja presión, para los diferentes pisos térmicos y gases naturales existentes en Colombia empleados durante los ensayos, buscando realizar una aproximación a la intercambiabilidad desde el punto de vista teórico:

Partiendo de la expresión matemática establecida en la **ecuación 28**, la cual permite obtener la potencia térmica de un quemador atmosférico alimentado a baja presión y considerando una geometría constante del quemador, tenemos que dicha ecuación puede ser expresada de la siguiente forma si se sigue un procedimiento análogo a los empleados anteriormente:

$$\frac{P_0}{\sqrt{\frac{P_{atm0} + P_{sum}}{t_{gas0}} \times W_0}} = \frac{P_1}{\sqrt{\frac{P_{atm1} + P_{sum}}{t_{gas1}} \times W_1}} \quad (40)$$

Esta expresión permite comparar las potencias obtenidas empleando los diferentes

gases de ensayo bajo condiciones atmosféricas variables.

Con base en el modelo matemático expuesto en la **ecuación 40**, a continuación se presenta una estimación de las variaciones de potencia para regiones situadas a diferentes alturas sobre el nivel del mar y para los distintos gases de ensayo.

Ciudad	Presión atmosférica (m)	Temperatura ambiente (°C)	Disminución de la potencia para el gas de referencia	Efecto del L Wobbe sobre la variación de la potencia respecto al gas de referencia		
				Gas Guajira (13,71 MW/hum)	Cusiana sin tratamiento (14,01 MW/hum)	Cusiana con 2% de CO ₂ (14,77 MW/hum)
Cartagena	1009.5	28	0.97630846	0.95571694	0.970934053	1.02339591
Cali	902	27	0.926658762	0.90594897	0.92073507	0.97388274
Medellín	862	28	0.909325507	0.883984907	0.898037185	0.973816234
Manizales	785.2	22	0.872542353	0.853766704	0.86733998	0.914442622
Bogotá	752	20	0.857079198	0.838390487	0.852212824	0.893442735

TABLA 18. EFECTO COMBINADO DEL ÍNDICE DE WOBBE Y LA PRESIÓN ATMOSFÉRICA SOBRE LA VARIACIÓN DE POTENCIA.

De la **TABLA 18** se observa que la potencia térmica de un gas se disminuye cuando se incrementa la altura sobre el nivel del mar. Esto se debe básicamente, a la existencia de un fenómeno conocido como “derreteo” natural, el cual consiste en la disminución de la potencia térmica de un sistema de combustión atmosférico de premezcla parcial cuando este opera a una mayor altura sobre el nivel del mar, asociado a la disminución de la densidad del gas cuando disminuye la presión atmosférica del sitio [29].

Los resultados de dicho análisis se presenta en la cuarta columna de la **TABLA 18**, validándose una caída en la potencia térmica inferior al 10% para el gas de referencia solo entre 0 y 1550 msnm, como es el caso de las regiones comprendidas entre Cartagena y Medellín. Mientras que para ciudades importantes como Manizales y Bogotá, ubicadas por encima de los 1550 msnm, la caída de potencia supera el 10% para un mismo artefacto.

Es importante detallar los resultados de las columnas 5 y 7, donde el cambio del gas de Guajira por gas de Cusiana, muestra un efecto atenuador en la caída de potencia a medida que se disminuye la presión atmosférica del sitio, sustentado en las diferencias de los índices de Wobbe. Esta posible ventaja, debe evaluarse de forma complementaria con la prueba de combustión, requisito que se hace más exigente a mayores alturas.

Una posible metodología de intercambiabilidad de gases para países que cuentan con regiones ubicadas en una gran diversidad de pisos térmicos, cuyos resultados pretendan ser generalizados a todas las regiones podría ser la siguiente:

1. Evaluar la intercambiabilidad de los gases en la ciudad localizada a la mayor altura sobre el nivel del mar, siendo este el caso más crítico desde el punto de vista de la formación de emisiones de monóxido de carbono.
2. Para el caso de que los gases sean intercambiables en dichas condiciones, realizar una aproximación teórica del aumento de la potencia que se tendría en ciudades ubicadas a una menor altura sobre el nivel del mar, respecto a la potencia medida en el sitio más elevado.

En caso dado de que la potencia térmica incumpla con la desviación máxima permitida por el método de intercambiabilidad, deberá pensarse entonces en la utilización de un gas combustible con un índice de Wobbe menor para mitigar el aumento de potencia. 3.

Nota: Esperando teóricamente que la formación de monóxido de carbono no se aumenta para menores alturas debido al aumento de la disponibilidad de oxígeno.

Lo anterior conlleva a que algunas combinaciones gas – artefacto no puedan ser empleadas en determinadas regiones. Por efecto de la operación de los sistemas de distribución de gas combustible, la comercialización de los artefactos gasodomésticos sería selectiva a ciertas regiones. La utilización de dichos artefactos en las regiones donde se incumple el criterio de intercambiabilidad, estaría supeditada a modificaciones en el diseño, lo cual hace que estos deban ser considerados como productos diferentes. 1.

Si en el paso 2, se obtiene que los gases no son intercambiables debido a una disminución de la potencia por fuera del criterio de intercambiabilidad elegido, se puede generalizar que dichos gases no son intercambiables para todas las demás regiones. Mientras que si la intercambiabilidad no se cumple por exceso de monóxido de carbono, la evaluación deberá realizarse en una ciudad a menor altura. 2.

Análisis de la combustión y disponibilidad del Oxígeno en el aire.

Los estudios teóricos y los diversos resultados experimentales obtenidos del efecto de la altitud sobre sistemas de combustión atmosféricos de premezcla parcial, indican que debido a la menor disponibilidad de oxígeno cuando se incrementa la altura sobre el nivel del mar (*pasar de 0 a 2600 metros sobre el nivel del mar implica una reducción en el contenido másico de oxígeno del 25%*), la formación de monóxido de carbono se eleva notablemente hasta alcanzar límites peligrosos para la salud, debido al deterioro de la higiene de la combustión en el artefacto [22].

Es claro que este fenómeno presenta una leve atenuación debido al “derretero” natural de la entrada de calor nominal que sufren los artefactos que incorporan sistemas de combustión atmosféricos, al incrementarse la altura sobre el nivel del mar como puede detallarse en el análisis previo. Sin embargo se ha demostrado que este “derretero” natural podría no ser suficiente para artefactos con una elevada potencia térmica como es el caso de los calentadores instantáneos de agua. Es por esta razón que se hace necesario un “derretero” inducido adicional, que permita compensar la disminución de oxígeno mediante la reducción de la potencia térmica respecto al valor especificado a nivel del mar y así mantener las emisiones de monóxido de carbono en un valor seguro [29].

De lo anterior, puede afirmarse que el hecho de reducir la potencia térmica de entrada de un artefacto para mantenerlo en una zona segura de operación con bajas emisiones de monóxido de carbono, trae tres consecuencias importantes:

Sería imposible la fabricación de artefactos domésticos que operen dentro de los parámetros de intercambiabilidad para diferentes alturas sobre el nivel del mar, ya que la reducción de potencia debida al “derreteo” natural e inducido hacen que no se pueda garantizar el 10% de desviación máxima permitido en el estudio de intercambiabilidad propuesto por Delbourg [6]. 1.

La reducción de potencia que experimentan los artefactos para grandes alturas sobre el nivel del mar, hacen que estos pierdan competitividad y eficiencia. 2.

El índice de Wobbe es inversamente proporcional a la tasa de aireación, situación que sumada a la disminución del porcentaje de Oxígeno en el ambiente a elevadas alturas harían más crítica la operación de artefactos de elevada potencia térmica. 3.
Como se observó en la TABLA 15 este es el caso del gas natural de Cusiana.

Se observa entonces que existe la necesidad de intervenir el artefacto y/o las condiciones de suministro del gas combustible si se desea conservar la potencia térmica y las bajas emisiones de monóxido de carbono en un sistema de combustión atmosférica como el que se tiene implementado en un calentador instantáneo de agua. Esto hace que las condiciones iniciales propuestas para la realización de un estudio de intercambiabilidad se alteren, ya que una de las premisas de las que parte el análisis, es la de no modificar ninguna de las condiciones de operación, ni el diseño del artefacto durante el desarrollo de las mediciones experimentales.

Aunque esto debe ser considerado solo como una primera aproximación, se ve difícil llegar a generalizar un método de intercambiabilidad que involucre la altura sobre el nivel del mar, a menos que este nuevo método permita algunos cambios mínimos de las condiciones de suministro y/o la geometría del artefacto para las diferentes condiciones atmosféricas, lo cual no permitiría hablar de un método de intercambiabilidad propiamente dicho, sino de un método de ajuste que garantice la intercambiabilidad.

Una alternativa adicional que pudiera ser tomada en cuenta para la obtención de un método generalizado de análisis de intercambiabilidad para diferentes condiciones atmosféricas, es revisar la intercambiabilidad de un gas de mayor poder calorífico como el de Cusiana a una mayor altura sobre el nivel del mar respecto a otro de menor poder calorífico como el de Guajira, a una menor altura sobre el nivel del mar, buscando compensar la potencia térmica de entrada que se perdería con el “derreteo” natural.

Sin embargo, seguramente se estaría por fuera de la zona de intercambiabilidad debido al aumento de las emisiones de monóxido de carbono que esta solución conlleva. Es decir, si se conserva la potencia se elevan las emisiones de monóxido de carbono, y si por el contrario se disminuyen las emisiones de monóxido de carbono, esto se alcanzaría a expensas de disminución de la potencia térmica de entrada y esto haría que los gases tampoco fueran intercambiables.

DISEÑO DE EXPERIMENTOS [20], [21].

Formulación del problema.

Verificar la intercambiabilidad de los gases naturales de Guajira y Cusiana, observando su comportamiento en los artefactos de calentamiento instantáneo de agua. Esta verificación estará sujeta a los resultados experimentales obtenidos en la ciudad de Medellín, la cual se encuentra ubicada a 1550 msnm con una presión atmosférica de 852 mb.

Factores y niveles empleados.

Como variables independientes tenemos dos: el tipo de gas empleado y la referencia comercial de los artefactos de calentamiento instantáneo de agua. La **TABLA 19**, muestra los niveles que se usarán en cada variable y las repeticiones o réplicas de cada ensayo:

FACTORES Y NIVELES DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS		FACTOR A: Tipo de gas		
		G20	Guajira	Cusiana preparado
FACTOR B: Referencia de calentador [lpm]	6	2 repeticiones	2 repeticiones	2 repeticiones
	10	2 repeticiones	2 repeticiones	2 repeticiones
	15	2 repeticiones	2 repeticiones	2 repeticiones

TABLA 19. FACTORES Y NIVELES EXPERIMENTALES

Es importante tener en cuenta que este es el número mínimo de repeticiones que garantizan una confiabilidad estadística aceptable de los resultados, y que para efectos prácticos el número de replicas fue mayor para el caso de la medición de emisiones de monóxido de carbono, donde el número de replicas fue igual a 10.

Selección de las variables de respuesta.

Las variables dependientes o de respuesta, son aquellas que además de proporcionar información real acerca del problema, nos permite apreciar los efectos al perturbar el sistema objeto de estudio. Su metodología de evaluación se describe en el numeral 6.2.

Entre las variables a analizar tenemos las siguientes:

Variables de respuesta cuantitativas.

