

**ESTUDIO DE VIABILIDAD DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES EN ESTUFAS  
DE GASIFICACIÓN**

**MARCO ANDRÉS MARTÍNEZ PÉREZ  
JAIR EDILSON OROSCO MARTÍNEZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2016**

**ESTUDIO DE VIABILIDAD DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES EN ESTUFAS  
DE GASIFICACIÓN**

**MARCO ANDRÉS MARTÍNEZ PÉREZ  
JAIR EDILSON OROSCO MARTÍNEZ**

**Trabajo de grado para optar al título de  
Ingeniero Químico**

**Director:  
MARÍA PAOLA MARADEI GARCÍA  
Ing. Química Ph.D.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2016**

## DEDICATORIA

*A Dios, porque siempre está a mi lado, ayudándome y dándome fuerzas para no decaer, y porque a pesar de las adversidades me permitió culminar mi formación profesional.*

*A mi madre CELIMAR PÉREZ, por siempre confiar en mí, por siempre estar a mi lado y ayudarme en los momentos más difíciles, por aconsejarme y guiarme para ser la persona que soy, con paciencia y dedicación, Por eso eres la mejor mamá del mundo.*

*A mi Padre ARGEMIRO MARTINEZ por ser ese apoyo que todos necesitamos, ese guía que a través del tiempo siempre mira las cosas desde el lado positivo, y por enseñarme que el trabajo y la perseverancia, es la mejor solución cuando queremos cumplir nuestros sueños. Gracias por ser el súper papá.*

*A mis hermanos IVAN, DUVAN Y KAROLL porque siempre están cuando más los necesito. Sin ustedes no habría felicidad completa.*

*A mi FAMILIA en general, por el apoyo, los consejos, y por enseñarme que la honestidad y el respeto son los valores más fundamentales en la vida.*

*A mi novia, JESSICA FRANCO, por ser ese apoyo durante este proceso, por brindarme palabras de aliento cuando pensé en caer, por los abrazos que necesitaba cuando mi familia estaba lejos, y por hacerme feliz durante todo este tiempo.*

*A mis amigos Jair y Jorge, porque con su ayuda y compañía hicieron este camino mucho más fácil y divertido. Porque nuestra ley es siempre sonreírle a la vida.*

**Marco Andrés Martínez Pérez.**

## DEDICATORIA

*A Dios, a mis padres Daniel y Omaira por su apoyo incondicional, sus voces de aliento y su cariño, sin ellos este logro no sería posible.*

*A mis hermanos Julián y Alejo por su apoyo y por todos los buenos momentos compartidos hasta el día de hoy.*

*A cada una de las personas de mi familia que han estado presentes en mi proceso como estudiante, un abrazo incondicional para todos ellos.*

*A mis compañeros, Marco y Jorge quienes han estado en las buenas y en las malas durante los 37 semestres.*

**Jair Edilson Orosco Martínez.**

## **AGRADECIMIENTO**

Los autores expresan sus agradecimientos a:

A Dios, por permitir en nombre de su palabra terminar este sueño, por formarnos como unos profesionales, y por alentarnos para llegar hasta acá.

A la Profesora Paola Maradei, por su dedicación, guía, y sugerencias durante la realización de este trabajo.

A Lylian Rodríguez, por su gestión para llevar a cabo las actividades permanentes en este proyecto en la fundación. Lo cual fue la clave para el cumplimiento de los objetivos planteados en este proyecto.

## TABLA DE CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN .....	17
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	19
2. JUSTIFICACIÓN .....	20
3. OBJETIVOS DEL TRABAJO.....	21
3.1 OBJETIVO GENERAL .....	21
3.1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	21
4. FUNDACIÓN PARA LA PRODUCCIÓN AGROPECUARIA TROPICAL SOSTENIBLE (UTA) .....	22
5. MARCO CONCEPTUAL .....	23
5.1 ¿QUÉ ES LA BIOMASA? .....	23
5.2 EL PROCESO DE GASIFICACIÓN .....	23
5.3 ESTUFAS GASIFICADORAS .....	24

5.3.1	Gasificador fluid (encendido desde arriba).....	24
6	METODOLOGÍA.....	26
6.1	SELECCIÓN DE LA BIOMASA Y DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD	26
6.1.1	Selección de la biomasa .....	26
6.1.2	Contenido de humedad .....	27
6.2	SELECCIÓN DEL PROTOTIPO DE ESTUFA GASIFICADORA.....	27
6.3	IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOCOLO WBT .....	27
6.4	DISEÑO EXPERIMENTAL .....	30
7	ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	32
7.1	SELECCIÓN DE LA BIOMASA Y DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD	32
7.1.1	Selección de la biomasa .....	32
7.1.2	Análisis de humedad .....	33
7.2	SELECCIÓN DEL PROTOTIPO DE ESTUFA GASIFICADORA.....	33
7.3	ANÁLISIS DEL PROTOCOLO WBT .....	34

7.4	ANÁLISIS DEL DISEÑO EXPERIMENTAL .....	37
8	CONCLUSIONES.....	40
9	RECOMENDACIONES .....	41
	CITAS .....	42
	BIBLIOGRAFÍA.....	45
	ANEXOS .....	47

