

# **Incidencia de la humedad del aire sobre las emisiones de monóxido de carbono en un quemador atmosférico de gas**

*Elías Gómez M., Doris Llanos B., Eliana Cataño Z., John Múnera A \**

## **Resumen**

Se realizó un estudio para determinar la variación de las emisiones de monóxido de carbono (CO) cuando se modifica la humedad del aire de premezcla en un quemador atmosférico trabajando con gas licuado del petróleo (G.L.P.) y gas natural (G.N.). Para el caso del G.L.P., al modificar la humedad absoluta del aire primario desde 0,01223 hasta 0,03493 kg agua/kg aire seco, se halló que el nivel de emisiones de CO varió de 0,1819 a 0,2540% en volumen, representando incremento del 38%. Con el gas natural se varió la humedad entre 0,01397 y 0,03228 kg agua/kg aire seco, obteniéndose emisiones de CO entre 0,0942 y 0,1020% en volumen que corresponde a un incremento del 8,5%. El estudio demostró que es mucho más pronunciado el efecto de la humedad del aire cuando la combustión se realiza con G.L.P. pues se llegan a sobrepasar los niveles máximos permisibles de monóxido de carbono.

----- *Palabras clave:* combustión, monóxido de carbono, gas natural, gas licuado del petróleo, quemador de gas, humedad del aire.

## **Abstract**

A study to determine the variation of the carbon monoxide emission was carried out when the humidity of the premix air was modified in an atmospheric burner working with Petroleum Liquid gas and Natural gas. When the total humidity from the primary air was modified from 0,01223 to 0,03493 water kg/dry air kg in the case of PLG, it was found that the level of CO emissions varied in volume from 0,1819 % to 0,2540 %, representing an increase of 38 %. With Natural gas the humidity was modified from 0,01397 to 0,03228 water kg/dry air kg, obtaining emissions of CO in volume from 0,0942 % to 0,1020 %, for a total increase of 8,5 %. The study showed that the effect on the air humidity was more pronounced when the combustion with PLG was made, overpassing the maximum levels allowed of carbon monoxide.

----- *Key words:* combustion, carbon monoxide, natural gas, petroleum liquefied gas, gas burner, air humidity.

---

\* Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia.

- Ante un factor de utilización del 50%, el enfriamiento evaporativo y por compresión de vapor son viables financieramente en plantas en ciclo simple; en ciclo combinado las tres presentan indicadores financieros que las hacen viable. Ello se explica porque ahora el cargo por capacidad se constituye en un ingreso para la planta lo cual no sucede cuando se tiene un factor de utilización elevado.
- La aplicación de tecnologías de enfriamiento en Colombia plantea el dilema entre el incremento de potencia del parque térmico y la mayor rentabilidad financiera. En un mercado en competencia como el colombiano, los agentes privados probablemente se inclinen por los indicadores financieros; pero en el contexto de la política energética nacional y planeamiento, la confiabilidad, flexibilidad y eficiencia son factores determinantes al momento de enviar señales relacionadas con la introducción de determinadas tecnologías de enfriamiento.