- *Consumo calorífico nominal.* Esta variable se obtiene de forma indirecta, por medio de la medición del volumen de gas en el sitio (corregido a condiciones estándar) y su producto con el poder calorífico estándar del gas. Esta variable se medirá empleando un medidor de sello seco, con una precisión de hasta 1.0 dm^3 .
- *Emisión de monóxido de Carbono.* Esta variable se obtiene de forma directa, por medio del análisis de los productos de la combustión. En este caso, se empleará un analizador de gases con una precisión del 4% sobre el valor reportado por el equipo. Para efectos de cálculo trabajaremos con una precisión de 20 ppm, válido hasta una lectura de 500 ppm.
- *Temperatura del agua (entrada y salida del calentador), temperatura de la carcasa y temperatura de los productos de la combustión (humos).* Se obtienen por medición empleando termocuplas de contacto y de inmersión, según sea el caso.

Variables de respuesta cualitativas.

- Estabilidad de llama (Retroceso y desprendimiento de llama).
- Encendido.
- Puntas amarillas y formación de hollín.

Selección del modelo.

Se eligió un diseño factorial 3^K , ya que este puede ser utilizado en experimentos en los que intervienen varios factores que actúan a tres niveles y es necesario estudiar el efecto conjunto de estos sobre las variables respuesta. El diseño más simple de la serie es 3^2 , el cual es nuestro caso. Este consta de dos factores con tres niveles cada uno, lo cual genera 9 combinaciones de tratamientos con 8 grados de libertad entre ellos.

Para la determinación del número de replicas de cada ensayo, tenemos la siguiente expresión:

$$\Phi^2 = \frac{n \times b \times D_a^2}{2 \times a \times \sigma^2} \quad (41)$$

Donde:

Φ : Abscisa de la curva de operación característica [21]. n: Número de repeticiones por ensayo. b: Niveles del factor B: referencias de artefactos = 3. D_a : Error de experimentación de la variable de referencia a: Niveles del factor A: tipos de gas = 3. σ^2 : Varianza estimada de la variable de referencia.

El análisis del número de replicas tomará como base la variable respuesta de mayor relevancia sobre los resultados. Para nuestro caso particular, consideramos que la variable Monóxido de Carbono es la más importante (Factor A), pues está relacionada directamente con la salud del usuario. Tenemos entonces que:

- $D_a = 20$ ppm, teniendo en cuenta que esta es la desviación experimental del equipo analizador de gases.
- $\sigma = 10$ ppm. Este valor se obtuvo de acuerdo a mediciones de Monóxido de Carbono realizadas en el laboratorio de gasodomésticos de Industrias Haceb.

Reemplazando los valores en la ecuación (41) tenemos la siguiente tabla:

n	Φ^2	Φ	β	v_2	Potencia de la prueba
2	4	2	0.28	8	$1 - \beta = 72\%$
3	6	2.45	0.10	8	$1 - \beta = 90\%$

TABLA 20. DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE REPLICAS.

Donde:

α : Probabilidad de aceptar la hipótesis siendo falsa. α : Nivel de significancia = 0.05.
 ϕ_1 : Grados de libertad de los factores principales = $3 - 1 = 2$. ϕ_2 : Fuentes de variabilidad. Este punto involucra todos aquellos factores que pueden o no ser

detectados y que afectan las variables respuesta = 8.

Como se requiere un grado de aleatorización de los ensayos para que los análisis estadísticos tengan mayor confiabilidad, evitando los sesgos causados por ciertas fuentes extrañas de variaciones no controlables y las tendencias conscientes o inconscientes del experimentador o del proceso experimental, se presenta a continuación la secuencia de los ensayos aleatorizados obtenidos con una función de número aleatorio.

Nº Ensayo	Referencia Calentador (lpm)	Tipo de gas
Eliminar 1	0	Referencia (G2)
Eliminar 2	1	Referencia (G2)
Eliminar 3	2	Referencia (G2)
Eliminar 4	3	Referencia (G2)
Eliminar 5	4	Referencia (G2)
Eliminar 6	5	Referencia (G2)
1	6	Gasland 1P3
2	7	Gasland
3	8	Gasland
4	9	Gasland
5	10	Gasland 1P1
6	11	Gasland 1P1
7	12	Gasland
8	13	Gasland
9	14	Gasland 1P1
10	15	Gasland
11	16	Gasland 1P1
12	17	Gasland 1P3
13	18	Gasland 1P1
14	19	Gasland 1P1
15	20	Gasland 1P1
16	21	Gasland 1P1
17	22	Gasland 1P1
18	23	Gasland 1P1

TABLA 21. SECUENCIA DE ENSAYOS ALEATORIZADOS.

Los ensayos preliminares no hacen parte de la aleatorización de los ensayos, ya que respecto a este gas se realizarán todos los análisis de intercambiabilidad.

Protocolo de ensayos.

Condiciones y especificaciones generales.

- Todas las mediciones descritas en el procedimiento, deben realizarse cuando el artefacto haya alcanzado el equilibrio térmico.
- Las condiciones de suministro de agua deben ser tales que la válvula de paso de gas se encuentre en posición completamente abierta y con el agua circulando a la tasa de flujo nominal especificada por el fabricante.
- El gas utilizado en cada uno de los ensayos, deberá estar conforme a lo especificado en la tabla “secuencia de ensayos aleatorizados”.
- La presión de suministro de gas debe permanecer constante en todos los ensayos, en el valor nominal establecido en la tabla 4 de la NTC 3527 [23].
- Durante el desarrollo de las pruebas debe garantizarse que el aire circundante se encuentra en reposo.
- Se aplicarán los criterios de intercambiabilidad de Delbourg por ser consistentes con las variables cuantitativas y cualitativas que se obtendrán como respuesta de los ensayos.

Resultados esperados (parámetros de aprobación o rechazo).

Obtención del consumo calorífico nominal.

El consumo calorífico nominal no debe desviarse en más de un 5% del valor obtenido a la presión nominal (18 mb) y con el gas de referencia aplicable, según la categoría del artefacto tal como lo establece la tabla 4 de la NTC 3531 [14]. Sin embargo, el método de intercambiabilidad de Delbourg establece que la potencia no debe desviarse en más de un 10% respecto al gas de referencia [6]. La intercambiabilidad de gases se realizará respecto a los criterios propuestos por Delbourg, teniendo en cuenta que cuando este por fuera del rango establecido, se considera que los gases no son intercambiables. De igual forma se evaluará el requisito frente a la norma para verificar su cumplimiento.

Combustión.

Los productos secos de combustión corregidos por dilución del aire, obtenidos a la presión nominal y con cada uno de los gases de ensayo, no deben exceder de 0.10% en volumen (1000 partes por millón) según lo establecido en la NTC 3531 [14]. El método de intercambiabilidad de Delbourg establece que para relaciones de CO/CO₂ mayores de 0.02, se considera que los gases no son intercambiables [6]. El análisis de intercambiabilidad se realizará respecto al método de Delbourg y la norma servirá como un marco de referencia.

Estabilidad de llama.

La condición de estabilidad de llama, evaluada con cada uno de los gases de ensayo alimentado a la presión nominal solo será aceptada cuando:

- Ninguna de las llamas se encuentre desprendida de los puertos del quemador; solo será permisible un ligero disturbio en las llamas al momento del encendido del quemador [14].
- El piloto no se apague durante el encendido del quemador principal [14].
- La llama del piloto no se reduzca al extremo que no pueda funcionar correctamente para el encendido del quemador o activación del elemento detector de llama [14].

Los resultados obtenidos se verificaran de acuerdo a las aproximaciones teóricas establecidas en la **TABLA 15** [6].

Encendido del quemador.

La norma NTC 3531 establece que durante la ignición y el encendido del quemador, se permitirá una tendencia al desprendimiento de la llama, pero esta debe estabilizarse inmediatamente [14]. Sin embargo, para el análisis de intercambiabilidad, el correcto encendido del quemador evaluado con cada uno de los gases de ensayo alimentado a la presión nominal, solo será aceptado si se verifica que se alcanza con facilidad dentro de los primeros 20 segundos después de permitido el paso de gas a los quemadores.

Temperatura del agua y del artefacto.

Las temperaturas obtenidas con cada uno de los gases de ensayo alimentados a la presión nominal, no deben desviarse más de un 10% del valor obtenido a la presión nominal y con el gas de referencia aplicable según la categoría del artefacto. Debe evaluarse la temperatura del agua caliente a la salida del calentador y la carcasa externa del artefacto. A pesar de que este parámetro no figura como variable dentro del análisis de intercambiabilidad, se consideró prudente su medición para evaluar aspectos de uso, tales como la operación del calentador y condiciones de suministro de agua.

Puntas amarillas y formación de hollín.

Como el método de Delbourg solo tiene en cuenta las propiedades del combustible gaseoso para la determinación del índice de puntas amarillas y hollín, se propone que esto se evalúe con el artefacto en operación, de tal forma que ambos aspectos para cada uno de los gases de ensayo alimentados a la presión nominal, se verificará con la inspección visual de las llamas del quemador y la formación de hollín en cualquier sección longitudinal del ducto de evacuación de humos [6].

Procedimiento de ensayo.

Se inicia con la necesidad de verificar el cumplimiento de los requisitos establecidos en el numeral 2, correspondiente a los resultados esperados para verificar el cumplimiento de intercambiabilidad de gases en calentadores de paso.

-
- Seleccionar la referencia de calentador instantáneo y el tipo de gas natural aplicable en el ensayo específico, según lo establecido en la **TABLA 21**, secuencia de ensayos aleatorizados.
 - Instalar el calentador instantáneo, garantizando el suministro de gas y agua, y la adecuada ubicación del ducto de evaluación de emisiones contaminantes.
 - Ajustar la presión de suministro del gas en su valor nominal de 20 mb por medio del regulador de presión y la indicación del manómetro de columna.
 - Ajustar la presión de suministro de agua en un valor de 60 psi por medio del regulador de presión de agua y la lectura del manómetro con indicador inmerso en glicerina.
 - Abrir la llave de agua y verificar que el caudal es el nominal indicado en litros por minuto (lpm) por el fabricante.
 - Abrir la llave de gas en la posición de flujo máximo y verificar que el quemador enciende correctamente.
 - Poner en marcha el cronometro.
 - Dejar funcionando bajo estas condiciones durante cinco minutos, hasta que se haya alcanzado el equilibrio térmico del artefacto.
 - Detener el cronómetro.
 - Leer en el medidor el volumen de gas inicial y su temperatura.
 - Dejar funcionando bajo estas condiciones durante cinco minutos, teniendo en cuenta que desde el momento donde comienza la medición, cada 2 minutos se deben anotar los datos especificados en la tabla de ensayos.
 - Transcurridos los cinco minutos, leer el volumen de gas en el medidor y su temperatura.
 - Cinco minutos mas tarde, durante los cuales se debe continuar con las medidas especificadas en la tabla de ensayos, cerrar el flujo de agua y de gas al calentador instantáneo.
 - Verificar la formación de hollín en el ducto de evacuación por medio del frote suave de un paño blanco.
 - Verificar que los resultados obtenidos se ajusten a lo establecido en los resultados esperados del numeral 2, teniendo en cuenta los procedimientos de cálculo y corrección establecidos para la obtención de la entrada de calor nominal y las emisiones de monóxido de carbono.
 - Regresar al paso inicial, hasta que se terminen los parámetros establecidos en la Tabla secuencia de ensayos aleatorizados.