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Principio básico de un gasificador pirolítico TLUD. ....	25
Figura 2. Diagrama de pasos para el procedimiento del estudio .....	26
Figura 3. Descripción del prototipo de estufa y sistema de suministro de energía.	34

## LISTA DE TABLAS

**Pág.**

Tabla 1. Consumo de biomasa y eficiencia térmica en función del flujo de aire primario y de la biomasa utilizada como combustible .....	35
Tabla 2. Análisis próximo en base seca de las biomosas seleccionadas. ....	35
Tabla 3. Masa de biocarbón producido en función del flujo de aire primario para cada biomasa seleccionada. ....	37
Tabla 4. Análisis de varianza del primer experimento.....	38
Tabla 5. Análisis de varianza del segundo experimento. ....	39

## LISTA DE ANEXOS

**Pág.**

Anexo A. Bitácora y hoja de cálculo del protocolo WBT. ....48

## RESUMEN

**TITULO:** ESTUDIO DE VIABILIDAD DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES EN ESTUFAS DE GASIFICACIÓN\*

**AUTORES:** MARCO ANDRÉS MARTÍNEZ PÉREZ\*\*  
JAIR EDILSON OROSCO MARTÍNEZ

**PALABRAS CLAVES:** BIOMASA, GASIFICACIÓN, ESTUFA GASIFICADORA, UPDRAFT, EFICIENCIA TÉRMICA.

### DESCRIPCIÓN:

Se realizó un estudio de viabilidad para la implementación de estufas gasificadoras para la cocción de alimentos en la finca TOSOLY en colaboración con la Fundación para la producción Agropecuaria Tropical Sostenible – UTA en el municipio de Guapotá (Santander). Se evaluó la eficiencia térmica usando el protocolo de ebullición de agua, versión 4.2.3 (WBT, por sus siglas en inglés), de un prototipo de estufa gasificadora de convección forzada con que dispone la Fundación usando como combustible tallos de café y bagazo de caña. Las estufas gasificadoras ofrecen beneficios para su uso en la cocción de alimentos, ya que son capaces de quemar el gas sin producción de humo, a diferencia de la quema convencional de combustible sólido. El protocolo WBT es una prueba de simulación simple del proceso de cocción con la finalidad de medir cuán eficiente es una estufa en utilizar combustible para calentar agua en una olla, además, esta prueba permite determinar la cantidad de emisiones producidas durante el proceso. El diseño de experimento factorial ejecutado permitió encontrar la mejor combinación de variables de operación para la maximización de la eficiencia térmica del proceso. Se estudió la influencia de variables como: tipo de biomasa, flujo de aire y tamaño de partículas. Igualmente, se consideró la influencia de la humedad de la biomasa seleccionadas en función del proceso de secado tradicional realizado en el invernadero de la finca.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: María Paola Maradei García, Ing. Química Ph.D.

## ABSTRACT

**TITLE:** VIABILITY STUDY ON AGRO-INDUSTRIAL RESIDUES GASIFICATION STOVES<sup>\*</sup>

**AUTHORS:** MARCO ANDRÉS MARTÍNEZ PÉREZ<sup>\*\*</sup>  
JAIR EDILSON OROSCO MARTÍNEZ

**KEYWORDS:** BIOMASS, GASIFICATION, GASIFIER STOVE, UPDRAFT, THERMIC EFFICIENCY.

### DESCRIPTION:

A viability study for evaluate the implementation of gasifier stoves for food cooking was carried out in the TOSOLY Ecological Farm, in association with the “Foundation for Tropical Sustainable Agriculture Production – UTA” in the town of Guapotá (Santander). The thermal efficiency - measured with the Boiling Water Test protocol (WBT) in its version 4.2.3 – of a forced convection gasifier stove prototype was evaluated using coffee stems and sugarcane bagasse as fuel.

The gasifier stoves offer several advantages for use in cooking, as they are able to burn gas without producing smoke unlike the conventional solid fuel burning. The Water Boiling Test protocol consists in a basic simulation of the cooking process in order to measure how efficiently a stove uses the fuel to heat the water into a pot; this test also can determine the amount of emissions produced during the process. The factorial design experiment allowed to find the best variable combination in order to maximize the thermal efficiency of the process. The influence of variables such as biomass type, air flow and particle size was evaluated during the design. It was also considered the influence of the moisture in the biomass selected in relation with the traditional dry process carried out in the farm greenhouse.

---

<sup>\*</sup> Undergraduate thesis

<sup>\*\*</sup> Physicochemical Engineering Faculty. Chemical Engineering. Director: María Paola Maradei García, Chemical Engineer Ph.D.

