

Recibido: 05 de septiembre de 2010  
Aceptado: 08 de noviembre de 2010**DESIGN AND CONSTRUCTION OF A PROTOTYPE FOR THE USE OF  
BIOGAS IN THE CURE OF VIRGINIA TOBACCO FOR FLUE CURED OVENS****DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA PROTOTIPO PARA EL  
APROVECHAMIENTO DE BIOGAS EN EL PROCESO DE CURADO DE  
TABACO VIRGINIA PARA HORNOS FLUE CURED****Ing. Miguel E. Díaz E., Ing. David A. Rodríguez R., Ing. Harbey A. Lizarazo M.  
Ing. Diana Delgado, Ing. Fabio Dueñas, Ing. Luis Peñaranda, Ing. Oscar J. Bernal****Fundación Universitaria de San Gil – UNISANGIL**Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería, Programa Ingeniería en Mantenimiento.  
Carrera 7, No. 14 -34, San Gil, Santander, Colombia. Tel.: (577) 7245757 / 7246565.  
E-mail: mdiaz@unisangil.edu.co, drodriguez@unisangil.edu.co

**Abstract:** This paper presents preliminary results of the project "Design and construction of a prototype system for the use of biogas in the process of curing snuff *Flue Cured* Virginia furnace in the departments of Santander and Huila" The project aims to Snuff Production Chain for the energy use of a system of biogas generation and compression in the curing process of Snuff Virginia. The project aims to raise an alternative energy solution that offers a particular way and very creative solution to the problem of high production costs for the use of current fuels, mitigating current environmental problems generated by emissions during the trial.

**Keywords:** Curing, wastewater, biomass, biodigestor, digestion, compression.

**Resumen:** En este artículo se presentan los resultados del proyecto "Diseño y construcción de un sistema prototipo para el aprovechamiento de biogás en el proceso de curado de tabaco virginia para hornos *Flue Cured* en los departamentos de Santander y Huila." Este proyecto está dirigido a la Cadena Productiva del Tabaco para el aprovechamiento energético a partir de un sistema de generación y compresión de Biogás en los procesos de curado de Tabaco Virginia. El objeto del proyecto es plantear una solución energética alternativa que ofrezca de forma particular y muy creativa solución al problema de los altos costos de producción por la utilización de los actuales combustibles, mitigando los actuales problemas ambientales por las emisiones generadas por los mismos durante el proceso.

**Palabras clave:** Curado, biomasa, biodigestor, digestión, compresión.

**1. INTRODUCCIÓN**

El tabaco es una de las actividades agrícolas con mayor relevancia y producción en el mundo; de él derivan su sustento una población cercana a los 33 millones de habitantes, que cultivan una superficie aproximada de 100 millones de hectáreas. Colombia no es la excepción, el tabaco es una de

las actividades agrarias más tradicionales y significativas, al cual le corresponde una económica netamente campesina que cultiva en diferentes escalas de producción en 16 departamentos y 157 municipios del país con el 0.41% del potencial de área cultivada; situándose en zonas como Santander, Huila, Norte de Santander, Boyacá y algunas regiones de la costa

atlántica y el Valle del Cauca; éste involucra la mano de obra familiar de 23.000 familias que siembran más de 18.445 hectáreas de sus dos variedades (negro y rubio). [1]

La producción de tabaco Virginia en el país ha estado presionada y amenazada por un aumento de costos de producción en las labores agrícolas, de manera general más del 90% de la energía para la producción de tabaco se consume en el proceso de curado, es por eso que el combustible utilizado para la generación de calor hace incrementar los costos de producción de una manera tan determinante, el incremento exagerado esta dado por los incrementos en el precio del carbón.