Procedimientos de cálculo [14].

Consumo calorífico nominal.

La entrada de calor nominal de gas, se calcula a partir de la medición de la tasa en sitio, las características del gas, y para las condiciones estándar de referencia (gas seco a 288.15 °K y 1013 mb). Esta puede ser expresada por masa o por volumen, de donde para efectos de cálculo utilizaremos el cálculo por volumen.

$$Q_n = 0,263 \times V_N \times P_P \quad (42)$$

Donde:

Q_n : Entrada de calor nominal V_N : Tasa volumétrica nominal expresada en condiciones estándar [m^3/h]. P_P : Poder calorífico superior del gas empleado [MJ/m^3].

La tasa de volumen, corresponde a una medida del flujo de gas a las condiciones estándar. En la práctica, los valores que se obtiene en las condiciones de ensayo no corresponden a los de las condiciones de referencia, por lo cual se deben de corregir para llevarlas a los valores que se hubieran obtenido a las condiciones estándar. La tasa volumétrica de gas se calcula por medio de la siguiente ecuación, según la NTC 3531:

$$\frac{V_N}{V} = \sqrt{\frac{1013,25+P}{1013,25} \times \frac{P_a+P}{1013,25} \times \frac{273,15}{288,15+T_g} \times \frac{d}{d_r}} \quad (43)$$

Donde:

V_N : Tasa volumétrica de flujo de gas en condiciones estándar [m^3/h]. V : Tasa volumétrica de gas obtenida bajo condiciones de ensayo [m^3/h]. P_a : Presión atmosférica [mbar]. P : Presión de suministro del gas [mbar]. T_g : Temperatura del gas en las condiciones de ensayo [°C]. d_r : Densidad relativa del gas de ensayo con respecto al aire. d : Densidad relativa del gas de referencia

También se calculará la entrada de calor nominal empleando la ecuación de gases ideales, como se muestra a continuación y empleando la misma nomenclatura de la **ecuación 43**:

$$Q_N = \frac{P_a + P}{1013} \times \frac{288}{T_g + 273} \times V \times P_P \quad (44)$$

Esta ecuación nos permitirá verificar la validez de las predicciones teóricas realizadas en función del índice de Wobbe para la obtención de la potencia térmica, tal como se explicó en el numeral 5.3.1.

Combustión.

El contenido de monóxido de carbono (CO) relativo a los productos de la combustión secos y libres de aire (combustión neutra, se obtiene por medio de la siguiente ecuación:

$$\%(\text{CO})_N = \%(\text{CO})_M \times \frac{\%(\text{CO}_2)_N}{\%(\text{CO}_2)_M} \quad (45)$$

Donde:

$\%(\text{CO})_N$: Porcentaje volumétrico de CO referido a los productos secos de la combustión.

$\%(\text{CO}_2)_N$: Porcentaje volumétrico de CO_2 calculado para los productos de secos libres de aire de la combustión.

$\%(\text{CO})_M$ y $\%(\text{CO}_2)_M$: Porcentajes volumétricos de CO y CO_2 en la muestra seca durante el ensayo de combustión.

Descripción de equipos de medición.

Características técnicas.

Característica	Termocupla	Termómetro	Análizador de gases	Medidor de volumen de gas	Medidor de volumen de agua
Fabricante	OMEGA	FLUKE	LAND COMBUSTION SYSTEM II	Krohne Messtechnik	ELVAN
Tipo de instrumento	Sensor	Digital	Digital	Análogo	Análogo
Rango	-200 °C a 1300 °C	-200 a 1300 °C	CO bajo: 0 – 1000 ppm CO alto: 0 – 40000 ppm	0.015 a 3.1 m³	1000 ml – 100000 ml
División de escala	0.1 °C	0.1 °C	1 ppm	0.1 l	200 ml
Tolerancia de medición	± 1 °C	± 1 °C	2% ppm	0.5 l	200 ml
Incertidumbre de medición	± 0.2 °C	± 0.2 °C	± 1% ppm	0.1 l	± 200 ml

TABLA 22. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS EQUIPOS DE MEDICIÓN.

Observaciones sobre los equipos de medición.

Analizador de gases.

El analizador de gases marca LAND COMBUSTION, es un equipo portátil que mide de 3 a 9 gases, temperatura ambiente y temperatura de productos de combustión. Cuenta con una trampa de líquidos para evitar que condensaciones del gas caliente lleguen a los sensores y a la bomba. Adicionalmente tiene una batería de Plomo ácido que mantiene la operación del instrumento por un día completo cuando esta se encuentre cargada al 100%.

El procedimiento de operación del equipo se consigue gracias a un menú en un display de cristal líquido y un teclado que se encuentra en la parte frontal del equipo. Este display muestra simultáneamente todas las medidas, dando una completa visión de la combustión.

A continuación se describen algunas especificaciones técnicas adicionales:

- Tipos de combustible. Madera, fuel oil liviano, fuel oil pesado, gas natural, propano, butano, carbón y otros dos definidos previamente por el usuario.
- Precisión:
- Oxígeno: 1.0 %Vol.
- Otros gases: 4% de la lectura.
- Tipo de sensores:
- O₂, C_XH_Y, CO (bajo), CO (alto), NO_X: Celdas electroquímicas.
- CO₂: óptica infrarroja.
- Temperatura de productos de la combustión: termocupla tipo K.
- Temperatura ambiente: sensor de estado sólido.
- Temperatura de trabajo: entre -5 °C y 50 °C.
- Potencia de alimentación: entre 95 V y 256 V AC. 50 – 60 Hz.

Medidor volumétrico de diafragma.

Los medidores de paredes deformables, poseen un diafragma que divide en dos una cámara estanca. Por acción del gas combustible, la membrana se desplaza de uno a otro lado de esta cámara en un movimiento alternativo, provocado por la presión del gas. Dicho movimiento es comunicado a una corredera que une alternativamente cada lado de la cámara con la entrada y la salida del gas del medidor volumétrico.

El volumen cíclico de este contador es igual a 0.7 l/rev, lo que representa el volumen de la cámara estanca. Este tipo de medidores tienen una pérdida de carga muy pequeña (entre 5 y 30 mm de columna de agua). Permiten contabilizar caudales de un amplio rango ya que su precisión (error máximo legal admisible $\pm 2\%$) se mantiene entre el 1% y el 100% del caudal máximo.

A continuación se describen algunas especificaciones técnicas adicionales:

- Presión normal de operación: 1000 – 2800 Pa
- Máxima presión de operación: 10 KPa
- Temperatura de operación: 0 – 50°C
- Tipos de gas: Natural y G.L.P.

Descripción del montaje.

Para la realización de las pruebas, fue necesario el empleo de gases naturales especiales como el de Cusiana con diferente porcentaje de inertes, almacenados en cilindros a presiones elevadas cercanas a los 2500 psi. Adicionalmente, se utilizó el gas natural de Guajira tomado directamente de la red de distribución de Empresas Públicas de Medellín.

La regulación de la presión del gas almacenado a altas presiones se realizó por medio de un regulador de primera etapa y otro de segunda etapa ubicados en serie, garantizando el valor de la presión de alimentación de gas directamente a la entrada del calentador por medio de la indicación de un tubo en U cuyo fluido manométrico es el agua. Mientras que en el caso del gas proveniente de la red se utilizó solamente un regulador de segunda etapa y la indicación del manómetro en U.

La medición del consumo de gas se realizó por medio de un medidor de volumen rotativo de diafragma localizado antes del manómetro en U, considerando que la caída de presión en dicho dispositivo no afectara la presión de suministro. La temperatura del agua se midió exactamente a la entrada y salida del calentador, para evitar pérdidas de temperatura a través del recorrido de la tubería de conducción de agua. La medición de la composición y la temperatura de los productos de la combustión se realizaron por medio de un analizador de gases, el cual tomaba la muestra 50 centímetros arriba de la salida de la cámara de combustión del calentador.

El empleo de gases con diferentes condiciones de almacenamiento, hizo que el montaje general requerido para las mediciones variara exclusivamente en la forma de regulación del gas. En las **imágenes 5 y 6**, se presenta dichas situaciones, donde la fuente de suministro y el método de regulación sobresalen como las diferencias fundamentales.



IMAGEN 5. MONTAJE DE ENSAYOS CON GAS DE GUAJIRA.

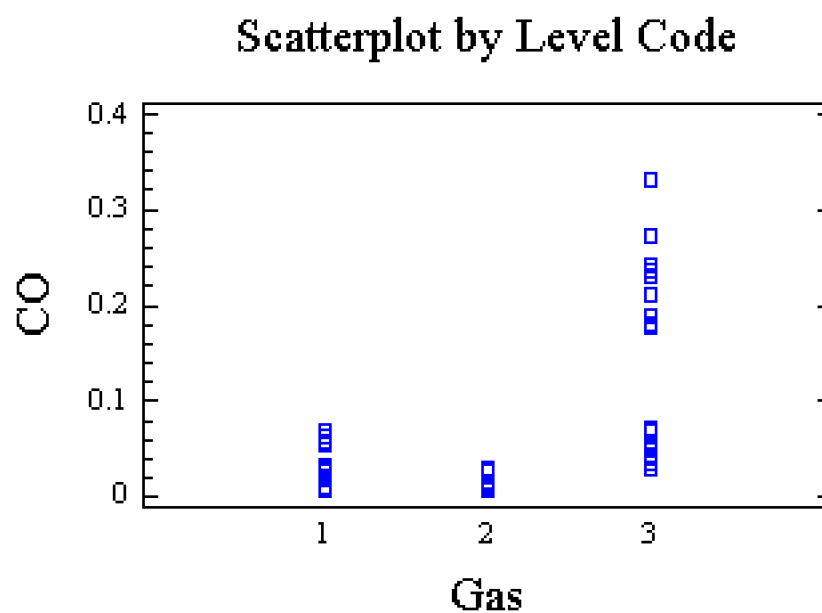


IMAGEN 6. MONTAJE DE ENSAYOS CON GASES ESPECIALES.

DATOS EXPERIMENTALES.

Durante la fase experimental se obtuvieron diferentes datos de salida para la realización del análisis de intercambiabilidad, en función de la combinación de los parámetros de entrada predefinidos. Estos resultados experimentales se presentan a continuación:

Resultados experimentales de las variables cuantitativas.

