

Efectos del cambio de composición química del gas natural sobre el comportamiento de turbinas a gas: Una aproximación al caso colombiano

Andrés A. Amell¹, César A. Bedoya², Bladimir Suárez³

Recibido para evaluación: 8 de Septiembre de 2005
Aceptación: 24 de Octubre de 2005
Entrega de versión final: 7 de Febrero de 2006

Resumen

A nivel internacional, se ha venido dando una creciente participación de la producción de electricidad con centrales térmicas a gas, utilizando como combustible gas natural. Uno de los factores en el que se centra la preocupación mundial relacionado con la disponibilidad y vida útil de las centrales térmicas a gas es la incidencia del cambio de composición química de los gases naturales, convirtiendo la intercambiabilidad de gases en un referente ineludible en la planeación y operación de este tipo de centrales.

Sustentado en la variabilidad de la composición química del gas natural, este trabajo revisa el estado del arte en relación con la intercambiabilidad de los gases naturales en centrales térmicas a gas a nivel internacional, como también examina los posibles problemas de intercambiabilidad que se puedan presentar en las centrales térmicas a gas en Colombia cuando se pase de operar con gas natural de Guajira a gas natural de Cusiana. Esta situación es muy ilustrativa para otros países, cuando deban realizar cambios de gas natural provenientes de yacimientos libres y yacimientos asociados.

Palabras Claves: Turbina de gas, gas natural, intercambiabilidad de gases, combustión, inestabilidad de llama.

Abstract

At present natural gas participation is increasing in the world to electricity generation. One of the world concern respect of gas thermal power plant availability and its life duration is the effects of chemical composition changes of natural gas, therefore gases interchangeability becomes in a main point in plan and operate that kind of stations. This paper reviews the state of the art in the effects of gases interchangeability over gas thermal power station, also it analyzes the matters which could happen at colombian gas thermal power plants, when Guajira's natural gas will be changed for Cusiana's natural gas. That situation could be used as example to other countries when they have to change between two different natural gases, in our case we are working with a natural gas that is from a free natural gas field and then we will change it to one that is from an associated oil field.

Keywords: Gas turbine, natural gas, gas interchangeability, combustion, instability flame.

© 2006 Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín. Todos los derechos reservados.

¹Coordinador del Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía (GASURE). Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia. anamell@udea.edu.co

²Estudiante Ingeniería Mecánica. Universidad de Antioquia. cesarbed1208@yahoo.com

³Ingeniero Mecánico Universidad de Antioquia. virsa20052005@yahoo.com

1. Introducción

En Colombia después del racionamiento de energía eléctrica que causó grandes pérdidas a la economía nacional y muchas molestias al confort de los colombianos en el comienzo de la década de los años noventa, para darle confiabilidad al suministro de electricidad, la política energética nacional estimuló la construcción de centrales térmicas a gas (CTG), utilizando como combustible el gas natural (GN), proveniente del yacimiento de Guajira. Como consecuencia se instalaron en el país 2800 MW térmicos, representados en proyectos ubicados en la Costa Caribe, en el Magdalena Medio y en el departamento del Valle (Mejía, 2004: UPME, 2003).

Si bien las centrales térmicas de la Sierra, Termocentro, Termodorada, Termovalle y Termocali iniciaron su operación con el gas natural de Guajira, se preveía a mediano plazo, una vez estuviese disponible el gas natural de Cusiana, su utilización en estas centrales. Con la construcción de la planta para la disminución del contenido de CO₂ del 5% al 2%, es inminente que a partir del 2006 la operación de estas centrales con el GN de Cusiana.

Como se examinará mas adelante, el gas natural de Cusiana con 2% de CO₂ presenta una composición química (CQ) diferente al de Guajira, lo que incide en que tengan propiedades de combustión diferentes. Esta situación, como ha sido característica en la historia de la industria del gas natural, plantea problemas de intercambiabilidad entre estos dos gases.

El concepto de intercambiabilidad tiene que ver con lo siguiente: dos gases de una misma familia (gas natural en el caso que nos ocupa) son intercambiables en un parque de aparatos instalados, cuando al sustituir uno por otro, los equipos continúan operando óptimamente, con seguridad para los usuarios y emisiones contaminantes dentro de los límites establecidos, sin necesidad de realizar ningún ajuste.

En este artículo a partir del análisis comparativo de la composición química y propiedades de combustión de los gases naturales colombianos, y la revisión de los principales trabajos realizados por investigadores y fabricantes de turbinas a gas (TG) acerca del tema, se examinan los potenciales problemas de intercambiabilidad entre estos gases naturales, cuando en las centrales térmicas localizadas en el interior del país, se sustituya el gas natural de Guajira por Cusiana tratado.

2. Fenómenos que pueden ocurrir por el cambio en la composición química del gas natural

Al variarse la composición química del gas natural se afectan las propiedades de combustión, los que a su vez inciden en la modificación de ciertos fenómenos de combustión, que varían el comportamiento de una TG, pudiéndose llegar a condiciones críticas de operación que afectan la vida útil de la maquina, la confiabilidad, la eficiencia

y las emisiones contaminantes (AGA 2004).