## INTRODUCCIÓN

La cocción de alimentos es fundamental para todos los seres humanos, este proceso brinda beneficios para la salud de las personas al eliminar gran cantidad de bacterias ayudando a mejorar las propiedades organolépticas de los alimentos. La forma de cocinar en las zonas rurales del país es, por lo general, utilizando estufas tradicionales con combustibles sólidos de biomasa residual. Estos sistemas de cocción de alimentos cuentan con baja eficiencia térmica, gran consumo de combustible y liberan grandes cantidades de gases al medio ambiente. Además, es conocido que esta forma de cocinar aumenta los riesgos para la salud, especialmente para las mujeres y niños. Un mensaje slogan de la Alianza Mundial para Estufas Limpias (GACC, por sus siglas en inglés) resume el problema: ¡cocinar no debe matar! [1].

La gasificación se define como la conversión termoquímica en donde un sólido combustible es quemado y transformado en gas, el cual es aprovechado de una manera más eficiente y limpia [2]. La utilización de este principio en estufas permite el uso de diferentes tipos de biomasa como combustible y disminuye la dependencia actual en combustibles fósiles.

El uso, por lo tanto, de energías alternativas como la gasificación de la biomasa para la cocción de alimentos constituye una gran oportunidad para el desarrollo sostenible de las zonas rurales del país. Sin embargo, uno de los problemas en el uso de la biomasa como materia prima para gasificación es su variabilidad en las propiedades físico-químicas, las cuales no son homogéneas ya que depende principalmente de la composición estructural de la biomasa. Adicionalmente, variables como la humedad y el tamaño de partícula deben ser tenidos en cuenta por afectar la eficiencia térmica del proceso.

Un estudio paramétrico permitiría entonces evaluar el desempeño térmico del proceso de gasificación y ayudará a seleccionar el mejor residuo de biomasa disponible y las variables de proceso adecuadas para la cocción de alimentos.

En este estudio, la eficiencia térmica será medida según el protocolo de ebullición de agua para cocinas, WBT, desarrollado por *The Global Alliance for Clean Cookstoves* [3], éste consiste básicamente en hervir agua simulando el proceso típico de cocción de alimentos.

El estudio se realizó exclusivamente en un tipo de cocinas por microgasificación ya presentes en la finca. Se buscó alimentar estas cocinas con material lignocelulósico disponible en la finca con el fin de valorizar un actual residuo agrícola generado en la región.

## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En Colombia las principales fuentes de energía en la cocción de alimentos son el gas natural, el gas propano y la biomasa. Durante décadas y aún hoy, según cifras de Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible en Colombia, el 50% de la población rural utiliza combustibles fósiles o leña en las cocinas tradicionales.

Este tipo de estufas generan gran deforestación trayendo consigo que ciertas especies de árboles con un mayor poder calorífico estén en vía de extinción. Al problema de deforestación y extinción de algunas especies de árboles se suma el hecho de que estas estufas producen una alta tasa de contaminación debido a la liberación de copiosas cantidades de CO y otros gases venenosos al ambiente consecuencia de la baja eficiencia térmica, la cual oscila entre el 10 y 12% [4] del proceso de combustión. Adicionalmente, también se genera micropartículas (cenizas) que convierte a las cocinas tradicionales en fuentes de problemas respiratorios para las comunidades.

Por tanto, se hace necesario el desarrollo de tecnologías alternativas basadas en la utilización de biomasa residual como combustible en equipos de generación de energía altamente eficientes que permitan el aprovechamiento de todo el calor generado con baja emisión de gases nocivos y material particulado. Estas alternativas deben convertirse en una opción válida para poblaciones, especialmente las del área rural, que no cuentan con cobertura de gas natural o propano.

## 2. JUSTIFICACIÓN

La implementación de la tecnología de gasificación incrementa el rendimiento energético comparado con la combustión, reduce el consumo de la biomasa utilizada como materia prima en el proceso y las emisiones de gases tóxicos y contaminantes al ambiente.

Adicionalmente, el uso de estufas a base de gasificación puede permitir el aprovechamiento de diferentes tipos de biomásas producidos como residuos agroindustriales en zonas aledañas a los hogares (bagazo de caña, cascarilla de arroz, tallos de café, entre otros). En consecuencia, se lograría un impacto positivo en las comunidades por la concientización social de que los residuos de un proceso productivo no necesariamente deban convertirse en desecho o basura sino que puede dárseles una mejor disposición.

### **3. OBJETIVOS DEL TRABAJO**

#### **3.1 OBJETIVO GENERAL**

Estudiar la viabilidad técnica para el aprovechamiento de residuos agroindustriales en estufas gasificadoras como alternativa de suministro de calor para la cocción de alimentos en la Fundación UTA, vereda Morario, municipio de Guapotá (Santander).

#### **3.1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Seleccionar los residuos agroindustriales más apropiados para el aprovechamiento en estufas gasificadoras.
- Determinar mediante el protocolo WBT, la eficiencia térmica del prototipo de estufa gasificadora seleccionado en función del residuo agroindustrial utilizado como materia prima.
- Encontrar las condiciones óptimas de operación del sistema de microgasificación que maximicen la eficiencia térmica del proceso en función del residuo agroindustrial utilizado como materia prima.