REFERENCIA CALENTADOR	TIPO DE GAS		
	GPM	GLORIA	CIUSANA PREPARADO
HA5	0.004	0.004	0.004
	0.006	0.006	0.006
	0.008	0.008	0.008
	0.009	0.009	0.009
	0.010	0.010	0.010
	0.011	0.011	0.011
	0.012	0.012	0.012
	0.013	0.013	0.013
	0.014	0.014	0.014
Promedio	0.0088	0.0124	0.0552
CPG10	0.008	0.008	0.008
	0.009	0.009	0.009
	0.010	0.010	0.010
	0.011	0.011	0.011
	0.012	0.012	0.012
	0.013	0.013	0.013
	0.014	0.014	0.014
	0.015	0.015	0.015
	0.016	0.016	0.016
Promedio	0.0198	0.0097	0.0326
CPG13	0.004	0.004	0.004
	0.006	0.006	0.006
	0.008	0.008	0.008
	0.009	0.009	0.009
	0.010	0.010	0.010
	0.011	0.011	0.011
	0.012	0.012	0.012
	0.013	0.013	0.013
	0.014	0.014	0.014
Promedio	0.0502	0.0277	0.2250

TABLA 23. MEDICIONES DE MONÓXIDO DE CARBONO CORREGIDO [%Vol]

REFERENCIA CALENTADOR	TIPO DE GAS					
	G80		QUAJIRA		CUSIANA PREPARADO	
	ΔT_{agua}	Temperatura	ΔT_{agua}	Temperatura	ΔT_{agua}	Temperatura
HA5	17.2	38.7	24.3	40.3	38.7	43.7
	17.3	38.1	24.6	40.3	37.1	44.1
	17.0	38.7	24.7	41.7	37.3	44.3
	17.3	38.1	20.3	38.1	37.3	41.3
	17.1	38.3	26.4	40.7	37.7	44.4
	16.1	38.1	22.4	38.1	38.1	44.1
	16.7	37.1	22.7	39.1	37.1	43.3
	16.4	38.1	21.9	34.1	37.1	44.3
	16.0	38.1	22.6	34.1	37.1	44.3
	14.6	38.1	22.4	34.1	37.1	43.1
	16.4	68.3	23.6	63.1	27.4	64.7
	30.1	77.3	30.4	75.7	71.7	53.7
CPG10	30.6	37.3	30.0	36.3	31.3	31.3
	30.4	38.1	31.2	36.3	31.7	33.3
	30.2	37.3	31.2	36.1	31.3	33.3
	30.6	38.1	31.1	32.3	31.7	37.3
	30.1	41.1	31.6	34.1	31.3	33.3
	30.5	37.7	31.1	34.7	32.7	37.3
	30.7	38.1	31.2	34.1	33.3	37.1
	30.6	37.3	31.1	34.3	32.3	33.7
	30.6	41.1	31.2	34.1	33.7	37.1
	30.4	68.4	31.1	64.7	31.3	68.1
CPG13	20.0	57.7	24.1	54.7	24.7	53.7
	20.4	58.7	24.1	54.7	24.3	53.7
	20.7	58.3	24.2	57.3	24.3	53.3
	20.6	51.7	24.2	50.7	24.3	57.3
	23.7	56.1	24.2	58.1	24.3	53.3
	20.7	57.7	24.1	55.7	24.7	53.7
	28.7	37.1	24.3	34.7	30.1	33.3
	20.9	57.7	24.0	50.3	25.3	57.7
	24.0	38.1	24.2	38.1	30.4	33.1
	20.9	58.3	24.7	50.3	25.7	53.3
	20.7	58.2	24.1	56.0	25.0	59.7

TABLA 24. MEDICIÓN DE TEMPERATURAS [°C]

Nota: En las tablas 23 y 24, se promediaron los valores medidos para los gases de Cusiana preparados debido a su pequeña variación.

Calentador	G20		Guajira		Cusiana N° 1		Cusiana N° 2	
	NIT	Gas Ideal	NIT	Gas Ideal	NIT	Gas Ideal	NIT	Gas Ideal
HA5	11,11	9,96	11,02	10,37	14,36	11,55	14,20	11,17
	10,97	9,06	11,74	9,04	14,74	11,74	14,77	11,20
	10,93	10,03	11,28	9,85	14,26	11,27	14,25	11,18
	11,03	9,87	11,73	11,20	14,57	11,28	14,59	11,50
Promedio	11,00	9,94	11,25	10,06	14,57	11,47	14,48	11,38
CPG10	26,95	24,51	26,26	24,37	34,21	27,23	34,16	26,26
	27,22	24,30	26,68	25,56	34,23	27,21	34,14	26,55
	27,12	24,27	26,69	24,15	34,21	26,26	34,16	26,78
	26,92	24,45	26,28	24,38	34,22	26,27	34,10	26,20
Promedio	27,05	24,39	26,80	24,90	34,42	27,04	34,17	26,82
CPG13	29,05	26,52	28,23	25,33	37,22	26,20	37,13	26,43
	29,42	26,27	28,28	25,33	37,23	26,21	37,42	26,23
	28,00	26,12	28,28	25,31	37,44	26,46	37,22	26,48
	29,41	26,51	28,23	25,30	37,43	26,46	37,45	26,21
Promedio	29,20	26,36	28,26	25,71	37,48	26,48	37,58	26,64

TABLA 25. MEDICIONES DEL CONSUMO CALORÍFICO NOMINAL [kW].

Resultados experimentales de las variables cualitativas.

- *Estabilidad de llama (Retroceso y desprendimiento de llama):* No se evidenció ningún fenómeno indeseable en la estructura de llama ni en frío ni el caliente, ninguna de las llamas se desprendió del puerto del quemador correspondiente. Sin embargo, pudo observarse un leve alargamiento y cambio de color de la llama en todos los calentadores cuando se empleó el gas de Cusiana. Este efecto se debe a que el gas de Cusiana tiene un mayor volumen estequiométrico de aire que el gas de la Guajira ($V_a \text{ Cusiana} = 11.04$ y $V_a \text{ Guajira} = 9.44$), además con el gas de Cusiana la tasa de aireación se disminuye. El efecto combinado de estos dos factores produce un alargamiento de la altura del cono externo [34].
- *Encendido:* Para todas las condiciones de operación, el encendido del quemador se alcanzó instantáneamente con estabilidad total de la llama.
- *Puntas amarillas y formación de hollín:* No se observó la formación de puntas amarillas ni deposición de hollín en el calentador o ducto de evacuación bajo ninguna de las condiciones de operación.

ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Para el análisis de resultados de las mediciones realizadas, se empleó el análisis estadístico como una herramienta básica para validar los datos obtenidos y verificar los supuestos teóricos planteados respecto al fenómeno de estudio. Para esto se utilizó el software *STATGRAPHICS versión 5.0*, considerando dentro de este análisis estadístico las variable respuesta cuantitativas involucradas dentro de la metodología de intercambiabilidad: emisiones de Monóxido de Carbono y potencia térmica (entrada de calor nominal). Las variables cualitativas se evaluaron según los parámetros definidos.

Se utilizó la siguiente asignación numérica para ilustrar el análisis con los gases de ensayo:

- Gas de referencia G20: **1**
- Gas natural de la Guajira: **2**
- Gas natural de Cusiana preparado N°1 y N°2: **3**

De igual forma para los calentadores de paso:

- Calentador de 5 lpm (HA5): **1**
- Calentador de 10 lpm (CPG10): **2**
- Calentador de 13 lpm (CPG13): **3**

Emisiones de Monóxido de Carbono y análisis bajo el criterio de Delbourg.

El método de intercambiabilidad de Delbourg plantea como condición crítica en el análisis de higiene de la combustión, que dos gases son intercambiables siempre y cuando la relación CO/CO₂ medida en los humos secos, sea inferior a 0.02. La **TABLA 26** ilustra esta relación.

REFERENCIA CALENTADOR	RELACIÓN CO/CO ₂ MEDIDO					
	GUZU		GUAJIRA		CUSIANA/REPARADO	
HA5	0.000760	0.000396	0.001170	0.001002	0.005045	0.005544
	0.000808	0.000713	0.001173	0.001021	0.004551	0.00443E
	0.000790	0.000774	0.001086	0.001014	0.004265	0.00413E
	0.000759	0.000740	0.001065	0.001004	0.003996	0.00418E
	0.000742	0.000705	0.000965	0.0009EC	0.003943	0.00353E
Promedio	0.000750		0.001052		0.004394	
CPG-10	0.001894	0.002164	0.000743	0.00100E	0.003248	0.00324E
	0.001873	0.001366	0.000710	0.00090E	0.003033	0.002734
	0.001457	0.001353	0.000702	0.0009E2	0.002317	0.00243E
	0.001532	0.001724	0.000674	0.0009E7	0.002333	0.00222E
	0.001714	0.001587	0.000661	0.00093E	0.002227	0.00214E
Promedio	0.001697		0.000818		0.002594	
CPG-13	0.005899	0.004334	0.002116	0.00241E	0.026494	0.0133E4
	0.004644	0.004779	0.002155	0.00251E	0.021787	0.01503E
	0.002647	0.005344	0.002125	0.0025E0	0.019220	0.01415E
	0.002656	0.004301	0.002183	0.0025E1	0.018765	0.0143E1
	0.002815	0.001577	0.002368	0.00241E	0.018364	0.01413E
Promedio	0.004290		0.002340		0.017917	

TABLA 26. RELACIÓN CO/CO₂ MEDIDA EN LOS PRODUCTOS DE LA COMBUSTIÓN.

De la tabla anterior se puede concluir que:

- La relación CO/CO₂ fue siempre mayor para las mediciones realizadas con el gas natural de Cusiana, superando en ciertos casos el límite máximo permitido por el criterio de intercambiabilidad de Delbourg relacionado con la emisión de monóxido de carbono. Las mediciones señaladas en color rojo, indican una condición puntual de *no intercambiabilidad* del gas natural de Cusiana con el gas natural de la Guajira y el de referencia.
- A la luz del criterio de Delbourg, se tiene que todos los gases analizados son intercambiables si evaluamos el promedio de las mediciones de combustión realizadas.

Emisiones de Monóxido de Carbono y análisis bajo la norma técnica colombiana NTC 3531.

A diferencia del criterio de Delbourg, el cual presenta una relación CO/CO_2 para definir la intercambiabilidad de un grupo de gases determinado, la NTC 3531 presenta un criterio de seguridad que relaciona la cantidad máxima permisible de monóxido de carbono en los humos secos, medidos en los productos de la combustión de los calentadores de paso. Para esto se establece que dicho valor corregido, debe ser inferior a 0.1% en volumen o 1000 ppm cuando se utiliza el gas de referencia [14].

La **FIGURA 16** y **17** muestran la distribución de las mediciones del monóxido de carbono según el tipo de gas y la referencia del calentador empleado.



FIGURA 16. EMISIONES DE MONÓXIDO DE CARBONO SEGÚN EL GAS EMPLEADO EN EL ENSAYO

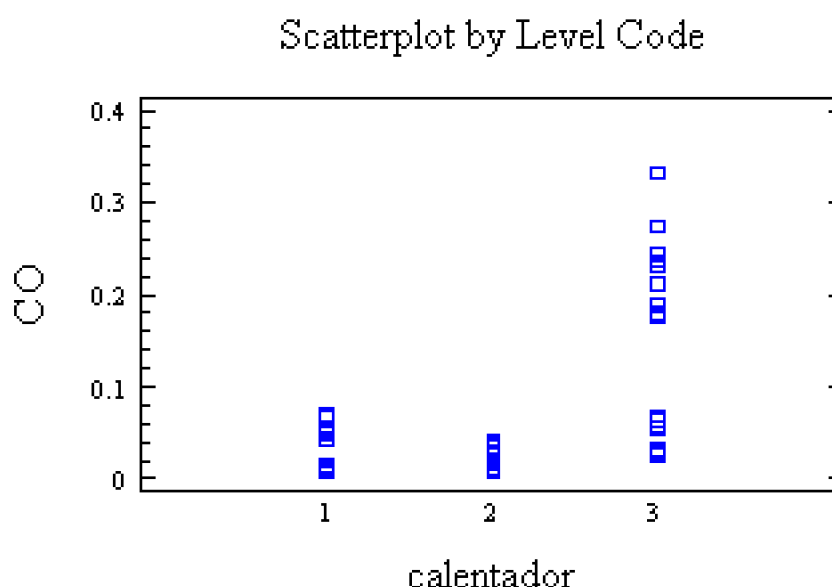


FIGURA 17. EMISIONES DE MONÓXIDO DE CARBONO SEGÚN LA REFERENCIA DEL CALENTADOR EMPLEADO EN EL ENSAYO.

