

Fecha enviada: 5 junio 2022

Fecha corregida: 4 julio 2022

Mario Santizo Calderón, PhD, MEng.²

RESUMEN

La investigación consiste en analizar la generación térmica con búnker y luego utilizando biogás/búnker al 70% de biogás. Para la fabricación de alcohol, se utilizan dos calderas piro tubulares de espalda húmeda marca BONO (Team MATAAC SG 1000/12/HFO/PA), con una capacidad de producción de 10,000 kg de vapor/hora y caldera 20,000 kg vapor/h total), con una capacidad de generación equivalente a 1,400 Bhp, las cuales generan vapor entre 10 a 10.5 bares con el propósito de obtener alcohol de calidad y producción de acuerdo con la capacidad de las columnas de destilación (rectificación). Para analizar ambos escenarios (búnker y biogás/búnker) se analiza la eficiencia térmica de generación.

1

En el escenario búnker se analiza de acuerdo con la metodología tradicional, tomando mediciones y determinando la eficiencia de combustión de acuerdo con tablas existentes y a continuación la eficiencia de caldera utilizando ecuaciones de diseño.

La experimentación se concluye que, incrementando el flujo de aire con ventiladores de mayor capacidad se obtiene la misma eficiencia de caldera utilizando el biogás al 70%, por lo que es económica y técnicamente viable.

Palabras clave: Biogás, generación de vapor, alcohol, búnker, eficiencia térmica.

ABSTRACT

The research consists of analyzing thermal generation with bunker [current fuel] and then using biogas / bunker at 70% biogas. For the manufacture of alcohol, two BONO brand piro-tubular wet-back boilers are used [Team MATAAC SG 1000/12 / HFO / PA], with a production capacity of 10,000 kg steam / hour and boiler - 20,000 kg steam / h total - with a generation capacity equivalent to 1,400 Bhp,

which produces steam between 10 and 10.5 bars to obtain quality alcohol and production according to the capacity of the distillation columns [rectification].

To analyze both scenarios [bunker and biogas / bunker] the thermal generation efficiency is analyzed. The bunker scenario was analyzed according to the traditional methodology, taking measurements, analyzing them and determining the combustion efficiency according to existing tables and then boiler efficiency using design equations.

The experimentation concludes that, by increasing the air flow with larger capacity fans, the same boiler efficiency is obtained using 70% biogas, making it economically and technically feasible.

Keywords: Biogas, steam generation, alcohol, bunker, thermal efficiency

² PhD en Eficiencia Energética, MEng. En Energía Renovable y Eficiencia Energética. Ha realizado 118 estudios de energía en Centroamérica, Panamá y Brazil. Profesor de los cursos de Operaciones

Unitarias, y de Energía en varias Universidades. Proenergia.com@gmail.com. Código 472 del Registro Nacional de Investigadores Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT).

Fecha enviada: 5 junio 2022

Fecha corregida: 4 julio 2022

INTRODUCCIÓN

La investigación consistió en determinar en una fábrica de alcohol los parámetros en que se realiza el proceso de combustión con mezcla biomasa/búnker y la determinación de la eficiencia de caldera (Drapcho, Nhuan, & Walker, 2008) con el propósito de depender en menor escala de los combustibles, utilizando los biocombustibles y así disminuir la contaminación de los gases invernadero y minimizar la dependencia de los combustibles en las fábricas de alcohol.

La fábrica para la fabricación de alcohol utiliza dos calderas:

- a) piro tubulares de espalda húmeda marca BONO (Team MATAAC SG 1000/12/HFO/PA), con una capacidad de producción de 10,000 kg de vapor/hora.
- b) Caldera 20,000 kg vapor/h total -, con una capacidad de generación equivalente a 1,400 Bhp las cuales producen vapor entre 10 a 10.5 bares con el propósito de obtener alcohol de calidad y generación de acuerdo con la capacidad de las columnas de destilación (rectificación).

Según (Kayhanian, 2007), la investigación debe comparar los dos combustibles en condiciones de operación similares, (Raju, 2007), de acuerdo al método, consistió de manera sintetizada en determinar la eficiencia de caldera utilizando búnker como combustible y luego búnker/biomasa en una relación 70% biogás y 30% búnker, para utilizar biogás (biocombustible), se eliminó el ventilador de aire de tiro inducido localizado en la parte de arriba de las calderas y se instaló otro por caldera cuya capacidad es de 50% mayor, es decir un ventilador de 50 Hp, con las mismas características técnicas.