#### **4. FUNDACIÓN PARA LA PRODUCCIÓN AGROPECUARIA TROPICAL SOSTENIBLE (UTA)**

La Fundación para la Producción Agropecuaria Tropical Sostenible - UTA tiene su sede principal en la finca TOSOLY, vereda Morario en el municipio de Guapotá (Santander). Es una entidad que contribuye a la educación de la comunidad en general ofreciendo a los estudiantes, profesionales y productores, la oportunidad de formarse de manera integral bajo la filosofía de “aprender haciendo”. La UTA basa su trabajo en el manejo de los recursos naturales como medio para suplir las necesidades de alimentos y energía en las regiones rurales del país. Sus trabajos en el campo de la energía son brindar tecnologías sostenibles enfatizando el aprovechamiento de los recursos locales.

En este sentido la UTA, desde hace algunos años, ha venido desarrollando proyectos de investigación relacionados con la generación de energía a partir de recursos renovables tales como el sol, la biomasa primaria y residual. Referente a la biomasa, ellos obtienen biogás a partir de procesos de biodigestión y gas de síntesis por medio de gasificación. Todos estos procesos se enmarcan en el desarrollo agropecuario sostenible y el interés de alcanzar la soberanía alimentaria y energética en las comunidades rurales del departamento de Santander.

## **5. MARCO CONCEPTUAL**

### **5.1 ¿QUÉ ES LA BIOMASA?**

La biomasa es cualquier material orgánico proveniente de un proceso biológico y que puede ser utilizado como fuente de energía. La biomasa puede ser residuos forestales (cortezas, ramas), residuos agropecuarios (estiércol, hojas), residuos industriales (cáscaras, pulpas de frutas y vegetales) y residuos urbanos (desechos domésticos orgánicos).

### **5.2 EL PROCESO DE GASIFICACIÓN**

Se denomina gasificación al conjunto de reacciones termoquímicas que se producen en un ambiente pobre en oxígeno y que tiene como resultado la transformación de un sólido en gases combustibles.

El rendimiento del proceso de gasificación varía dependiendo de la biomasa utilizada como combustible y el agente gaseoso que se utilice. En el proceso, la celulosa se transforma en hidrocarburos más ligeros, incluso en  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2$ . La mezcla de gases producida, conocida como gas de síntesis o “syngas” (abreviatura que nace del inglés: synthesis gas), puede tener un poder calorífico inferior (PCI) equivalente a la sexta parte del PCI del gas natural, cuando la transformación se realiza en atmósfera de aire. Otros medios gaseosos también han sido probados y reportados en la literatura, entre los que se encuentran además del aire, vapor de agua, oxígeno o hidrógeno [5].

### 5.3 ESTUFAS GASIFICADORAS

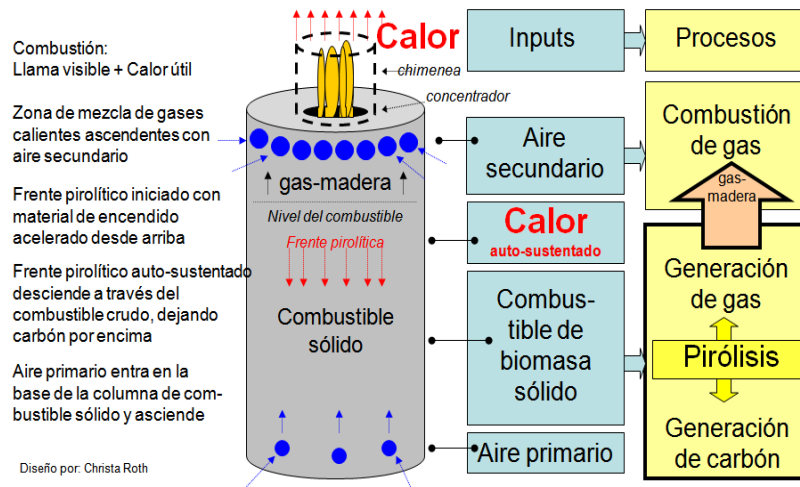
La microgasificación es una técnica benéfica en el mundo para la cocción de alimentos en lugares donde no hay acceso a gas natural. Algunos autores han diseñado prototipos de cocinas o estufas basadas en este principio. Sin embargo, el diseño de dispositivos pequeños no fue posible sino hasta 1985 cuando el *Dr. Thomas B. Reed* conceptualiza y lleva a cabo lo que hoy se llama corriente ascendente o TLUD (top-lit up-draft, por sus siglas en inglés). Para el 2004, el *Dr. Paul S. Anderson* crea un prototipo de gasificador de corriente ascendente con funcionamiento continuo llamado AVUD.

Los microgasificadores de pequeña escala ofrecen beneficios para su uso como estufa para cocción de alimentos, ya que son capaces de quemar el gas sin producción de humo, a diferencia de la quema convencional de combustible sólido. Además, pueden ser usados utilizando una amplia variedad de biomasa como combustible [6].

**5.3.1 Gasificador tlud (encendido desde arriba).** Los primeros microgasificadores conocidos de los señores *Dr. Tom Reed* y *Paal Wendelbo* son TLUDs pirolíticos los cuales permiten la producción de biocarbón a partir un frente pirolítico mantenido mediante un suministro restringido de aire primario. El principio de TLUD será explicado en la Figura 1.