## 5. Referencias

1. UPME-ISA. *Plan de Expansión de Referencia: Generación-Transmisión 1996-2010*. Revisión 1996.
2. Plancherel, Alain. *La Central de Ciclo Combinado se ha Establecido como el Sistema de Producción de Energía del Futuro*. Revista ABB 8 / 93, pp. 1-12.
3. Horlock, J. H.. *Combined Power Plants - Past, Present and Future*. Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Gas Turbine and Power, Vol. 117, Oct. 1995. pp. 610-616.
4. G. T. Program. *Wind. Software for Gas Turbine Power and Cogeneration System Design*, Versión 1.5. 1999. Desarrollado por ThermoFlow Inc.
5. Ushiyama, I. *Theoretically Estimating the Performance of Gas Turbine Under Varying Atmospheric Conditions*. Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Gas Turbine and Power, Jan. 1976, pp. 303-309.
6. AMELL, Andrés. *Comportamiento Termodinámico de Plantas de Ciclo Combinado en el Piso Térmico Colombiano*. Revista Energética, No. 17, nov. de 1996. pp. 85-97.
7. EPM. *Registro Meteorológico de la Estación en la Sierra*, 1996-1998.
8. Corredor, Lesme, comunicación personal. Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad del Norte.
9. ISA. *Informe Anual de Operaciones 1997*.
10. Kolp, D.A., et al. *Advantage of Air Condition and Supercharging and LM6000 Gas Turbine Inlet*. Transaction of the ASME: Journal of Engineering for Gas Turbine and Power, Vol. 117, July 1995, pp. 513-527.
11. De Lucia, M, et al. *Benefits of Compressor Inlet Air Cooling for Gas Turbine Cogeneration Plant*. Transaction of the ASME: Journal of Engineering for Gas Turbine and Power. Vol. 118, July 1996, pp. 598-603.
12. Kohlenberger, P.E. *A review of inlet air cooling systems for increasing gas turbine performance*. Power - Gen 94. America. VC3 - 5, Book IV, December 7 - 9/94. Orlando. pp. 277-297.
13. Al, Jerry, et al. *A qualitative analysis of inlet air cooling alternative for combustion turbine capacity enhancement*. Burns & McDonnell Engineering Company. APCPAPRI 94. pp. 1-5.
14. Torres, F. et al. *Incremento de la potencia de turbinas de gas*. Revista Ingeniería Química Española. Septiembre 1993. pp. 303-310.
15. Ondryas, Igor. *Go beyond evaporative coolers to stretch gas — turbine output*. Power, July 1991. pp. 2-29.
16. Giourof, Alexandra. *Gas — turbine inlet - air cooling: You can almost pick your payback*. Power, May 1995. pp. 56-58.
17. Johnson, R. S. *The Theory and Operation of Evaporative Coolers for Industrial Gas Turbine Installations*. Transactions of the ASME: Journal of Engineering for Gas Turbine and Power. Vol. 111, April 1989, pp. 327-334.
18. Ebeling, Jerry, et al. *Thermal energy storage and inlet air cooling for combined cycle*. Presented at the International Turbine and Aeroengine Congress and Exposition. The Hague, Netherlands. June 13-16, 1994. ASME 94 — GT - 310. pp. 1-7.
19. Mackie, E.I. *Inlet Air Cooling for a Combustion Turbine Using Thermal Storage*. ASHRAE Transactions: Symposia. Vol. 100 No. 1, 1994. pp. 572-582.

## Introducción

Gran parte de la demanda de energía térmica se satisface a partir de la combustión de combustibles fósiles. Dependiendo de las condiciones a las cuales se realiza la combustión y de la naturaleza del combustible, pueden presentarse emisiones de contaminantes como monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NOx), óxidos de azufre (SOx), compuestos orgánicos volátiles (VOC), hollín, etc. [1].

Aunque en general la combustión de gas natural (G.N.) y gas licuado del petróleo (G.L.P.) es menos contaminante que la de carbón y derivados del petróleo, puede darse alta emisión de contaminantes, principalmente de CO, que además de disminuir la eficiencia del proceso, comprometen la seguridad de los usuarios. Las emisiones del CO son altamente peligrosas para la salud porque éste establece un fuerte enlace con el átomo de hierro de la hemoglobina y forma carboxihemoglobina, la cual reduce la capacidad de la sangre para transportar oxígeno y altera la disociación de la oxihemoglobina, disminuyendo más el suministro de oxígeno a los tejidos [3].

Son varios los factores que inciden en la formación de CO en sistemas atmosféricos de combustión de gas; uno de ellos, de acuerdo con estudios previos (Relwami y Moschandreas, 1986), es el contenido de humedad en el aire de combustión suministrado al equipo [4].

En el presente estudio se varió la humedad del aire de premezcla mediante un sistema de deshumidificación y otro de humidificación. Se realizaron ensayos tanto para gas natural como para gas licuado del petróleo.

## Parte experimental

Se dispuso de gas natural (98%V metano, 2%V etano) y gas licuado del petróleo (65%V propano, 30%V propileno, 5%V isobutano), almacenados en pipetas, dotadas con reguladores de alta y baja presión respectivamente, ajustados a la presión de suministro. El gas se hizo pasar por

un medidor de volumen húmedo hacia el sistema de combustión.

El aire se tomó del ambiente mediante un ventilador y se pasó por un sistema de acondicionamiento (humidificador y deshumidificador) para lograr la condición requerida en la experimentación; se condujo luego al sistema de combustión para ser inducido como aire primario por el combustible y mezclarse con éste. El sistema de combustión estuvo constituido por un quemador atmosférico de premezcla, una encimera, una olla y una campana colectora de humos fabricadas de acuerdo con la norma UNE 60-755-81 compilada por AENOR [5].

Los gases de combustión se condujeron hacia un acondicionador de humos donde se les retiró el vapor de agua y se enfriaron para su posterior análisis en un analizador tipo infrarrojo no dispersivo. Durante la experimentación se mantuvieron constantes la rata de aireación primaria, la configuración geométrica del quemador, la presión de suministro y la altitud.