Para determinar la eficiencia de caldera usando búnker, se utilizó el método convencional; sin embargo, para determinar la eficiencia de caldera mezclando búnker con biogás se

desarrolló un balance de biomasa-búnker en cada una de las calderas, debido a que aún no se dispone de tablas que manejan las diferentes propiedades en mezclas biogás/búnker.

En la experimentación se concluye que, incrementando el flujo de aire con los ventiladores de mayor capacidad, se obtiene la misma eficiencia de caldera utilizando el biogás al 70%, por lo que es económica y técnicamente viable el cambio utilizando el 70% de biocombustible (Noges, 2010).

Lo anterior es útil, considerando que en Guatemala con los tratados de libre mercado que aplican a Centroamérica, Sur América y el Caribe, las empresas tratan de eficientar sus procesos a través de la modificación de las variables o la inversión en nuevos procesos productivos más eficientes.

En la fábrica en estudio se genera biocombustible a partir de la descomposición anaeróbica de las vinazas y se requiere generar energía térmica no solo utilizando combustible, sino aprovechando el biocombustible generado en una relación biogás/combustible del 70%.

Para proceder a la utilización del biocombustible se analizó la generación térmica únicamente con combustible y luego utilizando el 70% de biocombustible, (Oka, 2004), para determinar la eficiencia del proceso y así determinar si es factible el cambio a biocombustible, (Kayhanian, 2007). Para la realización de este estudio se utilizaron medidores de eficiencia de combustión, velocímetros, detectores de vapor y medidores de temperatura por infrarrojo

Fecha enviada: 5 junio 2022

Fecha corregida: 4 julio 2022

ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

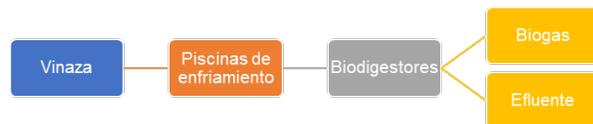
Antes de iniciar el proceso de información y análisis, se presenta a nivel de diagrama de bloques el proceso de manera conceptual y básico:

Figura 1 Proceso general de producción de etanol



Fuente: elaboración propia del proceso en estudio

Figura 2. Proceso general de producción de biogás a partir de la vinaza.



Fuente: elaboración general en base a Del Toro (2001).

La investigación consistió en analizar la generación térmica con búnker [combustible actual] y luego utilizando biogás/búnker al 70% de biogás. Para la fabricación de alcohol, se dispone de dos calderas piro tubulares de espalda húmeda marca BONO Team MATAC SG 1000/12/HFO/PA], con una capacidad de producción de 10,000 kg de vapor/hora y caldera 20,000 kg vapor/h total y, de generación equivalente a 1,400 Bhp las cuales producen vapor entre 10 a 10.5 bares con el propósito de obtener alcohol de calidad y

producción de acuerdo con la capacidad de las columnas de destilación (rectificación). Siguiendo a (Noges, 2010), para analizar ambos escenarios (búnker y biogás/búnker) se analiza la eficiencia térmica de generación en estado estable de operación.

En el escenario búnker se analizó de acuerdo con la metodología tradicional, tomando mediciones, analizándolas y determinando la eficiencia de combustión de acuerdo con tablas existentes y a continuación la eficiencia de caldera utilizando ecuaciones de diseño.

Tabla 1. Parámetros calculados Mediciones realizadas los días 6 y 7 de mayo del 2018 (caldera 1)

Vapor [Vahar]	Búnker [Psig]	Paire [Psig]	O ₂ [%]	CO ₂ [%]	Chimenea [A.C.]
10.20	49.00	15.00	8.00	12.00	178.00
10.40	48.00	16.00	7.80	12.80	177.00
10.20	50.00	17.00	6.10	14.00	180.00
10.20	52.00	18.00	7.00	13.10	178.00
10.20	51.00	16.00	7.80	12.70	178.00
10.24	50.00	16.00	7.34	12.92	178.20

Datos obtenidos de mediciones realizadas en la industria.