2.1. Fenómenos presentados en el sistema de suministro de gas a la cámara de combustión

Las condiciones de suministro a tener en cuenta en el momento de evaluar la intercambiabilidad de los combustibles gaseosos, son la condensación de hidrocarburos (HC) y de agua, pues asegurando que no hay presencia de agua líquida, también se asegura que no habrá formación de hidratos.

2.1.1. Condensación de HC

Este factor es considerado por algunos expertos (Wilkes y Dean, 1997) como el fenómeno más delicado a tener en cuenta y de más efecto cuando la CQ del GN es cambiada, pues la presencia de HC líquidos genera un cambio drástico en el poder calorífico del combustible y en la temperatura de autoignición. Lo primero genera puntos calientes en la llama lo que es de gran peligro para los metales en contacto con los gases calientes tales como los que componen la cámara de combustión y el expansor. Y lo segundo puede ser aun más grave, pues si la temperatura del aire de descarga del compresor es mayor que la temperatura de autoignición de los hidrocarburos pesados se generará la combustión y causará inestabilidad de llama, daño de las instalaciones de premezcla, y/o retollama en el caso de los quemadores de premezcla pobre (PMP). Como efecto adicional e inherente hay que mencionar la abrasión que los líquidos generan en las instalaciones de suministro, principalmente en los puertos de descarga (Wilkes y Dean, 1997).

El punto de condensación de HC (PCH) es muy sensible a HC pesados (C₆+), para tener control sobre este fenómeno no deseado, se aconseja precalentar el combustible a 28°C por encima del punto de condensación de HC (PCH) en el estado más crítico de transporte, o tener separadores de líquidos (purgas) inmediatamente aguas abajo de los lugares en donde se le tumba la presión al fluido y luego un sobrecalentador controlado por un medidor de condensado (Davi, 1998).

En la Figura 1. se presenta la caracterización de la energía por calentamiento necesaria para eliminar los condensados de un gas, en función de la concentración de HC condensados, contrastada con la curva en que dicha energía es igual a la energía química que los condensados podrían aportar a la combustión, como una ayuda a tomar la decisión de mayor eficiencia: precalentar o separar.

Para efectos de conocer el PCH es recomendable medirlo más que calcularlo, y en caso de proceder de la segunda forma, se debe conocer la composición completa y precisa del GN en cuestión, por medio de un análisis cromatográfico detallado (costoso) que nos permita saber

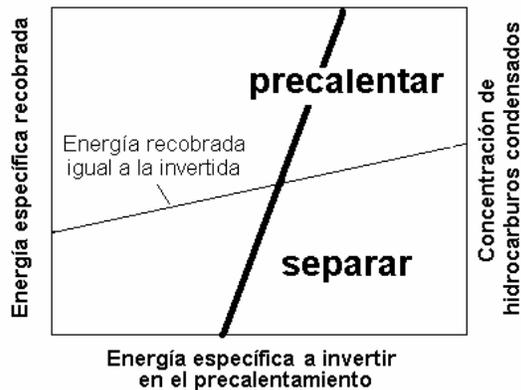


Figura 1. Balance económico de energía para evitar condensados (Wikes y Dean, 1997).

la cantidad de presencia de HC tan pesados como el C14.

General Electric determina que el sobrecalentamiento necesario depende directamente del cuadrado de la presión de suministro, de este modo (G. ELECTRIC, 1999):

$$\Delta T = 2.26 \times 10^{-1} P^2 - 2.72 \times 10^{-2} P - 17.8 \quad (1)$$

Donde:

ΔT = Sobrecalentamiento por encima del PCH necesario para evitar HC condensados ($^{\circ}\text{C}$ o K).

P= Presión del gas (bar).

2.1.2. Condensación de Agua

El punto de condensación de agua (PCA) depende directamente del contenido de agua en el GN, y es de gran peligro pues de presentarse agua líquida en el gas la corrosión no espera en atacar los metales de los que se componen las líneas de transporte. Hay que tener en cuenta también que en caso de retirar componentes del GN la proporción de agua aumenta al igual que su punto de rocío. Como en el caso de los HC, también se aconseja mantener al GN cierto intervalo de temperatura por encima del PCA, con el fin de asegurar la homogeneidad de la mezcla en su fase gaseosa ante cambios súbitos de presión.

Sin embargo, en algunas regiones donde los gases tienen alto contenido de agua se deberá revisar exhaustivamente todo punto en donde se tumbe presión pues por efecto Jule Thomson la temperatura caerá también y será una zona propensa a la corrosión.

El sobrecalentamiento necesario depende directamente del cuadrado de la presión, de este modo (G. ELECTRIC 1999):

$$\Delta T = 4.15 \times 10^{-1} P - 21.7 \quad (2)$$

Donde:

ΔT = Sobrecalentamiento por encima del PCA necesario

para evitar condensados de agua ($^{\circ}\text{C}$).

P= Presión del gas (bar).