La fuente energética utilizado para el proceso de curado de Tabaco *Virginia Flued Cured* es el carbón mineral tipo bituminoso, proveniente de Boyacá y Cundinamarca; los actuales diseños de las hornillas de combustión de carbón, quizás no son los mejores generando ineficiencias y por ende aumento en el consumo de combustible, el cultivo de tabaco presenta dos problemas actuales de mayor importancia, los precios elevados del carbón y la alta contaminación ambiental por las emisiones de partículas y gases que genera en el proceso productivo; además, por el tipo de construcción de los actuales hornos, se presentan ineficiencias en el manejo adecuado de la energía.[1]

El constante crecimiento de la población humana y la demanda sobre los recursos naturales han contribuido a la deforestación y otros problemas ambientales. Buscando alternativas tendientes a la optimización del consumo, el hombre ha desarrollado técnicas que permitan aprovechar otras fuentes de energéticas, planteando como tecnología la implementación de Biodigestores, una de las alternativas para el tratamiento y aprovechamiento de residuos sólidos y líquidos como mecanismos de tratamiento y a su vez como fuente energía renovable; el tratamiento anaeróbico permite obtener biogás como subproducto durante el proceso digestión, y dentro de los gases que lo conforman se encuentran, Metano (CH<sub>4</sub>) 60%; Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) 33.5%; Nitrógeno (N<sub>2</sub>) 1.5%; Hidrógeno (H<sub>2</sub>) 1.5%; Ácido Sulfhídrico (H<sub>2</sub>S) 1%; Oxígeno (O<sub>2</sub>) 1.5%; Monóxido de Carbono (CO) 1%. (Adaptado de Botero., R. Preston., T. 1986 & Xuan *et al.*, 1995). Las proporcionalidades son teóricas y del mismo modo pueden variar dependiendo de las condiciones ambientales e igualmente de las características de la carga o material de alimentación. [2].

Las posibilidades que existen de aprovechar los desechos de la agricultura y de la crianza de animales que tengan como producto final, o a veces como subproducto un energético es la nueva alternativa que actualmente enfrenta el desarrollo de un agricultura sostenible, sin embargo, no siempre basta con cambiar el enfoque o punto de vista para transformar un desecho en producto útil y en particular, en un energético.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 Descripción de partes y componentes del Biodigestor Prototipo para pruebas.

**Sistema de Carga ó Alimentación.** El mecanismo de alimentación es adaptado al tanque de polietileno por medio de una tubo en PVC de 2"; del mismo modo, es instalada una válvula de control para líquidos de 2" en PVC. Para la construcción de la tolva se solicita de la instalación de un tubo de 4" en PVC, ajustado por medio de una reducción de 4" a 2".

**Manómetro.** Medidor de presión, el manómetro utilizado para medir diferencia de presiones es de tipo Bourdon.

**Sistema de filtrado de Biogás.** En el proceso de purificación del biogás se tiene en cuenta la remoción de dióxido de carbono y el sulfuro de hidrógeno. La eliminación del dióxido de carbono se realiza para aumentar el valor como combustible del biogás, mientras que el sulfuro de hidrógeno se elimina para disminuir el efecto de corrosión sobre los metales que están en contacto con el biogás. [2]

**Control y monitoreo de temperatura.** La temperatura es una cuantificación termodinámica del estado de un sistema, en donde se puede determinar la cantidad de calor, o transferencia de energía. La temperatura juega un papel importante a la hora de determinar las condiciones de supervivencia de los microorganismos presentes en las etapas de digestión. De tal manera que requieren de un rango de temperatura corpórea para poder sobrevivir.

Antes una descripción.

- **Digestión Psicrófila.** Es la digestión anaerobia que se realiza a temperaturas entre 10°C y 20 °C. [2] A estas temperaturas la carga debe permanecer en el digestor más de 100 días.

- **Digestión Mesofílica.** Es la digestión anaerobia que se realiza a temperaturas entre 30°C y 35°C. [2] La carga debe permanecer en el digestor 15 a 30 días. Este tipo de proceso tiende a ser más confiable y tolerante que el proceso termofílico, pero la producción de gas es menor y se requieren digestores de gran tamaño.
- **Digestión Termofílica.** Es la digestión anaerobia que se realiza a temperaturas mayores de 55°C y el tiempo de residencia es debe ser de 12 a 14 días. [2] Estos sistemas ofrecen una producción de metano más alta, caudales más rápidos, mejor eliminación de patógenos y virus. Estos sistemas requieren tecnología más costosa, consumen más energía y requieren mayor asistencia y monitoreo.