La capacidad de los gasificadores para producir biocarbón (biochar) como subproducto primario de la generación de calor es de gran interés debido a que el carbón creado no se utiliza para fines térmicos que lo convierten en dióxido de carbono sino que se utiliza como abono para mejorar suelos y aumentar la producción agrícola.

Figura 1. Principio básico de un gasificador pirolítico TLUD.



Fuente: Roth, 2011 [6].

## 6 METODOLOGÍA

En la Figura 2 se observan las etapas que se llevaron a cabo para desarrollar el estudio del proceso.

### 6.1 SELECCIÓN DE LA BIOMASA Y DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD

**6.1.1 Selección de la biomasa.** La finca TOSOLY cuenta con la implementación de un sistema de agricultura integral. El objetivo del sistema es incorporar los productos y subproductos obtenidos de los cultivos y procesos en un ciclo autosostenible para tener independencia de los productos químicos utilizados en los cultivos.

Referente a los cultivos, la finca cuenta con lotes de café, caña panelera, árboles cítricos, bamboo (guadua), árboles forrajeros como botón de oro y bore, bosques naturales y zonas de pastos.

La búsqueda de la biomasa realizada para el proceso de gasificación se enfocó en tres criterios de selección: los cultivos presentes, los subproductos de los procesos agroindustriales y el tamaño de partícula.

Figura 2. Diagrama de pasos para el procedimiento del estudio



**6.1.2 Contenido de humedad.** Se tomaron muestras representativas de los dos tipos de biomásas seleccionadas en la etapa anterior, en la zona de almacenamiento de biomasa residual de la finca a diferentes días de secado (secado al ambiente no controlado). La zona de almacenamiento es un invernadero típico de secado de café, en el cual el bagazo es secado para utilizarlo en procesos de gasificación y el material leñoso es almacenado para utilizarlo como combustible en la cocina convencional.

La humedad de las muestras fue determinada por medio de un analizador de humedad AND MX-50 del laboratorio de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander. Se escogieron las biomásas que garantizaban una humedad entre 10 y 16%p, de acuerdo con lo descrito por *Belonio* [7], *Anderson y Reed* [8] para la correcta operación del sistema de microgasificación.

## **6.2 SELECCIÓN DEL PROTOTIPO DE ESTUFA GASIFICADORA**

Las pruebas experimentales se realizaron en un solo tipo de estufa gasificadora. La finca TOSOLY cuenta con dos prototipos de estufas gasificadoras de origen vietnamita de convección forzada (TLUD), un modelo del 2010 y otro del 2014 diseñados por *Paul Oliver* [9].

El modelo 2010 tiene mayor tamaño, por tanto, el consumo de biomasa es mayor en comparación con el modelo 2014. El modelo más reciente presenta parámetros de diseño que lo hace más práctico en su operación, como un quemador con protección para el viento, sistema de recolección de biocarbón y regulador de aire primario a diferencia del modelo 2010.

## **6.3 IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOCOLO WBT**

Para la medición de la eficiencia térmica se realizó la prueba de ebullición de agua o protocolo WBT (por sus siglas en inglés) en su versión 4.2.3 [10]. Esta prueba es una simulación simple del proceso de cocción con la finalidad de medir cuán eficiente es una estufa en utilizar combustible para calentar agua en una olla, además, esta prueba permite determinar la cantidad de emisiones producidas durante el proceso. El WBT consta de las siguientes tres fases:

1. Fase de alta potencia de inicio frío. Aquí el evaluador comienza con la estufa a temperatura ambiente y utiliza como combustible una carga previamente pesada hasta hervir una cantidad medida de agua en una olla estándar.
2. Fase de alta potencia de inicio caliente. Esta fase se lleva a cabo después de la primera fase, mientras la estufa está caliente. Una vez más, se utiliza una carga de combustible previamente pesado para hervir una cantidad medida de agua en una olla normal. El repetir la prueba con una estufa caliente ayuda a identificar las diferencias en el rendimiento entre una estufa cuando está fría y cuando está caliente.
3. Fase de hervir a fuego lento. Esta fase proporciona la cantidad de combustible requerido para mantener 5 L de agua por debajo del punto de ebullición durante 45 min. Este paso simula el tiempo de cocción de las legumbres o leguminosas.

Nota aclaratoria: la tercera fase no es recomendable para calcular la eficiencia térmica del proceso, un mejor indicador de rendimiento en esta fase puede ser el consumo específico de combustible.

Los ensayos experimentales se realizaron con la fase en frío y fase en caliente para cada tratamiento del diseño factorial. Durante las pruebas no se cuantificó las emisiones de gases. El tiempo requerido para realizar las fases de alta y baja potencia (inicio en frío y caliente) es de aproximadamente 2 h por cada tratamiento.

La eficiencia térmica se define como la fracción de calor producida por el combustible (biomasa) que es transferida a la olla. Por tratarse de una medida adimensional, generalmente se expresa en valores de porcentaje.