2.1.3. Formación de Hidratos

La formación de hidratos es un fenómeno catastrófico en toda línea de suministro de combustible, pues el efecto se representa como taponamiento de la línea. La formación de hidratos se genera cuando se tiene el gas cierta cantidad de tiempo por debajo de la temperatura de formación de hidratos (que depende, en el caso del GN, de la presencia de metano a butano, CO_2 y agua) y del PCA. De este modo si se evita juiciosamente la condensación de agua, intrínsecamente se evitará también la formación de hidratos, pues comúnmente estos cristales se forman en temperaturas por debajo de los 0°C (G. ELECTRIC, 1999).

2.2. Fenómenos de combustión

2.2.1. Emisiones

Las emisiones de más importancia que se presentan en la operación de las TG son el CO y los óxidos de nitrógeno (NO y NO_2) de los cuales sobresale el NO. Los inquemados, óxidos de azufre y partículas, no son propios de un gas tan limpio como el GN (Lefebvre, 1998).

El CO es altamente tóxico y reduce la eficiencia de la combustión. Los NO_x , producen smog fotoquímico y propician la formación de lluvia ácida y ozono, compuesto que en la estratosfera es de gran daño (Lefebvre 1998).

Particularmente, el CO y los NO_x tienen un comportamiento contrario ante las condiciones de proceso. El CO logra su conversión a CO_2 a altas temperaturas de llama y a muy baja velocidad (alto tiempo de residencia a dicha temperatura) ayudado por los gases calientes de recirculación antes del ingreso del aire secundario, o por el aumento de la temperatura de suministro de la mezcla.

Cabe decir que al aumentar la presión de premezcla, la máxima temperatura de llama, o sea las mínimas emisiones de CO (máximas de NO_x) ocurren a relaciones combustible aire cada vez menores a la estequiométrica. En la Figura 4 se presenta el comportamiento descrito cuando la relación combustible aire varía (Samuelson et al., 2003).

La temperatura tiene un gran efecto sobre la formación de NO_x , sin embargo su efecto se hace despreciable para mezclas muy pobres ($F < 0.6$). Un aumento en esta temperatura por encima de 1900°K incrementa la producción de NO_x exponencialmente; efecto que es aún más drástico en combustibles gaseosos por su homogeneidad al mezclar (Lefebvre 1998).

Una solución a la emisión de NO_x es disminuir el tiempo de residencia, pero éste no tendrá ningún efecto para mezclas muy pobres ($\ddot{O} < 0.5$), es así como los quemadores de premezcla pobre se convirtieron en la mejor opción de control de NO_x , sin afectar apreciablemente el CO

(por propiciar un tiempo de residencia moderado para su combustión), sistema empleado con mayor frecuencia que utiliza varios quemadores de premezcla pobre (ver Figura 3) con el fin de controlar así las emisiones contaminantes sin la necesidad de inyectar agua, por lo que se denominan quemadores secos o “dry low NOx” (DLN), además cuentan con un inyector difusivo secundario para realizar el arranque y trabajar a carga parcial (Lefebvre, 1998).

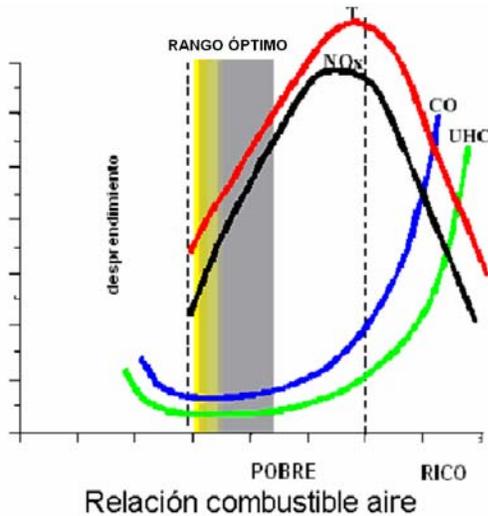


Figura 2. Efecto del dosado en la temperatura de llama y emisiones. (Samuelsen et al., 2003)

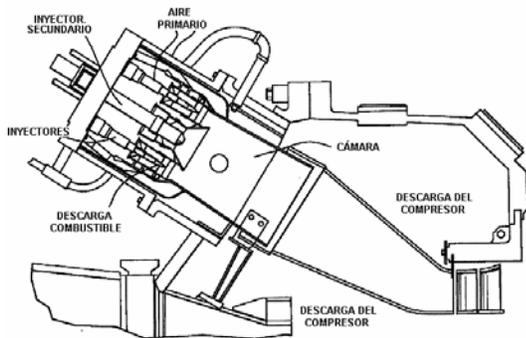


Figura 3 Esquema de una cámara de combustión Westinghouse tipo DLN. (Gadde 2003).