De ambas figuras se puede concluir que:

- El calentador de paso CPG13 emite una mayor cantidad de monóxido de carbono respecto a las otras dos referencias evaluadas. Se observa que el calentador HA5, a pesar de ser el que tiene una menor potencia nominal, produce mayor cantidad de CO si se lo compara con el CPG10, el cual dobla la potencia térmica del mismo. De lo anterior se puede inferir que la producción de CO, además de estar ligado a la composición del gas y a la potencia nominal del artefacto, también depende de su diseño. Lo anterior ratifica el tipo de gas y las características de diseño del parque de artefactos de una zona, como dos parámetros fundamentales de intercambiabilidad, Ver **FIGURA 17**.
- El gas de referencia y Guajira cumplen el requisito de seguridad evaluados sobre las tres referencias de calentadores, ya que respetan la exigencia de seguridad establecida en la NTC 3531 respecto a la emisión máxima de monóxido de carbono.
- El gas de Cusiana no garantiza el cumplimiento de las emisiones de monóxido de carbono máximas cuando se evalúan en el calentador de referencia CPG 13. Este último punto visualiza la no intercambiabilidad entre los gases de Guajira y Cusiana.

Analysis of Variance for CO - Type III Sum of Squares

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F-Ratio	F-Value
MAIN EFFECTS					
A. Gas	0.138778	2	0.0693891	223.16	0.0000
E. Calentador	0.121589	2	0.0607946	197.27	0.0000
INTERACTIONS					
AB	0.110812	4	0.027703	89.89	0.0000
RESIDUAL	0.0249621	81	0.000308174		
TOTAL (CORRECTED)	0.296141	89			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

TABLA 27. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA EL MONÓXIDO DE CARBONO MEDIDO.

Al realizar un análisis de varianza para el monóxido de carbono, tal como se presenta en la **TABLA 27**, se observa que el valor “*p*” menor a 0.05, indica que existe un 95% de confiabilidad en la afirmación de que ambos factores, el tipo de gas y la referencia de los calentadores, poseen un efecto estadísticamente significativo para la producción de Monóxido de Carbono. Este hecho ratifica la necesidad de evaluar las condiciones de intercambiabilidad asociadas a las propiedades del gas y a su desempeño en un parque de gasodomésticos específicos.

La **TABLA 28** ilustra los intervalos de confianza para el monóxido de carbono, resultado importante por su carácter predictivo. Es decir, existe un 95% de probabilidad, de que al evaluar otra muestra de calentadores de paso de las mismas referencias y con los gases utilizados en la investigación, bajo las mismas condiciones de ensayo, sus valores de monóxido de carbono se encuentren dentro de los rangos especificados en esta tabla. Los datos se presentan agrupados por gas, por calentador y agrupando la interacción entre gas y calentador.

Table of Least Squares Means for CO
with 95.0 Percent Confidence Intervals

Level	Trmt.	Mean	Std. Error	Lower Limit	Upper Limit
Grand Mean	..	0.0421189			
CO					
1	21	0.0262267	0.00321507	0.0198266	0.0326468
2	20	0.0165333	0.00321507	0.0101463	0.0229204
3	20	0.104297	0.00321507	0.0978596	0.110644
Calentador					
1	20	0.0254467	0.00321507	0.0190596	0.0318338
2	20	0.0205333	0.00321507	0.0143162	0.0270504
Gas by Calentador	1	0.00047	0.00012107	0.0002456	0.000714
Gas by Calentador					
1	10	0.01878	0.01555134	0.00026545	0.0373055
1	2	0.01984	0.01555134	0.00579454	0.0308855
1	3	0.05018	0.01555134	0.0351345	0.0612255
2	1	0.01238	0.01555134	0.00133454	0.0234255
2	2	0.01963	0.01555134	-0.00141545	0.0207355
2	3	0.02756	0.01555134	0.0153145	0.0388055
3	1	0.05510	0.01555134	0.0441045	0.0662255
3	2	0.07250	0.01555134	0.0217045	0.0437055
3	3	0.07504	0.01555134	0.021995	0.028075

TABLA 28. INTERVALOS DE CONFIANZA PARA EL MONÓXIDO DE CARBONO
MEDIDO

De la **TABLA 28** se pueden comparar las medias para el monóxido de carbono y concluir que el uso del gas de Cusiana en el calentador de paso CPG 13, producen la mayor cantidad de emisiones, hecho validado al revisar la combinación 3 – 3 con una media igual a 0.22504, valor que supera inclusive el límite máximo cuando se evalúa el artefacto con gas límite de combustión incompleta (2000 ppm = 0.2 % Vol.) bajo la NTC 3531.

Este efecto se ilustra en la **FIGURA 18**.

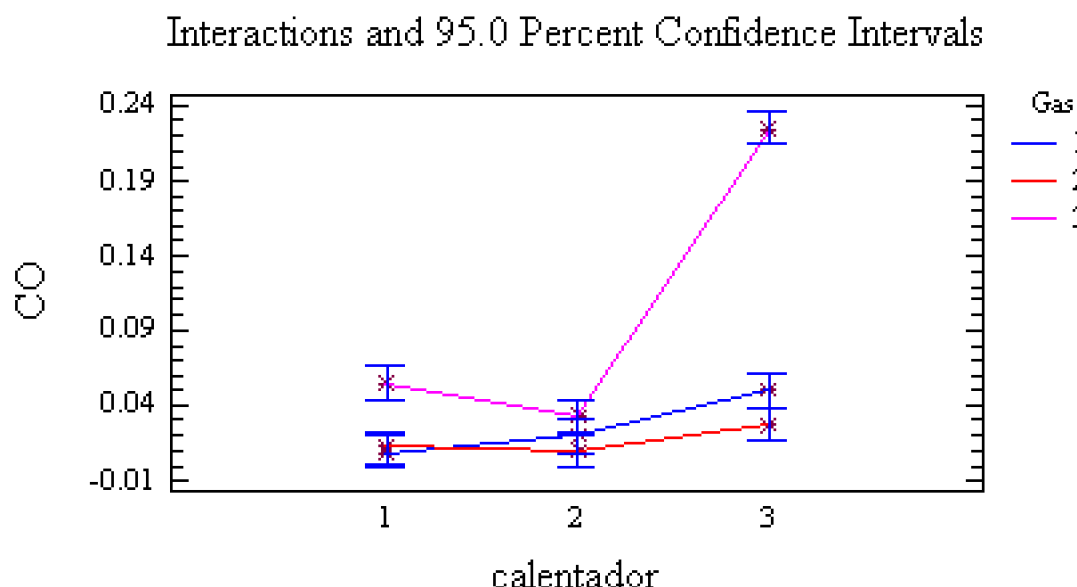


FIGURA 18. COMPARACIÓN DE LOS VALORES MEDIOS DE MONÓXIDO DE CARBONO SEGÚN EL TIPO DE GAS.

Finalmente, el análisis de homogeneidad entre grupos propio de la interacción del tipo de gas y la referencia del calentador, se presenta en la **TABLA 29**. Para esto se reúnen las medias de 9 grupos diferentes conformados por la combinación de los tres gases de ensayo y los tres calentadores de paso, en función de los valores de monóxido de carbono medido. Dichos valores agrupan estadísticamente sus medias con una confiabilidad del 95%.

TIPO DE GAS	Referencia Calentador	Emisiones CO Medio	Método Lombroso						Tamaño
			1-11	Tubo 1-30	Concha	Dondeani	Watts / succiona	1-11	
Gas 1	H25	0.00875	x	x	x	x	x	x	x
Gas 2	CPG10	0.00905	x	x	x	x	x	x	x
Gas 3	H25	0.01235	x, x	x	x	x	x, x	x, x	x, x
Gas 1	CPG10	0.01085	x, x, x	x	x, x	x, x	x, x	x, x	x, x, x
Gas 2	CPG13	0.00765	x, x	x, x	x, x, x	x, x	x, x	x, x	x, x
Gas 3	CPG10	0.02265	x	x, x, x	x, x, x	x, x, x	x, x, x	x	x
Gas 1	CPG13	0.00015	x	x, x	x, x	x, x	x, x	x	x
Gas 2	H25	0.00015	x	x	x	x	x	x	x
Gas 3	CPG13	0.22905	x	x	x	x	x	x	x

TABLA 29. AGRUPACIÓN ESTADÍSTICA SEGÚN LA INTERACCIÓN ENTRE EL TIPO DE GAS Y LA REFERENCIA DEL CALENTADOR.

A la luz de la NTC 3531 todas las combinaciones tipo de gas y referencia del artefacto se encuentran por debajo del límite máximo de emisiones de monóxido de carbono, cuando se evalúan a la presión nominal de suministro. Únicamente se excluye el calentador de paso de 13 LPM cuando es evaluado con el gas de Cusiana, observándose que su valor medio de CO no es posible de agrupar estadísticamente bajo ningún método.

El resultado anterior es coherente con los valores en rojo de la **TABLA 26** y con la proximidad del valor promedio de la relación CO/CO₂ al valor máximo permitido por el

criterio de intercambiabilidad de Delbourg en el caso de la combinación del gas de Cusiana y el CPG 13. Es decir, se pudiera inferir que bajo el criterio de combustión higiénica planteado por Delbourg, *no es del todo recomendable la intercambiabilidad del gas de Guajira con el de Cusiana*. Lo anterior se puede observar gráficamente en la **FIGURA 19**, para el grupo 9 que reúne el gas de Cusiana y el CPG 13.

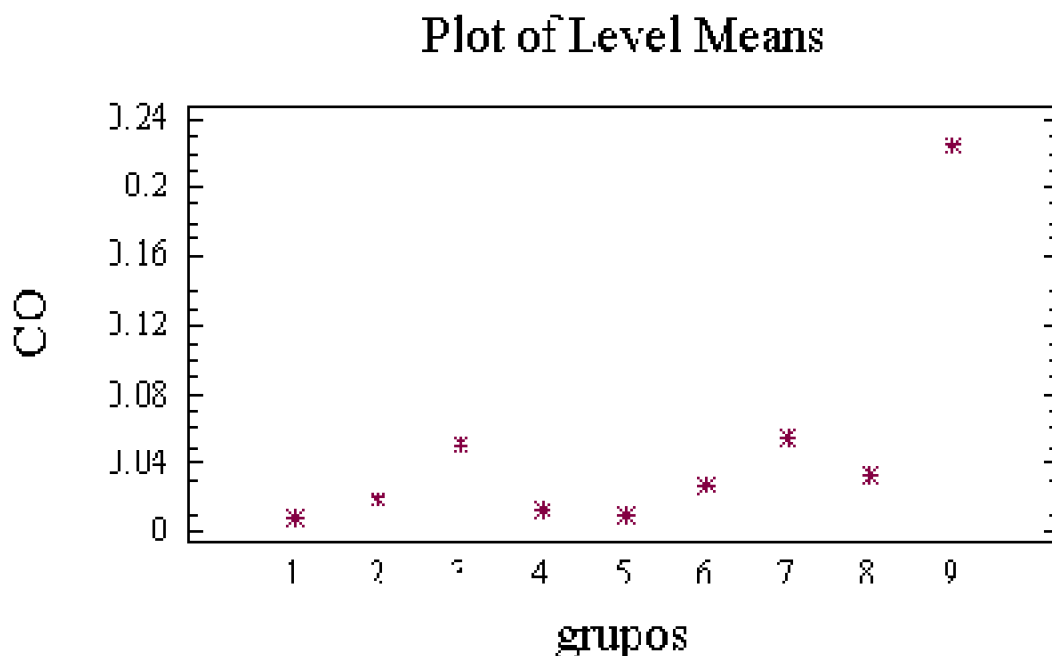


FIGURA 19. COMPARACIÓN DE LOS VALORES MEDIOS DE MONÓXIDO DE CARBONO PARA LA INTERACCIÓN GAS – CALENTADOR.