Eficiencia de Combustión

Para determinar la deficiencia de combustión (energía que aprovecha la caldera para su funcionamiento, no para producir vapor) se utilizaron dos métodos: 1. Utilizando el contenido de oxígeno y la temperatura neta de chimenea 2. Utilizando el contenido de dióxido de carbono y la temperatura neta de chimenea [temperatura de chimenea temperatura ambiente). Para el análisis se utilizó un equipo Bacarach de soluciones (para el caso de calderas piro tubulares hasta de 1,000 Bhp, se utiliza este equipo por la versatilidad y composición cambiante del combustible; para una caldera acuotubular de combustible o desechos agroindustriales se utiliza un electrónico con sonda extendible).

De acuerdo con tabla de eficiencia para combustible búnker, de apéndice, la eficiencia

Fecha enviada: 5 junio 2022

Fecha corregida: 4 julio 2022

de combustión para la caldera 1 se presenta a continuación:

Tabla 2. Eficiencia de combustión en caldera 1, según % O₂

P _{vapor} [Bar]	P _{búnker} [psig]	P _{aire} [psig]	O ₂ [%]	T _{ambiente} [°C]	T _{chimenea} [°C]	E _{combustión} [%]
10.28	49.80	16.00	6.42	90	181.20	87.40

Datos obtenidos de mediciones realizadas en la industria.

Tabla 3. Eficiencia de combustión en caldera 1, según % CO₂

P _{vapor} [Bar]	P _{búnker} [psig]	P _{aire} [psig]	CO ₂ [%]	T _{ambiente} [°C]	T _{chimenea} [°C]	E _{combustión} [%]
10.28	49.80	16	12.96	90	181.20	88.10

Datos obtenidos de mediciones realizadas en la industria.

De acuerdo con tablas 3 y 4, la eficiencia de combustión promedio en caldera 1: 87.75%

De acuerdo con tabla de eficiencia para combustóleo búnker, de apéndice, la eficiencia de combustión para la caldera 2 se presenta a continuación:

Tabla 4. Eficiencia de combustión en caldera 2, según % O₂

P _{vapor} [Bar]	P _{búnker} [psig]	P _{aire} [psig]	O ₂ [%]	T _{ambiente} [°C]	T _{chimenea} [°C]	E _{combustión} [%]
10.24	50.00	16.00	7.34	90	178.20	87.30

Datos obtenidos de mediciones realizadas en la industria.

Tabla 5. Eficiencia de combustión en caldera 2, según % CO₂

P _{vapor} [Bar]	P _{búnker} [psig]	P _{aire} [psig]	CO ₂ [%]	T _{ambiente} [°C]	T _{chimenea} [°C]	E _{combustión} [%]
10.24	50.00	16.00	12.92	90	178.20	88.40

Datos obtenidos de mediciones realizadas en la industria.

De acuerdo con tablas 5 y 6, la eficiencia de combustión promedio en caldera 2: 87.85%.

Eficiencia de caldera

La eficiencia de caldera o rendimiento térmico determina la cantidad de energía térmica que se aprovecha para generar vapor; es decir, que la eficiencia de caldera toma en cuenta las pérdidas de energía debido a la carcasa de la caldera (pérdidas por convección y radiación) y las pérdidas por purga (pérdidas debido a los sólidos totales disueltos en el agua de caldera) (Santizo, 2008).

Pérdidas por radiación y convección

La pérdida por radiación y convección en la carcasa de las calderas es proporcional a la temperatura promedio correspondiente al perfil de temperatura a lo largo de la caldera, lado del quemador y lado del espejo, depende también de la emisividad del material superficial y su estado; así como de la temperatura ambiente y velocidad del viento en el caso de calderas sujetas a este:

Tabla 6. Parámetro de la ecuación de Langmuir

Emisividad	T _{superficial promedio} [°F]	T _{ambiente} [°F]	Área Caldera [pie ²]	Velocidad del viento [pie/min]	E _{alimentada} [MBtu/h]	E _{pérdida} [MBtu/h]
0.50	130	90	1,654	25	31.71	0.102

Datos obtenidos de la ecuación de langmuir, (Santizo, 2008)