El cambio de CQ se manifiesta a partir de su efecto sobre la temperatura de combustión, la cual disminuye con la presencia de especies no combustible disminuyendo los NOx y aumentando el CO. El efecto de los HC pesados tiende a aumentar estas emisiones. El NOx se ve incrementado por vía oxidación, explicado por el incremento de especies intermedias de los mecanismos cinéticos de reacción que interactúan entre sí. Tal comportamiento se evidencia en los

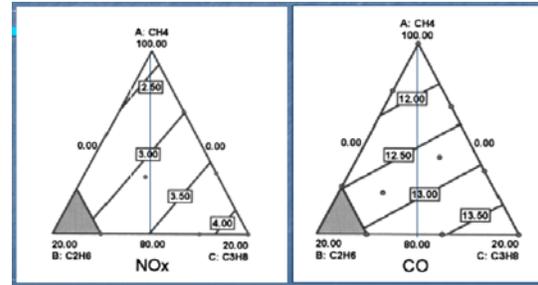


Figura 4. Resultados de simulación variando metano (80-100%), etano y propano (Flores et al., 2003)

resultados que presenta Flores et al. (2003) en función de la disminución del metano hasta el 80% por adición de etano y propano, en la Figura 4.

2.2.2. Autoignición

Consiste en el auto encendido y sostenimiento de la combustión sin una fuente de ignición. Si esto llega a suceder en la zona de premezcla se asegura la falla térmica del quemador y de no ser así, inestabilidad y aumento de emisión de NOx (Lefebvre, 1998).

El parámetro a tener en cuenta es el tiempo de autoignición, el cual se define como el retardo al encendido desde que se inicia el mezclado hasta que se alcanza cierto nivel de temperatura. Si el tiempo de residencia de la mezcla en la zona de premezcla es menor al tiempo de autoignición, se asegura un buen funcionamiento libre de excesos de temperatura en la zona de premezcla (Flores et al., 2001). También es un parámetro que influye determinadamente en la estabilidad dinámica de la combustión, pues está relacionado con el período de oscilación de la cantidad de calor liberado (Richard et al., 2001).

El tiempo de autoignición consta de un proceso físico y uno químico. El proceso físico, en el caso de los combustibles gaseosos, se constituye por fenómenos como calentamiento, difusión y mezclado, mientras el químico, en la cinética de las reacciones precedentes a la formación de la llama.

En quemadores de mezcla pobre, el principal objetivo es el de adquirir un mezclado homogéneo, llevando al mínimo el tiempo del proceso físico. De esta forma el tiempo de autoignición estará demarcado casi en su totalidad por la cinética de la reacción, quedando entonces dependiente de la temperatura de la mezcla, la presión, la composición química del combustible, y muy levemente de la relación combustible aire (Samuelsen et al., 2003).

Su dependencia es regida fundamentalmente por la temperatura de premezcla teniendo un efecto sobre el tiempo de autoignición entre un orden de 10 y 100 veces.

En cuanto al efecto de la composición química del combustible gaseoso, se puede relacionar entonces con la cinética de reacción del combustible, por la rapidez de

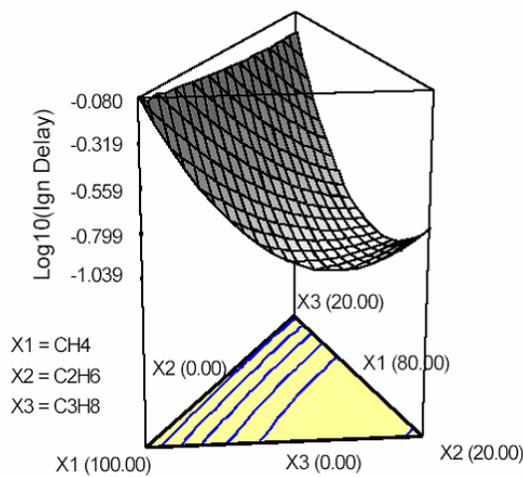


Figura 5. Tiempo de autoignición (time delay) en función de la composición química del combustible gaseoso (desde la mezcla hasta incrementar 100K a presión atmosférica y a un dosado de 0.6) (Samuelsen et al. 2003)

homogenización del mezclado de gases. Siendo la velocidad de reacción mayor, a medida que aumenta la relación entre átomos de carbono y átomos de hidrógeno en combustibles HC; y aún más grande con la adición de hidrógeno molecular en el combustible (Richard et al., 2001).

Varias investigaciones han coincidido en obtener que hay una gran dependencia entre la autoignición y la variación del contenido de etano mezclado en gas natural, cuando éste se presenta entre 0 y 15% vol. (Samuelsen et al. 2003), observándose en la Figura 5, que el menor tiempo de autoignición se presenta con la adición de 15% etano. Aunque surja también controversia cuando se analiza la presencia de propano, que también tiene un efecto drástico sobre la velocidad de reacción. Pues una mezcla 85% metano 15% etano tiene mayor velocidad de reacción que el propano puro, explicado por interacción entre especies intermedias del mecanismo cinético de reacción de ambos combustibles (Samuelsen et al. 2003).

2.2.3. Estabilidad de la Combustión

Al referirnos a un buen desempeño en la estabilidad significa que la cámara de combustión es capaz de quemar correctamente un combustible sobre un amplio rango de presión, velocidad, y relación combustible aire (Khanna 2001).