También se realizaron pruebas modificando el contenido de humedad del aire total (aire primario y aire secundario) mediante una cámara que encerraba todo el sistema de combustión utilizando G.L.P. como combustible, sin embargo, no fue posible generar resultados confiables para predecir la influencia de la humedad en el aire de combustión en vista de que se presentó viciado del aire por la recirculación de los humos de combustión que además incrementaron la temperatura de la cámara.

## Resultados y discusión

### *Emisiones de monóxido de carbono al modificar la humedad del aire primario para la combustión de gas licuado del petróleo*

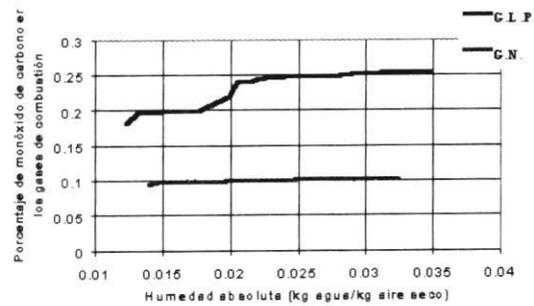
Los porcentajes en volumen de monóxido de carbono para diferentes condiciones de humedad absoluta y de humedad relativa del aire

primario se presentan en la tabla 1 y en las figuras 1 y 2. Los resultados muestran que al modificar la humedad absoluta desde un valor mínimo de 0,01223 hasta un máximo de 0,03493 kg agua/kg aire seco, el nivel de emisiones se incrementó de 0,1819 a 0,2540% en volumen; aproximadamente un 38%. De la figura 1 se obtiene un aumento de 0,0318%V de CO por cada 0,01 kg agua/kg aire seco de aumento en la humedad del aire primario, esta cuantificación corresponde al valor promedio de la pendiente de la curva para el G.L.P.

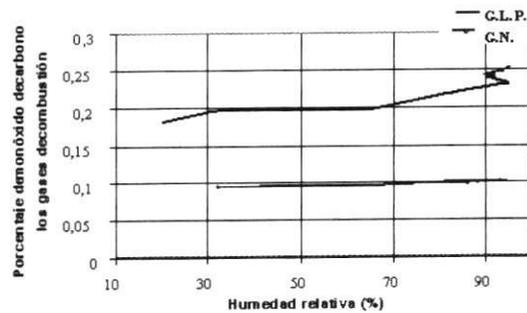
**Tabla 1** Emisiones de monóxido de carbono con variación en las condiciones del aire primario para gas licuado del petróleo

| <i>Humedad absoluta, kg agua / kg aire seco</i> | <i>Humedad relativa, %</i> | <i>Temperatura, °C</i> | <i>Monóxido de Carbono, % Volumen</i> |
|---|----------------------------|------------------------|---------------------------------------|
| 0,01223   | 20                         | 41                     | 0,1819                                |
| 0,01311   | 32                         | 34                     | 0,1972                                |
| 0,01483   | 34                         | 35                     | 0,1978                                |
| 0,01753   | 65                         | 26,3                   | 0,198                                 |
| 0,01995   | 83                         | 24,5                   | 0,2197                                |
| 0,02024   | 95                         | 22,5                   | 0,232                                 |
| 0,02053   | 90                         | 23,5                   | 0,24                                  |
| 0,02167   | 92                         | 24                     | 0,2426                                |
| 0,02253   | 90                         | 25                     | 0,2455                                |
| 0,02807   | 94                         | 28                     | 0,249                                 |
| 0,03108   | 95                         | 29,2                   | 0,2528                                |
| 0,03493   | 95                         | 32,5                   | 0,254                                 |

La curva de la figura 2 muestra que por cada 10% de aumento en la humedad relativa, las emisiones se incrementan en 0,0186%V de CO; esta variación se tiene a partir de 65% de humedad relativa donde empieza a apreciarse significativamente la influencia de este factor.



**Figura 1** Emisiones de monóxido de carbono con la variación de la humedad absoluta del aire primario para gas licuado del petróleo y gas natural



**Figura 2** Emisiones de monóxido de carbono con la variación de la humedad relativa del aire primario para gas licuado del petróleo y gas natural

**Emisiones de monóxido de carbono al modificar la humedad del aire primario para la combustión de gas natural**

La variación de las emisiones de CO con la humedad absoluta y la humedad relativa se presenta en la tabla 2 y en las figuras 1 y 2. Los resultados muestran que un incremento significativo en la humedad del aire primario produce un aumento muy leve en las emisiones; la humedad absoluta se varió de 0,01397 a 0,03228 kg agua/kg aire seco, este cambio permitió obtener niveles de 0,0942 a 0,102% en volumen de CO; se incrementó un 85% con relación al valor mínimo (0,0942%V)