**Mecanismo de sondeo.** El sistema implementado permite realizar pruebas y seguimientos de monitoreo y control de pH y Temperatura; además, efectuar procesos de inoculación o recirculación junto con procedimientos de correctores de pH.

**Mecanismo de rebose.** Permite la salida del material orgánico ya digerido durante el proceso de biometanización; esta herramienta contempla una tubería de 2" por donde es desalojada la carga ya desgasificada. Situado sobre el nivel del fluido de la carga orgánica, accede tener un nivel constante y un desplazamiento continuo de la carga de alimentación.

Se llevó a cabo las pruebas de generación de biogás en condiciones controladas de alimentación en los Biodigestores prototipos en los cuatro municipios de los dos Departamentos Santander y Huila, el cual se realizó el siguiente procedimiento:

- Ajuste y puesta a punto de tanque piloto en vacío.
- Inicio del proceso de carga.
- Monitoreo de Temperatura y pH y tabulación de datos.
- Toma de muestras de material biodigestado para laboratorio.
- Pruebas de quemado.

## 2.2 Monitoreo de las condiciones de humedad y temperatura al interior del horno durante un ciclo de curado

Con el fin de determinar con exactitud las condiciones de temperatura, humedad y punto de rocío, al interior del horno, se procedió a instalar

tres sensores USB datalogger Temperatura/humedad para el monitoreo y recolección de información de dichas variables, estos fueron ubicados dos al interior del horno, uno en la parte baja, otro en la parte alta y el tercero fuera del horno. La frecuencia de muestreo fue de 30 segundos, con lo cual se logró una gran resolución en la toma de dichos datos. La recopilación de datos se realizó durante todo el ciclo (267 horas).

En la figura se muestra la gráfica de las condiciones de humedad y temperatura durante el proceso de curado de tabaco.

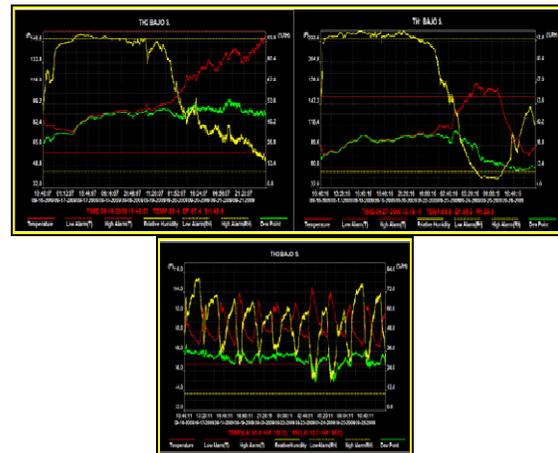


Fig. 1. Gráficas Monitoreo De las condiciones de Humedad y temperatura.

Fuente: Monitoreo Equipo Datalogger humedad y temperatura.

El monitoreo de dichas variables se realizó en un horno ubicado en Garzón, departamento del Huila, para un proceso completo de curado, de forma que sea posible replicar este comportamiento de humedad y temperatura en un horno prototipo con el uso de un combustible alternativo y mejores condiciones de eficiencia en el aprovechamiento de la energía liberada por el combustible. Los datos recopilados en el horno modelo del municipio de Garzón permitieron el modelamiento térmico del intercambiador de calor (tubos de fuego) al interior del mismo. Con las temperaturas medidas en el horno, se procedió a realizar los cálculos de transferencia de calor a fin de determinar la cantidad de calor transferido desde el horno a su interior.

## 2.3 Selección del Sistema de Compresión

En la selección del sistema de compresión se tuvo en cuenta principalmente la seguridad, dado que el biogás está compuesto en su mayoría por gas metano (65 a 70%), y en razón de tratarse de un

gas altamente explosivo es necesario verificar las propiedades de los gases de trabajo a fin de identificar los posibles riesgos durante el proceso de compresión de dicho gas, seguido por los costos de la instalación, dado que esta se convertiría en la principal limitante para la implementación por parte de las personas dedicadas a las tareas de curado de tabaco.