Para el reporte de los datos y su posterior análisis se utilizó una bitácora y la hoja de cálculo que recomienda el protocolo WBT (Ver Anexo A). En la bitácora se registra al inicio y final de cada fase, los datos de peso seco de cada olla, la temperatura ambiente, la temperatura de ebullición local, el peso de la biomasa, el peso del combustible iniciador, la temperatura del agua inicial, el peso del agua inicial, la temperatura final agua, el peso final agua, el peso del combustible final y el peso del carbón. Con estos datos reportados en la bitácora se calculó la eficiencia térmica de cada tratamiento del experimento con ayuda de la hoja de cálculo que proporciona el protocolo.

El modelo matemático utilizado por la hoja de cálculo para determinar la eficiencia térmica de la estufa se basa en la Ecuación 1.

$$h_c = \frac{4,186 (T_{1cf} - T_{1ci}) (P_{1ci} - P_1) + 2260 * w_{cv}}{f_{cd} * LHV} \quad \text{Ecuación 1}$$

La eficiencia térmica del proceso,  $h_c$ , se determinó con los siguientes datos:

$T_{1cf}$ : temperatura final del agua: 95 °C (la cual es la temperatura de ebullición local),

$T_{1ci}$ : temperatura inicial del agua: 20 °C,

$P_{1ci}$ : peso inicial de la olla con agua: 5,4 kg,

$P_1$ : peso de la olla vacía: 0,4 kg,

$w_{cv}$ : cantidad de agua evaporada en kg

$f_{cd}$ : cantidad de biomasa consumida en kg,

$LHV$ : poder calorífico inferior de la biomasa en kJ/kg,

Calor específico del agua: 4,186 [kJ/kg °C],

Calor latente de evaporación: 2260 [kJ/kg].

Para el cálculo de la eficiencia térmica se tuvo en cuenta la cantidad de biomasa consumida ( $f_{cd}$ ) y no la carga inicial; en este caso el consumo será la cantidad de biomasa utilizada para llevar a ebullición los 5 L de agua contenidos en la olla. Por tanto, la estufa debe ser apagada al alcanzar la temperatura de ebullición local y posteriormente pesar la biomasa restante y el carbón producido.

#### **6.4 DISEÑO EXPERIMENTAL**

Para la definición de las variables de operación que debieron ser evaluadas con el fin de maximizar el rendimiento del sistema de microgasificación a estudiar se tuvo en cuenta el estudio de *Belonio* [7], *Anderson y Reed* [8], en el cual se indican como variables más influyentes del proceso; el flujo de aire primario, la biomasa y la humedad, que en este caso se mantuvo constante en un rango de 10 a 12%p.

Teniendo en cuenta las variables de operación que recomiendan los autores se consideró el estudio del efecto combinado de dos variables (tipo de biomasa y flujo de aire primario) sobre la eficiencia térmica del proceso de gasificación.

Se diseñó un primer plan experimental factorial completo a dos factores, el factor A es el tipo de biomasa (categórico) y el factor B es el flujo de aire primario (numérico). Con dos niveles cada factor, los niveles del factor A son: tallos de café y bagazo de caña. Los niveles del factor B son: flujo de aire máximo: 3,24 m<sup>3</sup>/s y flujo de aire mínimo: 1,63 m<sup>3</sup>/s. Siendo la variable de respuesta la eficiencia térmica.

El plan experimental fue realizado de forma aleatoria y los resultados analizados en el programa MINITAB17 opción DOE. Factorial 2<sup>k</sup>. Para utilizar esta opción el plan debe contar con cuatro combinaciones posibles entre los niveles de cada factor,

realizando tres veces cada combinación para un total de doce datos de eficiencia que serán los necesarios para el análisis en el programa.

Un segundo plan experimental factorial se llevó a cabo con el fin de evaluar el efecto del tamaño de la biomasa de tallos de café, siendo esta biomasa la que obtuvo el valor más alto de eficiencia en el primer diseño realizado.

Este diseño cuenta con igual número de factores, tratamientos y réplicas del experimento anterior, manteniendo como variable de respuesta la eficiencia térmica. De igual manera se utilizó el programa MINITAB17 opción DOE. Factorial  $2^k$ .

Los dos factores del diseño fueron: factor A: tamaño de biomasa (numérico) y el factor B: flujo de aire primario (numérico). Con dos niveles cada factor, los niveles del factor A son: 5 cm y 10 cm. Los niveles del factor B son: flujo de aire máximo: 3,24 m<sup>3</sup>/s y flujo de aire mínimo: 1,63 m<sup>3</sup>/s.

## 7 ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 7.1 SELECCIÓN DE LA BIOMASA Y DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD

**7.1.1 Selección de la biomasa.** En la finca TOSOLY, los cultivos de caña panelera y café son utilizados para los procesos agroindustriales, los cultivos de árboles forrajeros se integran en la finca como alimento para animales y los cítricos son para consumo humano. Cada una de estas biomásas, genera residuos que son, algunos de ellos, reutilizados en la finca.