Emisiones de monóxido de carbono: comparación del criterio de Delbourg respecto a las exigencias de la NTC 3531 [6], [14].

Actualmente en las reglamentaciones técnicas vigentes en Colombia [31], se hace especial énfasis en la seguridad durante la operación del artefacto y más aún, en el tema de emisiones contaminantes, aspecto que involucra el diseño del artefacto y su instalación. Para que el criterio de intercambiabilidad establecido por Delbourg garantice el cumplimiento de dichas reglamentaciones, es necesario comparar su nivel de exigencia en el tema de emisiones de monóxido de carbono (combustión higiénica, CO/CO₂ menor o igual a 0.02) comparado con el 0.1% Vol. máximo de CO referido en la NTC 3531, cuando el artefacto se evalúa con el gas de referencia.

Posterior a los métodos de intercambiabilidad propuestos por Delbourg, se realizaron investigaciones respecto a la forma en que las concentraciones de CO afectan la salud de las personas, lo cual llevó a definir parámetros cuantificables de seguridad en los

artefactos que empleen gases combustibles. Estas investigaciones demostraron que el envenenamiento con monóxido de carbono puede ser fatal cuando se lo respira en cantidades elevadas, debido a que este presenta una afinidad 240 veces mayor que el oxígeno para combinarse con la hemoglobina de la sangre (formando carboxihemoglobina: HbCO), se reduce en consecuencia la circulación de oxígeno en la misma. En la **TABLA 30** se presentan los efectos de las concentraciones de la carboxihemoglobina en las personas:

% Saturación de HbCO en la sangre	Síntomas
0 a 10	Ningún síntoma claro según la sensibilidad propia de cada individuo.
10 a 20	Tensión en la frente, posible dolor de cabeza y somnolencia.
20 a 30	Enrojecimiento de la cara, dolor de cabeza, pérdida de aliento y palpitación al realizar esfuerzos físicos y mareo ligero.
30 a 40	Dolor de cabeza severo, vertigo, náuseas, oscurecimiento de la vista, debilidad en las rodillas, inestabilidad, dificultad para razonar y posible calambres.
40 a 50	Iguales síntomas anteriores más un incremento en la respiración y el ritmo cardíaco debido al tener esfuerzos físicos.
50 a 60	Pérdida de la conciencia y estado de coma con convulsiones intermitentes.
60 a 70	Estado de coma con convulsiones intermitentes, pulso y respiración débiles.
> a 70	Paro cardíaco - respiratorio y muerte.

TABLA 30. EFECTOS DE LA HbCO EN LAS PERSONAS [31].

De lo anterior tenemos que gases intercambiables bajo la metodología de Delbourg no garantizan la seguridad de los usuarios bajo la NTC 3531. Como caso particular se toman los valores de la **TABLA 26** donde todas las condiciones son de intercambiabilidad; mientras que la **TABLA 23**, se incumple con el requisito de seguridad establecido en la norma para la combinación del gas natural de Cusiana con el calentador CPG13.

Esto hace importante la revisión del criterio de combustión higiénica establecido por Delbourg bajo las normas de seguridad y funcionamiento desarrolladas desde ese entonces, pues dicho parámetro debe ser coherente desde el punto de vista normativo.

Análisis del consumo calorífico nominal (potencia térmica) bajo el criterio de Delbourg.

El método de intercambiabilidad de Delbourg plantea como condición crítica para la tasa de flujo nominal, una desviación máxima del 10% respecto al valor definido en la placa de especificaciones. En la **TABLA 31** se ilustra esta desviación.

Referencia	Cusiana N° 1		Cusiana N° 2		Comparación
	NTC	Gas Ideal	NTC	Gas Ideal	
HA5	24.1331	12.87322	23.97745	12.69252	Cusiana respecto a G20
CPG10	21.3932	9.00643	20.69327	9.064723	
CPG13	22.09637	10.60616	22.30352	11.03332	
PROMEDIO	22.5427	11.04594	22.3274	10.24355	
HA5	22.47630	11.83589	22.51765	11.65303	Cusiana respecto a Guajira
CPG10	22.12584	11.29075	21.43041	10.53129	
CPG13	23.21432	12.78203	23.48296	13.23101	
PROMEDIO	22.6256	11.95559	22.4103	11.8151	

TABLA 31. VARIACIÓN DEL CONSUMO CALORÍFICO NOMINAL [%].

Los valores señalados en rojo (promedios), muestran que los gases no son intercambiables por sobrepasar el 10% máximo de desviación (Ver **FIGURA 20**). Además tampoco se encuentra en concordancia con el requisito de la NTC 3531, el cual permite una desviación máxima del 5%. Se observa que los resultados de la potencia medida respecto a la aproximación teórica, solo presenta una desviación máxima del 1%, lo cual muestra las ventajas de la aplicación de modelos matemáticos en la predicción de resultados para evitar sobre costos innecesarios en la fase experimental.

Es importante aclarar que dicha situación, se presenta para los valores de potencia térmica calculados con la ecuación de la norma (43) y con la de gases ideales (44). Sin embargo se presenta una desviación de aproximadamente el 10% entre ambos métodos, explicado por la corrección de densidades relativas que realiza la ecuación de la norma para garantizar la homogeneidad de los resultados de todos los fabricantes de equipos a gas. Se reitera la importancia de que los métodos de intercambiabilidad posean una coherencia con la normativa vigente.

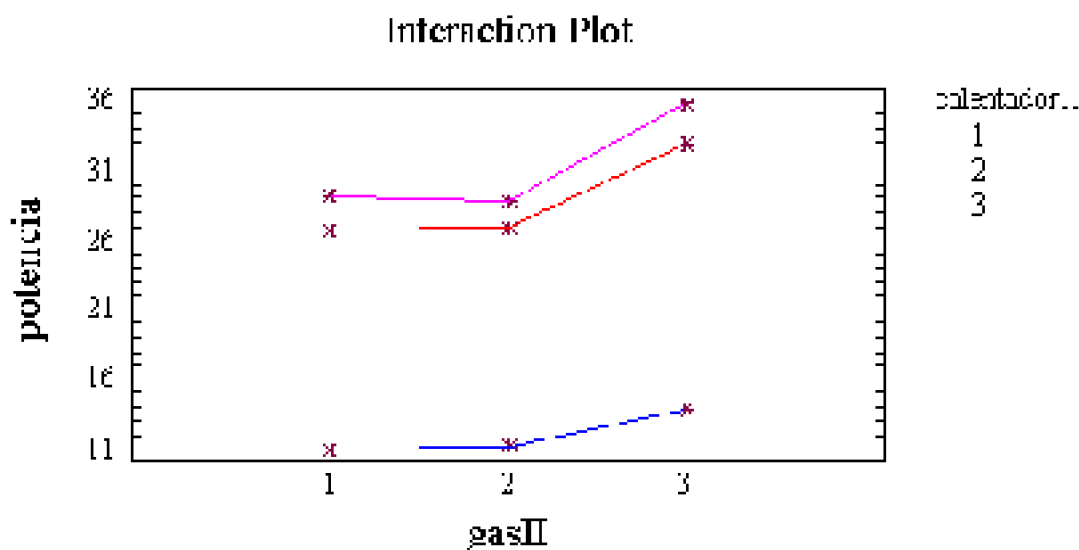


FIGURA 20. CONSUMO CALORÍFICO NOMINAL SEGÚN EL TIPO DE GAS Y LA REFERENCIA DEL CALENTADOR

La **TABLA 32** muestra el análisis de varianza para los consumos caloríficos obtenidos, mostrando de nuevo que para el estudio de intercambiabilidad se requiere la participación del tipo de gas y del artefacto de forma simultánea, tal como lo señala el valor “p” igual a 0.0.

Analysis of Variance for potencia - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
gasII	213.119	2	106.559	3004.70	0.0000
ReferenciaCalentadorII	3541.13	2	1770.57	36934.58	0.0000
INTERACTIONS					
AB	25.3736	4	6.3434	178.86	0.0000
RESIDUAL	11.05436	32	0.345449		
TOTAL (CORRECTED)					
	3850.58	35			

All 4 vectors are correct by the residual mean square error.

TABLA 32. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA EL CONSUMO CALORÍFICO NOMINAL.

Análisis del incremento en la temperatura del agua y la carcaza del artefacto.

De la **TABLA 24** se observa que la temperatura de salida del agua y de la carcaza externa del calentador, aumentan cuando se pasa del gas de Guajira al gas de Cusiana. Los resultados muestran la relevancia que tiene el diseño del calentador frente a la

transferencia de calor desde los humos hacia el agua (eficiencia térmica) y en la disipación del calor a través de la carcasa. De lo anterior se puede concluir que los artefactos cumplen con el criterio de seguridad establecido en la NTC 3531, frente al calentamiento máximo permitido en las zonas externas: 85°C.

Las diferencias obtenidas respecto al incremento de temperatura, puede explicarse debido a que los calentadores CPG10 y CPG13 poseen diseños modulantes, es decir, se presenta una fluctuación de la potencia térmica en función de las variaciones del caudal de agua, mientras que el calentador HA5 posee un diseño convencional (no modulante). Este aspecto es determinante para garantizar que la temperatura del agua a la salida del calentador no alcance valores que pongan en riesgo la seguridad del usuario. Bajo el parámetro propuesto, los gases no serían intercambiables debido a que el calentador HA5 presenta un incremento en la temperatura del agua de hasta un 40% (± 10 °C). Se considera que este parámetro, relacionado directamente con la eficiencia térmica, amerita una investigación detallada.

Variables cualitativas.

Con base en los resultados experimentales obtenidos, no se observaron fenómenos de combustión indeseables como puntas amarillas, deposición de hollín, desprendimiento y retroceso de llama, con ninguno de los gases en los calentadores evaluados. Esto hace que bajo el criterio de Delbourg los gases sean intercambiables.

CONCLUSIONES.

- En el parque de calentadores de paso instalados en las condiciones de Medellín, los gases naturales de Guajira y de Cusiana no son intercambiables por las siguientes razones:
 - La potencia térmica supera la desviación máxima del 10% permitida por el criterio de Delbourg efectuando su cálculo con la ecuación de la NTC 3531 y con la ecuación de gases ideales.
 - Aunque no sea un criterio de intercambiabilidad de gases establecido en los métodos estudiados, los requerimientos de seguridad para los artefactos gasodomésticos bajo las últimas disposiciones reglamentarias impuestas por el Ministerio de Comercio, Industria y Turismo, se observa que el incumplimiento de las emisiones de Monóxido de Carbono máximas permitidas, hacen que ambos gases no sean intercambiables. Este aspecto se hace aún más crítico en sitios ubicados a grandes alturas sobre el nivel del mar.
 - Desde el punto de vista teórico, el método de Dutton pronostica problemas de combustión incompleta, hollín y desprendimiento de llama, concluyendo que dichos gases no sean intercambiables bajo este criterio.