Dado que la industria del manejo de biogás es bastante incipiente para el caso de dichos departamentos y el manejo a alta presión lo es aún más, ha sido en extremo difícil la consecución de los sistemas de compresión en el mercado nacional, razón por la cual se ha acondicionado un compresor de aire, alternativa que requiere de un mayor conocimiento de las distintas variables y componentes involucradas en este proceso a fin de no comprometer la seguridad de las personas involucradas en la compresión del gas.

De acuerdo a la información suministrada se estima que la capacidad de producción de biogás será de  $1.9 \text{ m}^3$ , por otra parte la cantidad de calor requerida para realizar el ciclo completo de curado se estima en  $3.41 \text{ m}^3$  una vez comprimido el volumen ocupado por el biogás será:

*Condiciones iniciales:*

$$S_i = 3.41 \text{ m}^3$$

$$P_i = 14.7 \text{ psi}$$

*Condiciones finales:*

$$S_f = 0.479 \text{ m}^3$$

$$P_f = 90 \text{ psi}$$

Si este volumen de gas quisiera almacenarse en cilindros de gas propano de 100lib se requerirían:

*Cantidad de cilindros:*

$$N_c = 5 \text{ cilindros}$$

*Cálculo de la temperatura de descarga del compresor:*

Teniendo en cuenta que el proceso real de compresión es un proceso politrópico y que el caso de compresión isotérmica no puede conseguirse de manera comercial aunque los compresores suelen diseñarse para lograr la máxima extracción de calor posible, la temperatura de descarga del compresor puede obtenerse de: [3].

$$t_d = \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^n \quad (1)$$

Donde, el exponente  $n$  se determina de forma experimental para cada sistema de compresión y dado que no disponemos de este valor es preciso aproximar el ciclo de compresión a un ciclo adiabático, para el cual se sustituye el exponente  $n$  por la relación de calores específicos  $k$ .

Es preciso aclarar que desde el punto de vista termodinámico un proceso isentrópico o adiabático es reversible, mientras que el proceso politrópico es irreversible. [3].

$$t_d = \left( \frac{P_2}{P_1} \right) \quad (2)$$

Para el caso del metano la relación de calores específicos igual a  $C_v = 1.32$ , entonces:

$$t_d = T_1 \cdot \left( \frac{P_2}{P_1} \right) \quad (3)$$

$$t_d = (28 + 273.13) \cdot \left( \frac{104.7}{14.7} \right)^{1.32} \quad (4)$$

$$t_d = 212^\circ \text{C a } 90 \text{ psi}$$

Con este valor deberá evaluarse la temperatura de autoignición, ( $t_{adm} = 537^\circ \text{C}$  a Presión atmosférica), con el fin de verificar si es necesario el uso de enfriamiento adicional.

### 3. RESULTADOS PRELIMINARES.

#### 3.1 Diseño y Montaje Biodigestor

El biodigestor instalado posee un volumen de 6000 litros; de los cuales el 75% se encuentra ocupado por una mezcla de purines de res (material adicional) y aguas residuales provenientes de las unidades sanitarias de la sede de Bienestar Universitario de Fundación Universitaria de San Gil – UNISANGIL. El 25% restante es empleado como reservorio de biogás de forma inicial para el proceso.

#### 3.2 Diseño horno a escala

Se diseñó un horno a escala prototipo para la realización de pruebas, para lo cual se generaron los planos del mismo según el diagnóstico realizado a los hornos y con especificaciones técnicas térmicas, en la figura 2 se muestra una imagen del diseño del horno prototipo.