Tomando en cuenta los resultados de la tabla 7 y utilizando cálculos estequiométricos, se calcula las pérdidas por radiación y convección:

$$\left(\frac{100\%}{31.71 \frac{\text{MBtu}}{\text{h}}} \right) \left(0.102 \frac{\text{MBtu}}{\text{h}} \right) = \boxed{0.32\%}$$

Fecha enviada: 5 junio 2022

Fecha corregida: 4 julio 2022

Pérdidas por purga

De acuerdo con las Normas ASTM las calderas pirotubulares que operan a una presión de vapor hasta de 300 psig, debe mantener los sólidos totales disueltos hasta 3,500 ppm, sin ocasionar deterioro en la caldera a continuación, se presenta los sólidos totales disueltos en el agua de alimentación a las calderas y en la purga (caldera).

Tabla 7. Sólidos totales disueltos

Purga caldera 1 [PPM]	Purga caldera 2 [PPM]	Agua de alimentación [PPM]
2,998	2,032	126
3,015	2,030	126
1,841	1,538	986
1,122	521	135
2,049	1,178	124
2,042	1,226	127
2,032	1,234	126
3,009	2,040	125
2,997	2,057	125
3,012	2,042	124
3,010	2,021	124
2,466	1,629	131.64

Datos obtenidos de mediciones realizadas en la industria.

Según (Santizo, 2008) y de acuerdo con la información anterior se determina la pérdida por purga

Tabla 8. Pérdida por purga

Equipo	Pérdida por purga
Caldera 1	5.34 %
Caldera 2	8.08 %

Datos obtenidos de mediciones realizadas en la industria.

Eficiencia de caldera

La eficiencia de caldera (rendimiento térmico), determina la relación vapor/combustóleo, es decir indica la cantidad de energía que es utilizada por el agua de alimentación a la caldera para generar vapor.

Tabla 9. Eficiencia de caldera

Equipo	Ecombustión	Pérdida por radiación y convección	Pérdida por purga	Ecaldera
Caldera 1	87.75	0.32	5.34	82.09
Caldera 2	87.85	0.32	8.08	79.45

Datos obtenidos de mediciones realizadas en la industria.

Costo de la energía aprovechada

Un parámetro importante para saber la rentabilidad y eficiencia operacional de un sistema de vapor es determinar el costo de mil libras de vapor, (costo directo en función del consumo del combustóleo, (no consumo eléctrico ni debido a mano de obra) este es únicamente función del precio del combustóleo y de la eficiencia de caldera (aprovechamiento del combustóleo para generar vapor).

A continuación, se presenta el costo de la energía comprada con la eficiencia actual y con la eficiencia mejorada.

Tabla 10. Costo de la energía comprada actual y según oferta (De acuerdo con una eficiencia de caldera (rendimiento térmico del 92%))

Equipo	Costo de energía comprada ¹ [Q/MBtu]	Costo de energía aprovechada ² [Q/MBtu]	Costo de energía aprovechada según oferta [Q/MBtu]
Caldera 1	66.67	81.21	72.47
Caldera 2	66.67	83.91	72.47

Datos obtenidos de mediciones realizadas en la industria y según (Santizo, 2008).

Tabla 11. Costo de 1,000 libras de vapor

Equipo	Costo energía aprovechada [Q/MBtu]	Factor evaporación [$\Delta H_{vapor} / \Delta h_{a.a.}$] [Btu/lb]	1,000 lb de vapor [MBtu/1,000lb]	Costo 1,000 lb de vapor [Q/1,000 lb de vapor]
Caldera 1	81.21	1.08038	1.08038	87.74
Caldera 2	83.91	1.08038	1.08038	90.65

Datos obtenidos de mediciones realizadas en la industria y según (Santizo, 2008).

Impacto económico

De acuerdo con lo ofertado [92% de rendimiento], el incremento en costo de acuerdo con las eficiencias actuales es el siguiente:

Optimización del uso del biogás en fábrica de alcohol extra neutro [ENA]

Fecha enviada: 5 junio 2022

Fecha corregida: 4 julio 2022

Tabla 12. Incremento en costo

Equipo	Costo energía aprovechada ¹ [Q/MBtu]	Costo energía aprovechada según oferta [Q/MBtu]	Diferencia en costo [Q/MBtu]	Energía anual ² [MBtu/año]	Incremento en costo [Q/año]
Caldera 1	81.21	72.47	8.74	181,887.19	1,589,694
Caldera 2	83.91	72.47	11.44	181,887.19	2,080,789.45
					3,670,483.45

Datos obtenidos de mediciones y según (Santizo, 2008)

La diferencia entre la eficiencia actual y la mejorada representa un ahorro anual correspondiente a 3,670,483.45 quetzales anuales.