Si por cualquier razón el proceso de liberación de calor en la combustión es fluctuante, el resultado es la formación de ondas de presión acústicas emanadas desde la zona de combustión que se mueven a la misma frecuencia que las fluctuaciones de calor liberado. Ello, en una de una cámara de combustión lineal, causa que aquellas ondas de presión generadas retornen a la zona de combustión con un retraso

de tiempo que depende de la frecuencia natural del sistema, que puede ser expresada en función de la forma de la cámara (longitud, diámetro), y también de la velocidad del sonido promedio en ésta (Barrère y Williams, 1969).

Cuando el pico instantáneo de calor liberado en la zona de combustión entra en fase con el pico instantáneo de la presión acústica, se adiciona energía a las ondas de presión (a cualquier frecuencia), lo que genera energía adicional al sistema con cada ciclo; el resultado es oscilaciones que crecen en su amplitud a un punto tal que conlleve a producción de ruido y vibraciones en la turbina, o sea, daño inminente de instalaciones, o en el mejor de los casos, apagado de la llama (Lefebvre, 1998).

El cambio de composición química afectará entonces el período de fluctuación de la onda de entrega de calor y por ende el desfase entre ondas, determinado por el parámetro que se define a continuación, el tiempo de combustión.

2.2.3.1 Efectos del tiempo de combustión sobre las inestabilidades

El tiempo transcurrido desde la inyección de combustible hasta que se libera el máximo calor representa el tiempo de combustión, el cual es una sumatoria de varios tiempos dependientes de diferentes procesos, así: el “tiempo de advección” es el tiempo que necesita la mezcla para atravesar una barrera por compresión acústica existente en la descarga del inyector; el “tiempo de mezcla” es el tiempo que demora en mezclarse los reactantes entrantes y los productos calientes residentes del ciclo anterior, y el “tiempo de reacción química” es el tiempo que transcurre desde la formación de las primeras especies intermedias y la formación de la llama, o el alcance de determinada temperatura. En la siguiente ecuación 3 se observa matemáticamente lo expresado arriba:

$$T_{\text{combustion}} = T_{\text{advección}} + T_{\text{mezcla}} + T_{\text{reacción}} \quad (3)$$

Cabe aclarar que no es posible precisar cuando empieza y termina cada tiempo, simplemente se trata de una herramienta comparativa que determina la fase entre ondas de entrega de calor y ondas de presión.

Adicionalmente si la frecuencia de la onda resultante de las ondas de entrega de calor y presión acústica es semejante a la frecuencia natural de la cámara de combustión, entonces muy seguramente se producirán vibraciones excesivas en el sistema causando diversos problemas en los dispositivos mecánicos de la TG (Janus et al. 1997).

Este tiempo de combustión varía directamente con el cambio de CQ del combustible afectando la estabilidad del sistema, debido a su relación con:

o Cambio de velocidad de reacción que modifica el tiempo de reacción, el cual es proporcional a la cantidad

y peso de los HC.

oCambio de densidad y difusividad, que afecta el tiempo de advección y mezclado (Khanna, 2001).

2.2.3.2. Efecto de la distribución espacial del combustible sobre las inestabilidades

Las imperfecciones en la distribución de flujo de aire y el combustible, causadas por un cambio en el índice de Wobbe que afecta inversamente la penetración o por presencia de especies no combustibles que atrofiarán el mezclado, pueden dirigirse a la formación de regiones locales en las cuales la relación combustible aire es apreciablemente más baja que el valor promedio, lo que puede causar extinción de llama en aquellas regiones. Sin embargo el quemador sigue funcionando por que en otra parte de la zona primaria la relación combustible/aire es buena, y gracias a la recirculación, estos vacíos de combustible son atenuados permitiendo a la región entrar de nuevo dentro de los límites de inflamabilidad adecuados para que ocurra la reignición. Por lo anterior, las condiciones para la extinción de llama local es restaurada y un ciclo de extinción e ignición se lleva a cabo, lo que permite que se den pulsos de presión generados por esta secuencia de eventos que se pueden acoplar con el campo de acústica de la cámara de combustión y entonces las oscilaciones son forzadas y sostenidas (Lefebvre, 1998; Kahna, 2001).

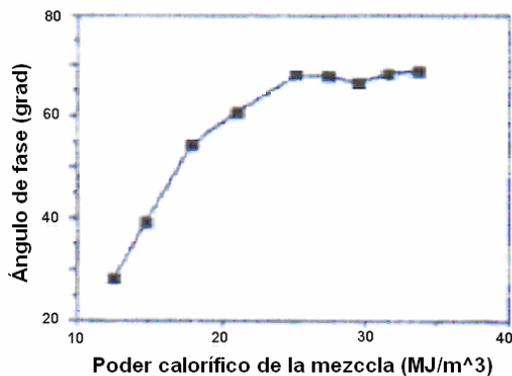


Figura 6. Ángulo de fase entre ondas de calor y presión (Kushari et al., 1965)