Es importante resaltar que estas dos últimas situaciones anunciadas por los criterios de Dutton no se evidenciaron durante los ensayos experimentales, y esto hace necesario que los métodos de intercambiabilidad sean revisados periódicamente a la luz de los

nuevos diseños en los artefactos gasodomésticos. Los últimos avances en el diseño y la flexibilidad en los quemadores hacen que los requerimientos relacionados con la estabilidad de llama sean ampliados y los mismos criterios no puedan ser aplicados durante varias décadas.

- Del análisis teórico de la variación de la potencia y la tasa de aireación, se tiene que un aumento en el índice de Wobbe implica un aumento en la potencia y una disminución en la tasa de aireación por atenuación en el arrastre de aire. Es decir, al sustituir el gas de Guajira por el gas de Cusiana con 2% de CO₂ (con tratamiento por cuestiones de transportabilidad), se obtiene un incremento en la potencia del 7.2% y una disminución en la tasa de aireación del 6.6%, observándose que una mayor entrada de combustible estaría ligada desfavorablemente a una reducción en la entrada del aire primario y el consecuente aumento de emisiones de monóxido de carbono. Una situación más favorable se observa si se analiza la sustitución del gas de Guajira por el gas de Cusiana sin tratamiento previo, ya que la potencia térmica solo se aumenta un 1.6% y la tasa de aireación solo disminuye un 1.57%, asociado esto al elevado contenido de dióxido de carbono. La desventaja bajo esta última situación es el aspecto de la transportabilidad, ya que el gasoducto estaría conduciendo al mismo costo un gas de menor contenido energético, y cargando con los problemas de corrosión y formación de hidratos asociados al CO₂ que posee el gas de Cusiana sin tratamiento previo.
- De las consideraciones teóricas acerca de las implicaciones de la altitud sobre la intercambiabilidad de gases, se concluye que:
 - Se requiere desarrollar nuevas metodologías de intercambiabilidad que incluyan la altura del nivel del mar como parámetro de importancia.
 - Si se distribuyen gases naturales de elevado índice de Wobbe en regiones localizadas a elevadas alturas sobre el nivel del mar, es necesario realizar ajustes a las condiciones de suministro del flujo de gas y/o geométricas sobre el diseño de los artefactos, teniendo en cuenta que los últimos métodos de intercambiabilidad proponen que tanto el fabricante como el distribuidor de gas estén dispuestos a realizar modificaciones tal como se mencionó en el numeral 2.5, con el método de la presión de suministro variable, método de la presión de suministro constante y método del módulo constante.
- Se observa que la no intercambiabilidad de los gases combustibles de Guajira y de Cusiana, concuerda en buena medida con los requerimientos de seguridad establecidos en las normas de producto. Sin embargo, es necesario revisar los criterios de intercambiabilidad respecto a los requisitos de las normas técnicas (reglamentos) de producto vigentes. Se observó que la norma para los calentadores instantáneos de agua, NTC 3531, presenta un mayor rigor en cuanto a los requerimientos de seguridad, sobre todo en aspectos tan críticos como las emisiones monóxido de carbono. Es importante que los criterios de intercambiabilidad presenten una coherencia respecto a los requerimientos normativos de seguridad.

- Los problemas de intercambiabilidad entre el gas natural de Guajira y Cusiana encontrados a condiciones de Medellín se hacen mas críticos si se compararan con mediciones similares realizadas en sitios a mayor altitud sobre el nivel del mar, debido a:
 - Disminución de la disponibilidad de Oxígeno en el aire, el cual posibilita el aumento de la formación de Monóxido de Carbono.
 - Disminución de la potencia por derretero natural.

Por lo anterior es recomendable la realización de un estudio detallado en ciudades como Bogotá donde se evalúe dicho comportamiento y se propongan métodos alternativos que permitan el uso seguro de gases naturales de índice de Wobbe elevado.

- Como pronóstico experimental para la validación de la intercambiabilidad de gases bajo el criterio de combustión, el empleo del gas límite de combustión incompleta, G21 ($\text{CH}_4 = 87\%$, $\text{C}_3\text{H}_8 = 17\%$, $W = 15.21 \text{ kWh/m}^3$) es adecuado para garantizar la seguridad de los usuarios, ya que todos los gases de la segunda familia presentan índices de Wobbe menores, garantizando la exigencia de la prueba.
- Es posible alcanzar la intercambiabilidad entre el gas de Guajira y Cusiana si se disminuye el índice de Wobbe de este último, operación que puede realizarse mediante la adición de gases inertes. La normativa vigente permite hasta un 5% [19], condición que pudiera ser revaluada según los resultados obtenidos. El empleo del Nitrógeno es una buena alternativa, pues evitaría la restricción que se tiene con el Dióxido de Carbono con respecto a los problemas de corrosión en gasoductos y formación de hidratos. Además, el dióxido de carbono puede solidificarse al momento de licuar el gas (hielo seco), afectando el envasamiento del mismo.
- El método propuesto por Delbourg y Dutton presenta limitaciones cuando se realiza un estudio de intercambiabilidad en un país que presenta grandes variaciones en los pisos térmicos. La inclusión de este parámetro como criterio de intercambiabilidad implicaría la modificación de los principales fundamentos de esta técnica:
 - Posibilidad de intervención sobre el diseño del producto (cambio de inyectores) y sobre las condiciones de flujo de gas (presión de suministro).
 - Comercialización selectiva de artefactos de potencias elevadas en ciertos lugares geográficos que benefician su desempeño.
 - Es factible que se requiera la aplicación de un método de intercambiabilidad diferente que garantice la evaluación en las condiciones más críticas para su posible generalización a otras zonas.
- Es importante revisar los criterios de intercambiabilidad para otros gasodomésticos cuyas condiciones de operación e instalación deben hacer más exigentes sus requerimientos funcionales y de seguridad; tales como hornos de empotrar, secadoras y calentadores de ambiente.

- Los nuevos requerimientos ambientales perfilan a los óxidos de nitrógeno (NOx) como elementos esenciales al momento de evaluar las emisiones contaminantes de un sistema térmico que funcione con combustibles fósiles. Siendo los calentadores de paso artefactos gasodomésticos de potencias elevadas, deberían ajustarse los métodos de intercambiabilidad para la inclusión de los NOx como parámetro crítico, no solo por su contribución al fenómeno de lluvia ácida, sino por su relevancia en el tema de corrosión de ductos de evacuación y del mismo equipo.
- El concepto de inter – operabilidad manejado en Europa reúne cuatro criterios: la homologación de unidades, las especificaciones del gas, los procedimientos de operación de los distribuidores y las reglas básicas de negociación y comunicación de la estandarización. Allí la intercambiabilidad alcanza una elevada importancia cuando se evalúa la distribución de gas en función de sus propiedades (poder calorífico). Vale la pena que este concepto sea revisado a la luz de las condiciones colombianas [33].
- El análisis estadístico es una herramienta que sirve como respaldo a las hipótesis que se realizan sobre la información experimental. En ningún caso pueden considerarse como un criterio de intercambiabilidad.

BIBLIOGRAFÍA.

- HARSHA P., EDELMAN R., FRANCE D. *Catalogue of Existing Interchangeability Prediction Methods*. Science Applications Inc., Combustion Science and Advanced Technology Department, Gas Research Institute. 1980.
- AMERICAN GAS ASSOCIATION. *Interchangeability of Other Fuel Gases with Natural Gases*. Research Bulletin #36. 1946.
- UTILISATIONS DU GAZ. 8.4 Interchangeabilité des Gaz. Aide – Mèmoire de L'industrie du Gaz. Association Technique de L'industrie du Gaz en France. 4 Edition, 1990. (p 706 - 712).
- JESSEN P., LAMBERT G., SOUTH R., *Interchangeability of Gases: ¿The Mixture as Before?* British Gas Corp., U.K. Inst. Gas Eng. Commun. 1055, 1978 (32pp.).
- TAS, Ibrahim. REPORT: *Gas Quality Appliance Testing*. Australian Gas Association. AGL Research Centre. November 1999.
- DELBOURG, P. *L'Interchangeabilité des Combustibles Gaseux*. Annales des Mines. Juin 1969.
- DELBOURG, P. *Problems Arising from the Interchangeability of Gases*. Gas Engineering and Management. June 1976.
- DUTTON, B., WOOD, S. *Gas Interchangeability: Prediction of Soot Deposition on Domestic Gas Appliances with Aerated Burners*. Journal of the Institute of Energy. December 1984. (p 107 - 108).

- DUTTON, B., SOUCHARD, R. *Gas Interchangeability: Prediction of Incomplete Combustion*. Journal of the Institute of Energy. December 1985. (p 210 – 212).
- DUTTON, B., GIMZEWSKI, E. *Gas Interchangeability: Prediction of Flame Lift*. Journal of the Institute of Energy. June 1983. (p 107 – 108).
- DUTTON, B. *Interchangeability Prediction. The Framework for a New Approach*. Journal of the Institute of Energy. December 1978. (p 225 – 229).
- DUTTON, B. *A New Dimension to Gas Interchangeability*. British Gas Corporation. Communication 1246. Watson House, London. November 1984.
- ROBINSON, C. *Applicability of U.K. Interchangeability Prediction Methods to the Colombian Gas Industry*. British Gas plc. Gas Research Centre Communication.
- NTC 3531. *Artefactos Domésticos que Emplean Gases Combustibles para la Producción Instantánea de Agua Caliente para Usos a Nivel Doméstico. Calentadores de Paso Continuo*. Primera Actualización (reabrobada en 1999 – 07 - 28). Instituto Colombiano de Normas Técnicas, ICONTEC.
- UTILISATIONS DU GAZ. 8.5.2. *La Production d'eau Chaude Sanitaire et le Chauffage. Aide – Mèmoire de L'industrie du Gaz*. Association Technique de L'industrie du Gaz en France. 4 Edition, 1990. (p 721 – 741).
- Manual de servicio de calefones KROM. Compañía Elaboradora de Metales S.A. CEM. Chile.
- <http://www.finanzas.com/ld.4296696/noticias/noticia.html> .
- <http://elpais-cali.terra.com.co/historico/sep252002/ECO/B225N.html> .
- <http://www.upme.gov.co> Resolución N ° 71. *Reglamento único de transporte de gas natural*. Diciembre 3 de 1999.
- DIAZ, A. *Diseño Estadístico de Experimentos*. Colección Ciencia y Tecnología. Editorial Universidad de Antioquia. Junio de 1999.
- MONTGOMERY, D. *Diseño y Análisis de Experimentos*. Grupo Editorial Iberoamérica. 1991.
- AMELL, A., BARRAZA, L., GÓMEZ, E. *Tecnología de la Combustión de los Combustibles Gaseosos*. Universidad de Antioquia. Facultad de Ingeniería. Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas. CESET. 1998.
- NTC 3527. *Gasodomésticos. Reglas comunes aplicables a la construcción y ensayo de artefactos que emplean gases combustibles para usos domésticos, comerciales e industriales*. Instituto Colombiano de Normas Técnicas, ICONTEC.
- WAIBEL, R.T. *Interchangeability (Panel Discussion)*. Institute of Gas Technology. Symposium Papers, pag 639. New Fuels and Advances in Combustion Technologies. March 26 –30, 1979. New Orleans, Louisiana. U.E.
- FRANCE, D.H. *International Alternatives for Interchangeability Prediction*. Symposium Papers, pag 545. New Fuels and Advances in Combustion Technologies. March 26 –30, 1979. New Orleans, Louisiana. U.E.
- BELLES, F. *Prospective Requiriments for Burner Flexibility*. Symposium Papers, pag 531. New Fuels and Advances in Combustion Technologies. March 26 –30, 1979. New Orleans, Louisiana. U.E.