**Tabla 2** Emisiones de monóxido de carbono con variación en las condiciones del aire primario para gas natural

| <i>Humedad absoluta, kg agua / kg aire</i> | <i>Humedad relativa, %</i> | <i>Temperatura, °C</i> | <i>Monóxido de Carbono, % Volumen</i> |
|--|----------------------------|------------------------|---------------------------------------|
| 0,01397                                    | 32                         | 35                     | 0,0942                                |
| 0,01454                                    | 68                         | 22,6                   | 0,0973                                |
| 0,01681                                    | 74                         | 23,3                   | 0,0985                                |
| 0,01738                                    | 86                         | 21,7                   | 0,0989                                |
| 0,01967                                    | 81                         | 24,6                   | 0,0998                                |
| 0,02081                                    | 88                         | 24                     | 0,1002                                |
| 0,0238                                     | 86                         | 26,5                   | 0,1002                                |
| 0,02479                                    | 94                         | 26                     | 0,1011                                |
| 0,02908                                    | 92                         | 29,5                   | 0,1011                                |
| 0,03238                                    | 93                         | 30,5                   | 0,102                                 |

La figura 1 muestra un aumento de 0,0042% en volumen de CO por cada 0,01 kg agua/kg aire seco de aumento en la humedad. En la figura 2 se aprecia un incremento de 0,00127%V de CO por cada 10% de aumento en la humedad relativa del aire.

Al ser comparadas las variaciones en los porcentajes de CO respecto a los cambios en la humedad para la combustión del gas natural y de G.L.P. (figura 1) se halla que para el mismo cambio en humedad absoluta, la incidencia de ésta es aproximadamente ocho veces mayor para G.L.P. También se observa que las emisiones con gas natural no sobrepasan la mitad de las producidas con G.L.P.; ésta diferencia puede deberse a la menor relación carbono/hidrógeno del gas natural y a su menor requerimiento de oxígeno, teniendo mayor

probabilidad de aproximarse a la combustión completa.

Las emisiones con gas natural no superan el límite (0,2%V de CO); para el G.L.P. están por encima para humedades mayores a 0,0175 kg agua/kg aire seco.

El aumento en la producción de monóxido de carbono se explica por los efectos que causa el vapor de agua contenida en el aire:

- Proporciona radicales libres OH que favorecen la cinética del CO.
- Disminuye la temperatura de la llama, y este apagamiento limita la oxidación del monóxido.
- Reduce la presión parcial del oxígeno requerido para la combustión.

### Conclusiones

La humedad del aire primario requerido para la combustión tiene notable incidencia sobre la producción de monóxido de carbono, siendo más significativo el efecto para el G.L.P. que para el gas natural, en quemadores atmosféricos con llama de premezcla.

Las emisiones de CO producidas por la combustión de gas natural están entre el 40 y 50% de las producidas por la combustión de G.L.P. para un amplio rango de variación de humedad absoluta (0,01397 a 0,03228 kg agua/kg aire seco).

Las emisiones de CO cuando se varía la humedad del aire total son mayores que las emisiones correspondientes a la variación de humedad solo del aire primario.

Para valores de humedad relativa promedio característicos del clima colombiano (65 a 95% de humedad relativa; 0,017 a 0,035 kg agua/kg aire seco humedad absoluta), la combustión del G.L.P. supera los límites permisibles (0,2%V de CO) para el tipo de quemador que se utilizó en el estudio.

### Agradecimientos

El proyecto se realizó gracias al apoyo financiero del Comité para el Desarrollo de la Investigación (CODI) y al apoyo administrativo y logístico del Centro de Investigaciones Ambientales y de Ingeniería (CIA) y del Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía.

### Referencias bibliográficas

1. Bartok, W., *Fossil Fuel Combustion, a Source Book*, John Wiley and Sons. 1991. pp. 291-282.
2. Borrazzo, J.E *et al. Modelling and Monitoring of CO, NO, and NO<sub>2</sub> in a Modern Townhouse*, Atmospheric Environment. Vol. 1 No. 2, 299. 1986.
3. De Nevers, N. *Air Pollution Control Engineering*, McGraw-Hill. 1995. 501-505.
4. Relwani, S.M. y Moschandreas, D.J. *Effects of Operational Factors on Pollutant Emission Rates from Residential Gas Appliances*, *Journal of the Air Pollution Control Association*. 36, 1.233. 1986.
5. AENOR, Recopilación de normas UNE. *Aparatos que utilizan gas como combustible*, Ing. mecánica, tomo 3. Madrid, 1990.