Por ejemplo, se utiliza el jugo obtenido del tallo de la caña de azúcar (después de pasado por una trituradora de tres rodillos) como fuente de energía para la dieta de 40 cerdos presentes en la finca. Como subproducto del proceso de trituración se obtiene el bagazo que representa aproximadamente el 40% del peso fresco del tallo. Las piezas grandes de este bagazo se separan y son utilizadas como camas para las cabras mientras que las partículas restantes, que cuentan con un tamaño de 1 a 5 cm no tienen un uso particular. Sin embargo, debido a su tamaño, éstas resultan adecuadas para el aprovechamiento en las estufas gasificadoras siendo entonces una de las biomásas seleccionadas como caso de estudio en este trabajo.

Referentes a los árboles cítricos no hacen parte de un proceso agroindustrial, su poda no es frecuente y su tamaño no es apropiado para uso en la estufa gasificadora.

En cuanto a la producción de café, la finca realiza los procesos de recolección, secado del grano y comercialización del producto (no se realizan los procesos de trillado y tostado). Como subproducto del proceso agrícola se tiene la poda de los tallos de café, que se realiza entre los 5 y 7 años de establecido el cultivo [11]. En el caso particular de la finca TOSOLY, para la poda del café se cuenta con el establecimiento de lotes de cultivos intercalados por edad, lo cual facilita el zoqueo

anual logrando tener una cantidad de biomasa constante que no está siendo valorizado en estos momentos. Por lo tanto, este residuo fue seleccionado como caso de estudio, sin embargo, como los tallos cuentan con un diámetro de 5 a 10 cm y una longitud de 2 a 4 m, se necesitó adecuar el tamaño a valores entre 5 y 10 cm para la implementación en la estufa.

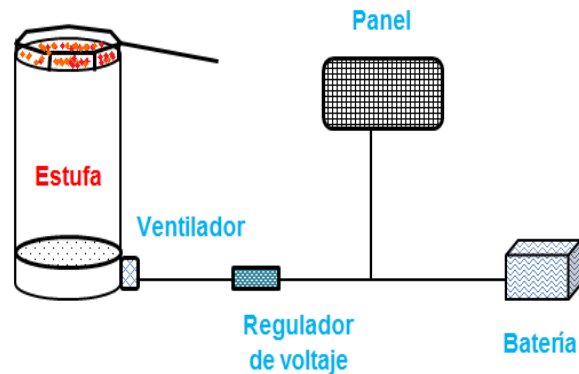
Para las biomásas de bagazo de caña y tallos de café utilizadas en el proceso de gasificación se tiene un poder calorífico inferior de 18,644 y 18,343 [kJ/kg] [12], respectivamente.

**7.1.2 Análisis de humedad.** Las muestras frescas de tallos de café y bagazo de caña de azúcar recolectadas mostraron un rango de humedad por encima del 40%p mientras que, muestras con un tiempo de secado entre una y dos semanas solo contienen alrededor de 10 a 20%p de humedad. Por lo tanto, para este estudio sólo se usaron muestras de biomasa con tiempo de secado de dos o más semanas con el fin de garantizar que el contenido de humedad este entre 10 y 12%p.

## **7.2 SELECCIÓN DEL PROTOTIPO DE ESTUFA GASIFICADORA**

El prototipo seleccionado es el modelo 2014, este diseño cuenta con un sistema de suministro de aire primario con un ventilador de 12v adaptado a un panel solar que permite la operación del equipo de manera continua e independiente de la red de suministro eléctrico en el día. Igualmente, cuenta con una pequeña batería de 12v para el funcionamiento del ventilador en la noche. Para el control de la llama en el quemador, el sistema cuenta con un regulador de voltaje que logra un control del flujo de aire primario que ingresa al sistema. A diferencia del modelo 2010 que cuenta con ventilador de 110v que solo trabaja con suministro de la red eléctrica y no cuenta con sistema de regulación del flujo de aire. La Figura 3 ilustra los diferentes componentes que presenta la estufa modelo 2014.

Figura 3. Descripción del prototipo de estufa y sistema de suministro de energía.



### 7.3 ANÁLISIS DEL PROTOCOLO WBT

El protocolo WBT nos aporta los resultados de eficiencia térmica de la estufa en la prueba dando adicionalmente datos de rendimiento; como lo es el tiempo para hervir el agua y la producción de biocarbón.

De acuerdo con la Ecuación 1, la eficiencia térmica es calculada en función tanto de la energía necesaria para calentar el agua hasta ebullición, como de la energía generada o producida por la biomasa usada como combustible. Si se considera que la energía necesaria para el calentamiento es aproximadamente igual en todos los experimentos, puesto que se utiliza la misma cantidad de agua a hervir, entonces la eficiencia depende realmente de la energía otorgada por la biomasa. Esta energía es calculada en función del poder calorífico inferior, el cual es una propiedad extrínseca. En nuestro caso, el poder calorífico es similar para las dos biombras estudiadas (aproximadamente de 18 kJ/kg [12]) lo que lleva a concluir que la eficiencia térmica dependerá de la cantidad de biomasa consumida, como se puede observar en la Tabla 1; para un mismo flujo de aire primario las mejores eficiencias

se obtienen cuando se presenta un menor consumo de biomasa. Esto puede explicarse debido a la diferencia en las propiedades químicas de cada combustible.