En la Figura 6 se observa la disminución del ángulo de fase o aumento de inestabilidad a medida que el contenido de especies no combustibles aumenta, curva del metano a medida que su PC disminuye por adición de CO₂ y He (Lefebvre, 1998; Kahna, 2001)

3. Especificaciones para el GN exigidas por los fabricantes de TG

Para los constructores de TG es muy importante

investigar el grado de flexibilidad y permisividad de sus diseños, para así generar especificaciones y recomendaciones ante el cambio de composición química del combustible gaseoso, las cuales demarcan la calidad del gas requerido para su correcto funcionamiento y bajas emisiones, entre las cuales se restringe un máximo contenido de etano, propano e HC pesados, una máxima variación del índice de Wobbe, mínima razón entre el límite superior e inferior de inflamabilidad, y máximos niveles de impurezas por unidad de energía. En el caso de General Electric (GE) y Westinghouse (WH), sus especificaciones son más rigurosas en cuanto más compleja es su tecnología, es decir en los quemadores tipo DLN. Por el contrario, la Solar Turbines inc. (Solar T) ha dedicado gran trabajo en el desarrollo de TG para gases de mediano contenido calorífico (mediano BTU) (Meier et al., 1986).

Poder calorífico (PC): A medida que el PC disminuye, para mantener la potencia constante, se requiere aumentar el gasto de combustible, sin embargo esto perjudica al sistema debido al aumento de caída de presión en la descarga, obligando a intervenciones recomendadas en la Tabla 1. Westinghouse requiere que el PC esté por encima de 28.7 MJ/m³(Standard) para los sistemas DLN (Pillsbury y Hilburn, 1997;Pillsbury, 1998).

Tabla 1. Intervenciones recomendadas por Solar Turbines inc. con respecto a la disminución del poder calorífico inferior volumétrico (Meier et al., 1986)

Rango de PCI MJ/m ³ (normal)		Recomendación
Mín	Máx	
24	34	Modificaciones de inyección
14	24	Modificaciones de inyector y quemador
7	14	Límite de operación de la TG
	7	Rediseño del sistema de combustión

RLI: Propiedad denominada también como inflamabilidad (ver Tabla 2), determina la estabilidad de la llama en condiciones de arranque y carga parcial. No se acostumbra especificar el máximo, pero sí otro máximo relacionado que es la adición o contenido de Hidrógeno.

Tabla 2. Mínima RLI permisible (Pillsbury, 1998; GE, 2001; Meier et al., 1986)

FIRMA	Min. RLI
WH	2
GE	2.2
Solar T	2.8

Variación permisible del índice de Wobbe: En la Tabla 3 se especifican las variaciones permisibles del índice de Wobbe por algunos fabricantes de TG para garantizar la estabilidad de la combustión.

Especificaciones de HC permitidos por los constructores (Tabla 4): Dado el sistema de control seco de emisiones (DLN) la presencia de HC pesados propicia la formación de NO_x vía oxidación debido a la interacción entre especies intermedias de sus mecanismos de reacción, y altera las condiciones de estabilidad.

Tabla 3. Variación permisible (%) de índice de Wobbe (Pillsbury, 1998; GE, 2001)

	Encendido	Plena carga
WH	2%	15%
GE	5%	No Especifica (NE)

Tabla 4. Especificaciones de HC permitidos por los constructores (Pillsbury, 1998; GE, 2001)

	M _x CH ₄	M _x C ₂ H ₆	M _x C ₃ H ₁₀	M _x C ₄ +
WH	NE	5	1.5	0.2
GE	85	15	15	6

4. Aproximación al caso Colombiano

4.1 Análisis comparativo de la composición química de los gases naturales de Guajira y Cusiana

Los yacimientos de Guajira y Cusiana, representan las principales reservas nacionales de gas natural. La explotación comercial del gas natural de Guajira se inició en la década de los setenta en la Costa Caribe, en la década de los noventa con la construcción del gasoducto Ballena-Barranca se hizo posible su utilización en el interior del país. El yacimiento de Cusiana es asociado, por lo que en los primeros años de operación el gas ha sido reinyectado para regular la presión y facilitar la extracción del crudo, con el agotamiento de las reservas de petróleo, su explotación comercial se soportará en la comercialización del gas natural, para lo cual se proyecta una producción de 180 MPCD, para distribuir inicialmente en el interior del país en los mercados residencial, comercial, industrial, transporte vehicular y generación de electricidad.