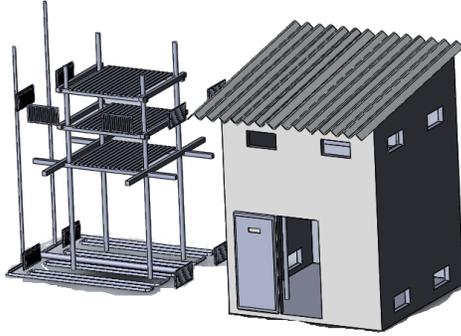


Fig. 2. Imagen del diseño preliminar del horno a escala que será utilizado para la realización de pruebas de curado.

Con el fin de minimizar la cantidad de calor disipado al ambiente a través de las paredes se instalaron un aislamiento térmico al interior del horno, este aislamiento tiene un espesor aproximado de 2.5 cm. La selección del aislamiento se realizó teniendo en cuenta sus propiedades térmicas, tales como coeficiente de conducción térmica, facilidad de instalación (o aplicación) y costo del mismo.

Para determinar la cantidad de biogás que es preciso generar para poder realizar el proceso de curado en el horno prototipo partió de la información recopilada producto de la experiencia de las personas dedicadas a esta actividad, quienes manifiestan que para un horno con un volumen aproximado de 333 m<sup>3</sup> se requiere de 25.8 a 43.0 MBTU<sup>1</sup>, dado que el prototipo a construir tendrá un volumen aproximado de 45.8 m<sup>3</sup>, se calculó que la energía requerida para realizar el proceso de curado será de 3.6 a 5.9 MBTU. Dado que el valor calorífico inferior del metano es de 21520 BTU/lbm y la concentración del mismo en el biogás es aproximadamente del 65%, se estima que la cantidad de metano requerida para realizar el proceso completo de curado es de 3.41 m<sup>3</sup>.

### 3.3 Sistema de captación de biogás

El diseño del sistema de captación de biogás es el punto de mayor investigación e innovación tecnológica puesto que aquí radica el objeto principal de la investigación. Hasta el momento el proyecto está en la fase de realización de pruebas de compresión y proceso de curado de Tabaco con el nuevo sistema energía, el cual no se tiene resultados aun, en la figura 3 se presenta el diseño del sistema de compresión que se implementará.

<sup>1</sup> Representados en 12 a 20 pipetas de gas propano de 100 libras.

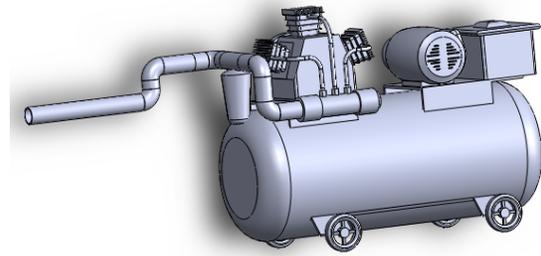


Fig. 3. Sistema de Compresión de Biogás

La construcción del sistema prototipo de captación de biogás está representado por un sistema de seguridad (gasómetro) encargado de almacenar el biogás generado, contara con un sensor que permita conocer la cantidad de gas que tiene el tanque; además, el sistema *scrubber* es una alternativa que permitirá realizar una limpieza al biogás generado durante el proceso de biometanización. (Eliminación de trazas de azufre y CO<sub>2</sub>).

### 3.4 Monitoreo de horno

Con el fin de obtener la mayor cantidad de información posible del proceso y conseguir una mejor caracterización térmica del horno tomado como referencia, se procedió a medir las temperaturas exteriores del mismo con el propósito de determinar la cantidad aproximada de calor que se transfiere hacia el ambiente.

Se realizó un enmallado sobre la superficie del horno en cada una de sus caras expuestas con el fin de determinar la temperatura en puntos discretos del mismo y extrapolar dicha medición a su área aferente, de esta forma se consiguió mejorar la precisión de los cálculos realizados con instrumentos discretos.

se estima el nivel de pérdidas de calor en las paredes del horno que sirvió como modelo de medición, sin embargo, cabe aclarar que el criterio de cálculo de dichas pérdidas ha sido bastante conservativo, por lo que los resultados obtenidos pudieran estar muy por debajo de los resultados reales, esto debido a la fuerte influencia que ejerce la velocidad del aire sobre la los coeficientes de convección, valor que aumenta enormemente con incrementos apenas notorios en la velocidad; por esta razón, los resultados obtenidos deberán ser referenciados como cantidades mínimas de calor perdido hacia el ambiente.