Tabla 13. Calderas de Vapor

Equipo	Eficiencia de combustión [%]	Pérdida por purga [%]	Pérdida por radiación [%]	Eficiencia de caldera (rendimiento) [%]
Caldera 1	87.30	5.34	0.32	82.09
Caldera 2	88.40	8.08	0.32	79.45

Datos obtenidos de mediciones y según (Santizo, 2008)

La diferencia entre lo ofertado y la operación actual tiene un impacto económico de Q.3,670,483.45 anuales que equivale a 367,048.34 galones de combustóleo, el siguiente porcentaje en combustóleo de acuerdo con el consumo anual:

$$\left(\frac{367,048.34 \text{ galones búnker}}{2,425,162.55 \text{ galones consumidos}} \right) (100\%) = 15.13\% \text{ combustóleo}$$

Deficit equivalente búnker actual:

[utilizando búnker-gas]

$$\left(\frac{9,388.30 \frac{\text{MJ}}{\text{h}}}{158.261 \frac{\text{MJ}}{\text{gal}}} \right) \left(24 \frac{\text{h}}{\text{día}} \right) = 1,423.72 \frac{\text{gal}}{\text{día}}$$

CONCLUSIONES

1. De acuerdo con la información del departamento de control de calidad, la

Tabla 14. Consumo búnker actual

Periodo	Energía térmica [MJ/h]	Vapor [Kg/h]	Energía térmica [MJ/Kg]
6, 8 y 11 mayo 2011	52,987.90	17,077.00	3.10288
13 y 14 abril 2011	40,078.10	17,252.20	2.32307

Mediciones realizadas

Tabla 15. Eficiencia de combustión generadores BONO de 700 Bhp

Generador	Eficiencia de combustión actual [Búnker/gas]	Eficiencia de combustión 2010 [Búnker]	Diferencia
	<i>Por balance de M. & E.</i>		
	<i>Por tablas eficiencia</i>		
Caldera 1	88.02	87.75	+0.27
Caldera 2	90.39	87.85	+2.54
Promedio	89.20	87.80	+1.40

Datos obtenidos de mediciones y según (Santizo, 2008)

Eficiencia de combustión [búnker/caldera]

De acuerdo con el estudio realizado actualmente con relación al del año 2010, se puede observar un incremento en la eficiencia de combustión promedio del orden de un 1.5%, aunque debido a que las calderas fluctúan en sus variables de operación [Composición búnker, gas, humedad del aire, temperatura ambiente, porcentaje de carga de la caldera] se puede considerar que las calderas en lo que respecta a eficiencia de combustión no presentaron cambios en función de la eficiencia.

Tabla 16. Eficiencia de caldera generadores BONO

Generador	Eficiencia de caldera actual [Búnker/gas]	Eficiencia de caldera 2006 [Búnker]	Diferencia pérdidas
	<i>Por balance de M. & E.</i>		
	<i>Por tablas eficiencia</i>		
Caldera 1	85.47	82.09	+3.38
Caldera 2	87.57	79.45	+8.12
Total	86.52	80.77	+5.75

Mediciones realizadas y según (Santizo, 2008)

demanda química de oxígeno de la vinaza está entre 90,000 y 110,000 ppm. Se obtiene alrededor de 0.5 m³ de biogás por Kg de demanda química

Optimización del uso del biogás en fábrica de alcohol extra neutro [ENA]