El gas natural de Cusiana posee un alto contenido de CO₂, por lo que para cumplir con las reglamentaciones de calidad de gas, es necesaria la instalación de una planta de procesamiento para reducir el contenido de este gas al 2%, para la cual se proyectó su entrada en operación en el año 2004. En la Tabla 5 se presenta la composición química del

Tabla 5. Composiciones y propiedades de los gases naturales Guajira y Cusiana

COMPUESTO	COMPOSICIONES (%mol)			
	guajira	cusiana sin to	cusiana 2006	cusiana 2013
CH ₄	97.76	75.68	81.9	82.19
C ₂ H ₆	0.38	11.15	10.5	10.43
C ₃ H ₈	0.2	4.7	3.7	3.59
iC ₄ H ₁₀	0	0	0.5	0.48
nC ₄ H ₁₀	0	2.36	0.55	0.54
iC ₅ H ₁₂	0	0	0.11	0.07
nC ₅ H ₁₂		0	0.07	0.05
C ₆ H ₁₄		0	0.03	0.02
N ₂	1.29	0.91	0.64	0.65
CO ₂	0.37	5.2	2	1.97
PROPIEDAD				
PCs(MJ/m ³)	37.38	43.34	43.03	42.84
Densidad relativa	0.5675	0.744	0.6839	0.6803
I. Wobbe(MJ/m ³)	49.61	50.25	52.03	51.94

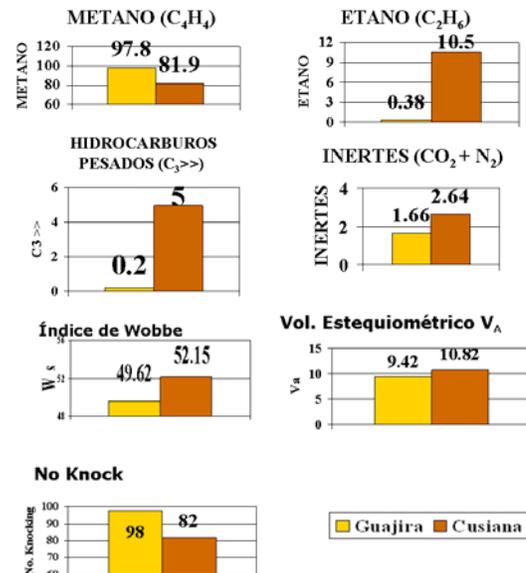


Figura 7. Comparación de las principales propiedades de los gases de Guajira y Cusiana 2%CO₂

gas natural de Guajira, de Cusiana 5% CO₂ y 2% de CO₂ (tratado), como puede observarse estos gases presentan importantes diferencias en composición química, siendo más drástico cuando se realiza la comparación con Cusiana 2% CO₂.

En la Figura 7, se precisan las principales diferencias, las cuales pueden incidir en la intercambiabilidad de estos gases en turbinas a gas, al respecto las siguientes aclaraciones son necesarias.

El índice de Wobbe se define como la relación entre el poder calorífico del gas y la raíz cuadrada de su densidad relativa (PCS/d^{1/2}), es un parámetro determinante en los estudios de intercambiabilidad. La variación porcentual del

índice de Wobbe entre Guajira y Cusiana con 2% CO₂ es del 5% aproximadamente.

El numero de knock es una medida de la resistencia de una mezcla gas y aire a la ocurrencia del fenómeno de autoignición, a menor valor mayor probabilidad de autoignición. De acuerdo a este parámetro Cusiana presenta una situación crítica, ello como consecuencia del mayor contenido de hidrocarburos pesados (HCP)

El volumen estequiométrico de aire, es la cantidad de aire necesario para quemar estequiométricamente un metro cúbico de gas, este parámetro incide en la relación aire/combustible y por tanto en la ocurrencia de determinado fenómeno en un sistema de combustión. Como puede observarse Cusiana presenta un valor mayor.

La relación entre el límite superior de inflamabilidad y el inferior (RLI). Estos límites están definidos como la proporción de gas en porcentaje en la mezcla aire y gas, para la cual ésta es explosiva. La RLI es un criterio que sirve para evaluar el comportamiento de la llama a carga parcial o al encendido en una TG, un alto valor podría causar autoignición en la zona de premezcla y lo contrario apagado de llama (Meier et al. 1986). Con respecto a este parámetro los gases de Guajira y Cusiana no presentan condiciones críticas, si se tienen en cuenta las especificaciones de los fabricantes de TG.

Tabla 6. Variación porcentual con respecto a Guajira del índice de Wobbe

Variación de Wo con respecto a Guajira	cusiana sin tto	cusiana 2006	cusiana 2013
	1.29%	4.88%	4.70%

4.2 Revisión de la composición química y propiedades de los GN colombianos con respecto a las especificaciones de los fabricantes de TG

En relación con las especificaciones de CQ y algunas propiedades exigidas por los fabricantes de tecnologías instaladas en Colombia (GeneralElectric y Westinghouse), ver Tabla 3 y 4, se encontró que:

- El cambio porcentual de Wo de Cusiana con respecto a Guajira mostrado en la Tabla 6, no cumple con las especificaciones en condiciones de arranque.
- El contenido de Metano de Cusiana se encuentra por debajo del mínimo exigido.
- El contenido de Etano, Propano y C4+ (HCP) de Cusiana supera el límite máximo especificado.

5. Conclusiones

- Los principales problemas de intercambiabilidad entre los gases naturales son los siguientes:
- El alto contenido de HCP incide en la formación de líquidos

en la inyección del combustible lo cual puede ocurrir cuando se operen las CTG con el GN de Cusiana.