#### 4. RESULTADOS ESPERADOS

El grupo de trabajo que intervienen en el proyecto tiene la expectativa en los siguientes resultados:

- Antes de hacer efectivo el montaje del equipo y cada una de sus partes, se procede a la realización de las pruebas técnico-operativa de pre-implantación, esta permitirá identificar posibles puntos críticos y modificaciones si se requiere; con esta actividad se realizará la validación técnica respectiva.
- En la validación técnica, se implementarán los resultados de la etapa anterior, a través de una serie de pruebas que se desarrollarán directamente en los sistemas construidos.

Estas acciones se caracterizan por:

**Pruebas preliminares:** se verificará el correcto funcionamiento y la interacción entre los componentes para el fin específico, comprobando niveles de producción de biogás, niveles de captación en el sistema de captador. La ejecución de pruebas y ensayos de operaciones otorgaran el correcto funcionamiento del sistema prototipo, estas labores estarán reflejadas en la resistencia termo-mecánica del equipo generador y recolector de gas, junto con el horno FLUE CURED.

**Pruebas prototipos finales:** en esta etapa se integrarán todos los componentes de dispositivos creados para así ajustar las condiciones de uso, realizando distintas pruebas de curado en las zona escogida por el beneficiario, estas pruebas deben dar como resultado la eficiencia del proceso de curado al método actual o mejorada, y así lograr el total desempeño de las partes del prototipo propuesto, llevando a condiciones extremas de funcionamiento, chequeando la fiabilidad en el uso del equipo y analizando la confiabilidad dada por el dispositivo, corrigiendo las fallas presentadas.

**Mejoras al prototipo:** ejecución de mejoras y rediseño al prototipo con base a los resultados de las pruebas preliminares.

**Ajustes del equipo:** se llevará a cabo una revisión minuciosa de todos los componentes a los prototipos, con el fin de determinar las fallas existentes y poder implementar los ajustes apropiados. Se atenderán las observaciones realizadas por los técnicos expertos en el proceso de curado tabaco Virginia y los productores, con el fin de ejecutar las debidas correcciones al prototipo y lograr su óptimo funcionamiento.

**Validación de las pruebas:** el proceso de validación se hará de acuerdo a los criterios de control técnico de las diferentes normas que se establecen en el curado de tabaco Virginia. Además, estas pruebas se llevaran a cabo con los técnicos de la empresa beneficiaria, y así poder confrontar los resultados con métodos clásicos y empíricos.

**Prototipo final:** teniendo en cuenta los resultados obtenidos y evaluados en las etapas anteriores se procede al montaje final con todos los accesorios requeridos para un buen aspecto físico y funcional del prototipo.

#### 5. CONCLUSIONES

El proceso de articulación del presente proyecto ya se ha iniciado, por cuanto a su formulación han participado el beneficiario *Phillis Morris COLTABACO*. Con esta labor se espera tener un fortalecimiento de los lazos de cooperación, para ampliar las alianzas estratégicas entre universidad, empresa, pues no presenta una amenaza para estas, en razón a que la innovación tecnológica propende por aumentar las posibilidades de comercialización.

Adicionalmente el prototipo se presentará junto con sus manuales técnicos de operación, y posteriormente se establecerá jornadas de socialización sobre los resultados del prototipo a los productores en los Departamentos de Santander y Huila.

#### REFERENCIAS

- [1]. Documento Cadena Productiva del Tabaco en Colombia, 2009.
- [2]. Biodigestores de Bajo Costo para la Producción de Combustible a Partir de Excretas. Manual Para su Instalación, Operación y Utilización. Botero., R. Preston., T. 1987.
- [3]. Termodinámica para Ingenieros, Potter C. Merle. Somerton W Craig