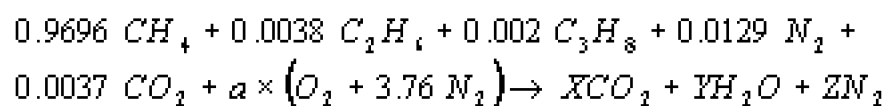
-
- GRUMER, J. *Fundamentals of Predicting Exchangeability or Interchangeability of Fuel Gases in Utility Systems*. Symposium Papers, pag 571 . New Fuels and Advances in Combustion Technologies. March 26 –30, 1979. New Orleans, Louisiana. U.E.
- BELLES, F., GRIFFITHS, J., *Interchangeability of Fuel Gases in Present and Future Appliances*. American Gas Association. Symposium Papers, pag 556. New Fuels and Advances in Combustion Technologies. March 26 –30, 1979. New Orleans, Louisiana. U.E.
- CORTÉS, J., AMELL, A. *Verificación experimental del efecto de la altitud sobre la potencia térmica de un quemador atmosférico*. Revista FACULTAD DE INGENIERÍA. Universidad de Antioquia. Edición especial sobre energía., pag. 26 - 35 Abril de 2002.
- AMELL, A., BARRAZA, L. *Intercambiabilidad de los gases*. Revista ACOGAS. N° 17. Marzo 1996.
- Resolución 0941 DE 2003 (mayo 15) por la cual se expide el reglamento técnico de emergencia RTC-001MCIT para gasodomésticos que funcionan con combustibles gaseosos, que se fabriquen o importen para ser utilizados en Colombia.
- GIL, L. *Niveles permisibles de monóxido de carbono para la salud humana*. Revista ACOGAS. N°28, pag. 24 – 29. Marzo - Abril de 2000.
- CURRAN, A. *Inter – operability issues for the U.K*. International Gas Engineering and Management. Jan – Feb, 2003.
- ROPER, F.G. *“The prediction of laminar diffusion flame sizes: part I: theoretical model”*. Combustion and Flame 29, 219 – 226 (1977).

ANEXO

CÁLCULO DEL PORCENTAJE MÁXIMO DE CO₂ Y TEMPERATURA DE ROCIO PARA CADA GAS DE ENSAYO

GAS DE LA GUAJIRA.

Reacción:



Balance Carbono:

$$0.9698 + 2 \times 0.0038 + 3 \times 0.002 + 0.0037 = X.$$

$$X = 0.9871$$

Balance Hidrógeno:

$$3 \times 0.9698 + 6 \times 0.0038 + 8 \times 0.002 = 2Y$$

$$Y = 1.959$$

Balance Oxígeno:

$$0.0037 + a = X + Y/2$$

$$a = 1.9629$$

Balance Nitrógeno:

$$0.0129 + 3.76a = Z$$

$$Z = 7.3934$$

PORCENTAJE MÁXIMO DE CO₂ PARA EL GAS DE LA GUAJIRA:

$$\%CO_2 = \frac{1}{1 + 7.3934} = 11.77\%$$

TEMPERATURA DE ROCIO PARA EL GAS DE LA GUAJIRA:

- Para una humedad relativa promedio en Medellín del 60%, tenemos que: $P_v, \text{aire} = \phi_{\text{aire}} \times P_{\text{sat}} \text{aire}, 20^\circ\text{C}$ Donde: P_v, aire : Presión de vapor del agua en Medellín = 1.871 kPa ϕ_{aire} : Humedad relativa en Medellín (promedio) = 60% $P_{\text{sat}} \text{aire}, 20^\circ\text{C}$: Presión de saturación del aire a 20 °C = 2.339 kPa
- Cálculo del número de moles de vapor de agua en el aire. $N_{v, \text{aire}} = (P_v, \text{aire}/P_{\text{atm}}) \times N_{\text{total}}$ Donde: $N_{v, \text{aire}}$: Número de moles de vapor de agua en el aire. P_v, aire : Presión de vapor del agua en Medellín. P_{atm} : Presión atmosférica en Medellín. N_{total} : Número de moles totales.

Reemplazando tenemos que:

$$N_{v, \text{aire}} = \left(\frac{1.871 \text{ kPa}}{101.325 \text{ kPa}} \right) \times (10.3395 + N_{v, \text{aire}})$$

$$N_{v, \text{aire}} = 0.1945 \text{ kmol}$$

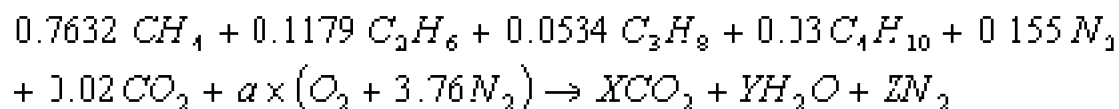
- Presión de vapor de los productos.

$$\left(\frac{1.959 + 0.1945}{10.534} \right) \times (852) = 17.42 \text{ kPa} = 174.17 \text{ mb}$$

- Trocio = T_{sat} a 16.4 kPa = 56.8 °C

GAS DE CUSIANA CON 2% DE CO₂.

Reacción:



Balance Carbono:

$$0.7632 + 2 \times 0.1179 + 3 \times 0.0534 + 4 \times 0.003 + 0.02 = X$$

$$X = 1.2992$$

Balance Hidrógeno:

$$4 \times 0.7632 + 6 \times 0.1179 + 8 \times 0.0534 + 10 \times 0.03 = 2Y$$

$$Y = 2.2437$$

Balance Oxígeno:

$$0.02 + a = X + Y/2$$

$$a = 2.401$$

Balance Nitrógeno:

$$0.0155 + 3.76a = Z$$

$$Z = 9.04326$$

PORCENTAJE MÁXIMO DE CO₂ PARA EL GAS DE CUSIANA (2% CO₂):

$$\%CO_2 = \frac{1.2992}{1.2992 + 9.04326} = 12.56\%$$

TEMPERATURA DE ROCIO PARA EL GAS DE CUSIANA (2% CO₂):

- Para una humedad relativa promedio en Medellín del 60%, tenemos que:

$$P_{v, \text{aire}} = \phi_{\text{aire}} \times P_{\text{sat aire}, 20^\circ\text{C}}$$

Donde: $P_{v, \text{aire}}$: Presión de vapor del agua en Medellín = 1.871 kPa ϕ_{aire} : Humedad relativa en Medellín (promedio) = 60% $P_{\text{sat aire}, 20^\circ\text{C}}$: Presión de saturación del aire a 20 °C = 2.339 kPa

- Cálculo del número de moles de vapor de agua en el aire.

$$N_{v, \text{aire}} = (P_{v, \text{aire}}/P_{\text{atm}}) \times N_{\text{total}}$$

Donde: $N_{v, \text{aire}}$: Número de moles de vapor de agua en el aire. $P_{v, \text{aire}}$: Presión de vapor del agua en Medellín. P_{atm} : Presión atmosférica en Medellín. N_{total} : Número de moles totales.

Reemplazando tenemos que:

$$N_{v, \text{aire}} = \left(\frac{1.871 \text{ kPa}}{101.325 \text{ kPa}} \right) \times (10.91 + N_{v, \text{aire}})$$

$$N_{v, \text{aire}} = 0.2052 \text{ kmol}$$

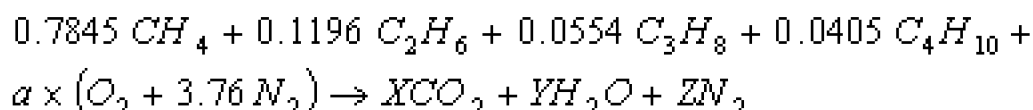
- Presión de vapor de los productos.

$$\left(\frac{2.1541 + 0.2052}{12.2544} \right) \times (852) = 16.4 \text{ kPa} = 164.3 \text{ mb}$$

- Trocio = T_{sat} a 16.43 kPa = 55.78 °C

GAS DE CUSIANA SIN CO₂.

Reacción:



Balance Carbono:

$$0.7845 + 2 \times 0.1196 + 3 \times 0.0554 + 4 \times 0.0405 = X$$

$$X = 1.3519$$

Balance Hidrógeno:

$$4 \times 0.7845 + 6 \times 0.1196 + 8 \times 0.0554 + 10 \times 0.0405 = 2Y$$

$$Y = 2.3519$$

Balance Oxígeno:

$$a = X + Y/2$$

$$a = 2.528$$

Balance Nitrógeno:

$$3.76a = Z$$

$$Z = 9.5053$$

PORCENTAJE MÁXIMO DE CO₂ PARA EL GAS DE CUSIANA (0% CO₂):

$$\% \text{CO}_2 = \frac{1.3519}{1.3519 + 9.5053} = 12.45\%$$

TEMPERATURA DE ROCIO PARA EL GAS DE CUSIANA (0% CO₂):

- Para una humedad relativa promedio en Medellín del 60%, tenemos que:

$$P_v, \text{aire} = \phi_{\text{aire}} \times P_{\text{sat}} \text{aire}, 20^\circ\text{C}$$

Donde: P_v, aire : Presión de vapor del agua en Medellín = 1.871 kPa ϕ_{aire} : Humedad relativa en Medellín (promedio) = 60% $P_{\text{sat}} \text{aire}, 20^\circ\text{C}$: Presión de saturación del aire a 20 °C = 2.339 kPa

- Cálculo del número de moles de vapor de agua en el aire.

$$N_{v, \text{aire}} = (P_{v, \text{aire}}/P_{\text{atm}}) \times N_{\text{total}}$$

Donde: $N_{v, \text{aire}}$: Número de moles de vapor de agua en el aire. $P_{v, \text{aire}}$: Presión de vapor del agua en Medellín. P_{atm} : Presión atmosférica en Medellín. N_{total} : Número de moles totales.

Reemplazando tenemos que:

$$N_{v, \text{aire}} = \left(\frac{1.871 \text{ kPa}}{101.325 \text{ kPa}} \right) \times (13.209 + N_{v, \text{aire}})$$

$$N_{v, \text{aire}} = 0.2484 \text{ kmol.}$$

- Presión de vapor de los productos.

$$\left(\frac{2.3519 + 0.2484}{13.4575} \right) \times (852) = 16.462 \text{ kPa} = 164.62 \text{ mb}$$

- Trocio = T_{sat} a 16.462 kPa = 55.84 °C

TIPO DE GAS	%Máximo de CO ₂	Temperatura de rocío (°C)
Gas de referencia	11.70	-
Gas de Gijón	11.77	55.90
Gas de Gijón sin CO ₂	12.45	55.84
Gas de Gijón 2% CO ₂	12.56	55.78

TABLA 33 - RESUMEN PORCENTAJES MÁXIMOS DE CO₂ Y TEMPERATURAS DE ROCÍO