Fecha enviada: 5 junio 2022

Fecha corregida: 4 julio 2022

- convertida de la vinaza y se tiene un estimado de reducción del 65%, aunque en la práctica se obtuvo por periodos cortos esa reducción, la reducción promedio que se obtuvo fue del 60%.
2. El biogás generado tiene un contenido promedio de metano entre el 45% a 50%. Al biogás se le midió CH_4 , CO_2 y H_2S , el agua se obtiene por diferencia. Los valores promedio fueron CH_4 48%, CO_2 48%, H_2S 1.7% y la diferencia H_2O .
 3. Esta disponibilidad térmica equivale a los 283 Bhp que no se están utilizando de acuerdo con la capacidad nominal, es oportuno indicar que un generador de vapor puede operar hasta con un 110% de carga, es decir 140 Bhp adicionales, es decir una generación térmica adicional de 6,425 MJ/h adicionales, haciendo un total de disponibilidad de acuerdo con la operación actual de 19,414 MJ/h.
 4. Operando las calderas únicamente con combustóleo búnker se incrementa la generación de energía térmica en 9,388.30 MJ/h, cuyo valor energético permite mantener las calderas a 10 bares de presión. Los generadores de vapor operan con la misma eficiencia de combustión utilizando búnker o la mezcla búnker/biogás.
 5. El incremento en la eficiencia de caldera en las condiciones actuales no se debe a la mezcla de combustible, sino a la disminución en las pérdidas por radiación y por purga.
 6. Al incrementar el consumo de búnker manteniendo constante la cantidad de gas alimentado a las calderas en condiciones actuales se genera CO [hollín] en exceso, lo que indica déficit del aire de combustión y dilución en las calderas.
 7. Las nuevas condiciones de operación deberá planificarse las operaciones de generación de vapor con el propósito de encontrar la relación búnker-biogás más eficiente con un equivalente energético [respecto al año 2006, pero tomando en cuenta que ya se realizaron cambios sugeridos en ese entonces y como consecuencia disminuyó el consumo de búnker], 52,987.90 MJ/h (Ref. Ingeniero Gerardo Ritz], que equivale a 8,035 galones de búnker/día máximo y generación de vapor equivalente a 426,515 kg vapor/día a 10 bares de presión.
 8. La diferencia entre lo ofertado y la operación actual tiene un impacto económico de 3, 670,483.45 quetzales anuales que equivale a 367,048.34 galones de combustóleo, es decir un consumo anual del 15.13% más, respecto al esperado por los fabricantes.

BIBLIOGRAFÍA

Biomass Users network (BUN-CA). (2002). *Manuales sobre energía renovable: BIOMASA* (1a. edición ed.). San José, Costa Rica: BUN CA.

Carrillo, L. (s.f.). *Energía de Biomasa*. Recuperado el 12 de 06 de 2011, de <http://ingeborda.com.ar/biblioteca/Biblioteca%20Internet/Articulos%20Tecnicos%20de%20Consulta/Plantas%20de%20Tratamientos/Energia%20de%20biomasa.pdf>

Optimización del uso del biogás en fábrica de alcohol extra neutro [ENA]

Fecha enviada: 5 junio 2022

Fecha corregida: 4 julio 2022

- Drapcho, C., Nhuan, N., & Walker, T. (2008). *Biofuels Engineering Process Thecnology. Editorial Mc Graw Hill, New York, 2008*. New York: Mc Graw Hill.
- Kayhanian, M. (2007). *Biomass Conversion Processes for Energy Recovery*. Taylor & Francis Group.
- Noges, F. (2010). *Energía de la biomasa* (1a. edición ed., Vol. Volumen 1). Zaragoza: Prensas Universitarias de Zaragoza.
- Oka, S. (2004). *Fluidized Bed Combustion*. New York: Marcel Dekker Inc.
- Quintero, R. (2011 de 06 de 19). *Proyectos de Investigación sobre uso y manejo de vinazas*. Obtenido de Cengicaña: Proceso general de producción de biogás a partir de la vinaza, DEL TORO Ángel Gabriel (2001)
- Rajeshwar, K., McConnel , R., & Licht, S. (2008). *Solar Hydrogen Generation*. New York: Springer.
- Raju, N. (2007). *Industrial Energy conservation Techniques*. India: Editorial Atlantic.
- Santizo, M. (2008). *Balance de Materia y Energía*. Guatemala: Centroamericana.
- Schlager, N., & Weisblatt, J. (2006). *Alternative Energy*. New York: Thomson Gale.
- Tolosana, E. (2009). *Manual Técnico para el aprovechamiento y elaboración de biomasa forestal* (1a. edición ed.). Madrid: ICONO Imagen Gráfica.
- Toro, A. G. (2001). *Tratamiento de Vinazas por digestión anaeróbica tipo "Down Flow"*. Matanzas, Cuba.