- El alto contenido de HCP propicia la generación de Monóxido de Carbono y Óxidos de Nitrógeno.

- Los resultados de las variaciones de CQ y sus respectivos efectos sobre el índice de Wobbe, el volumen estequiométrico de aire y la velocidad de deflagración, puede incidir en la ocurrencia de los siguientes fenómenos:

* Flameout (Extinción de llama)

* Desprendimiento de llama

* Pulsaciones en la combustión, que pueden conducir a un alto nivel de ruido, vibraciones, flameout y emisiones contaminantes.

- El gas natural de Guajira y de Cusiana tratado al 2%CO₂ tienen diferencias importantes en composición química y en consecuencia en propiedades de combustión, lo cual hace que la sustitución entre ellos pueda presentar problemas de intercambiabilidad.

- La composición de Cusiana tratado no cumple con algunas especificaciones realizadas por los fabricantes de las tecnologías instaladas en Colombia.

Agradecimientos

Los autores de este trabajo presentan su más sinceros agradecimientos a la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Antioquia por su cooperación financiera para la realización de este proyecto, como también al Centro de Investigaciones Ambientales de la Facultad de Ingeniería por la ayuda logística y administrativa.

Bibliografía

AGA: NGC and Interchangeability Task Group, "White Paper on Natural Gas Interchangeability" Sept, 2004.

BARRÈRE M, and WILLIAMS F.A, "Comparison of combustion instabilities found in various types of combustion chambers", Twelfth symposium (international) on combustion, The combustion institute, 1969, pp. 169-181.

DAVI, M.A., "GE Gas Turbine combustion Flexibility", 39th GE Turbine State of the Art Technology Seminar, GER-3946, August 1998.

FLORES, R. M., McDOWELL, V. G, and SAMUELSEN, G. S., "Impact of Ethane and Propane Variation in Natural gas on the Performance of Model Gas Turbine Combustor", ASME J. Eng. Gas Turbines Power, Jul. 2003, Vol. 125, pp. 701-708.

FLORES, R. M., MIYASATO, M. M., MCDOWELL, V. G, and SAMUELSEN, J. S., "Response of Model Gas Turbine Combustor to Variation in Gaseous Fuel Combustion," ASME J. Eng. Gas Turbines Power, February 2001, Vol. 123,

pp. 824-831.

GADDE, S. and RYAN., W. Fuel injection system for a turbine engine, USA Patent 20050034457, Serial No.: 644564, Filed: August 15, 2003.

GENERAL ELECTRIC POWER SYSTEMS, GAS TURBINE, "Specifications for Fuel Gases for Combustion in Heavy-Duty Gas Turbines", 1999, GEI 41040G.

JANUS M. C., RICHARDS G. A., and YIP M. J., "Effects of ambient conditions and fuel composition on combustion stability", The International GT and Aeroengine Congress, Florida, USA, ASME, 1997.

KHANNA V., "A Study of the Dynamics of Laminar and Turbulent Fully and Partially Premixed Flames", thesis of degree of Doctor of Philosophy in Mechanical Engineering, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, 2001.

KUSHARIA., ROSEN L.J., JAGOLA J.I. and ZINN B.T., "The effect of heat content and composition of fuel on pulse combustor performance", Twenty six symposium (international) on combustion, The combustion institute, Pittsburg, PA, 1965, pp. 1151-66.

LEFEBVRE, A. H. Gas Turbine Combustion, 2nd Ed.: Taylor and Francis, Philadelphia, c1998.

MEJÍA C. L., "Memorias al congreso de la república 2003-2004", Ministerio de minas y energía, Colombia.

MEIER, J. G., HUNG, W. S. Y., and SOOD, V. M., 1986, "Development and Application of industrial Gas Turbines for Medium-Btu Gaseous Fuels," ASME J. Eng. Gas Turbine Power, 108, pp. 182-190.

PILLSBURY P. W. and HILBURN M. N., "The impact of variations in gas quality on electric power generating equipment" IGT international Conference on Natural Gas Quality and Energy Measurement, Hyatt Orlando, Kissimmee, Florida, Feb. 1997.

PILLSBURY P. W., "The impact of gas quality on design considerations for electric power generating equipment" IGT international Conference on Natural Gas Quality and Energy Measurement, St. Petersburg, Feb 1998.

RICHARD, G. A., MCMILLAN, M. M., GEMMEN, R. S., ROGERS, W. A., and CULLY, S. R., "Issues for low emissions fuel-flexible power systems". Progress in Energy and Combustion Science, 27(2):141-169, 2001.

SAMUELSEN S., MCDOWELL V., CHEN J., and JERMAKIAN V., "correlation of ignition delay with fuel com-

position and state for application to gas turbine combustion", University of California Irvine, Contract No. 00-01-SR084CS, final report, UCI-ARTR-00-5(e), 2003.

UPME, Plan Energético Nacional 2003-2020, consultada en Agos. 2005, www.upme.gov.co.

WILKES C. and DEANA J., "Gas fuel conditioning system design considerations for utility gas turbines", ASME paper 97-GT-277, 1997.