Tabla 1. Consumo de biomasa y eficiencia térmica en función del flujo de aire primario y de la biomasa utilizada como combustible.

Flujo de aire primario (m <sup>3</sup> /s)	Bagazo de caña	Tallos de café	Bagazo de caña	Tallos de café
	fcd, Consumo de biomasa (kg)		hc, Eficiencia térmica (%)	
Flujo mínimo: 1,63	1	0,7	16	25
Flujo máximo: 3,24	0,9	0,5	18	40

Las propiedades más influyentes de la biomasa para el proceso de gasificación son el material volátil, carbono fijo y contenido de cenizas, estas son determinadas con el análisis próximo de la biomasa (Ver Tabla 2). De acuerdo con la literatura, para la producción del gas combustible usado en las estufas de gasificación la propiedad más influyente será el material volátil que define la porción liberada de gas por calentamiento para utilizar como combustible [13]. Por tanto, el material que libere más cantidad de volátiles tendrá menor consumo de biomasa y a su vez mayor eficiencia térmica como se evidencia en los tallos de café (Ver Tabla 1).

Tabla 2. Análisis próximo en base seca de las biomosas seleccionadas.

Análisis próximo, base seca(%p)			
Biomasa	Material volátil	Carbono fijo	Cenizas
Tallos de café	83	14,5	2,5
Bagazo de caña	78,8	11,6	9,5

Fuente: Romo, 2011 [14] y García, 2011 [13].

Por otro lado, la Tabla 1 muestra la variación de la eficiencia térmica en función del flujo de aire primario para las dos biomosas estudiadas. Se observa que para una

misma biomasa, las mejores eficiencias son obtenidas cuando existe un flujo de aire primario más importante. Según varios autores como *Varunkumar* [15] y *Wang* [16], los gases combustibles producidos varían en su calidad respecto al tipo de biomasa utilizada y la cantidad de flujo de aire primario siendo los principales gases del proceso de gasificación; el H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO y CO<sub>2</sub>. Un aumento del flujo de aire produce un gas con mayor composición de H<sub>2</sub>, CO y CH<sub>4</sub>, y menor producción de CO<sub>2</sub>, ya que al aumentar el flujo de aire aumenta el arrastre de gases liberados por la biomasa y estos son mejor aprovechados ya que son quemados en el frente pirolítico de la estufa. De esta manera, al producir un gas de mejor calidad disminuye la cantidad de biomasa consumida y favorece el aumento de la eficiencia térmica [15,16].

Referente al proceso de gasificación también hay que tener en cuenta el agente gasificante ya que también afecta la calidad del gas, en nuestro caso se utilizó aire para llevar a cabo la operación de la estufa. Con el aire se obtiene un gas con PCI entre 3-5 MJ/Nm<sup>3</sup>, pero este se puede mejorar aumentando la temperatura del aire suministrado y logrando así un gas con PCI entre 6-8 MJ/Nm<sup>3</sup>. Debido a que el aumento de temperatura incrementa la producción de H<sub>2</sub>, CO y CH<sub>4</sub>, se puede entonces afirmar que la calidad del gas aumenta, e igualmente, la eficiencia térmica del proceso [17].

Respecto a la producción de biocarbón, las propiedades más influyentes serán el carbono fijo y las cenizas, ya que nos indicaran cuanto se producirá de carbón. La Tabla 3 muestra los pesos de biocarbón obtenidos. La carga inicial de bagazo de caña fue de 1 kg y 3 kg para los tallos de café. Para los dos casos la cantidad de masa de biocarbón obtenida no dependerá de la carga inicial si no de la biomasa consumida (ver Tabla 1) de tal forma que los datos de biocarbón se ajustan aproximadamente a los datos reportados en el análisis próximo (ver Tabla 2). Por tanto, las biomásas seleccionadas favorecen la producción de biocarbón para el uso agrícola en la finca TOSOLY.

Tabla 3. Masa de biocarbón producido en función del flujo de aire primario para cada biomasa seleccionada.

Masa de biocarbón producido (g)		
Biomasa	Flujo mínimo de aire primario (m <sup>3</sup> /s)	Flujo máximo de aire primario (m <sup>3</sup> /s)
Tallos de café	110	80
Bagazo de caña	180	160

Con relación a los tiempos para llevar a ebullición los 5 L de agua los datos obtenidos son de 15 minutos para los tallos de café y de 19 minutos para el bagazo de caña, esta diferencia se debe a la calidad del gas producido por las biomásas.

#### 7.4 ANÁLISIS DEL DISEÑO EXPERIMENTAL

Para el primer diseño factorial se cuenta con los datos de eficiencia térmica para cada uno de los tratamientos que se reportaron con el protocolo WBT, los cuales fueron analizados en el programa estadístico Minitab17 opción: estadística, DOE, análisis factorial. La Tabla 4 presenta el análisis de varianza donde se reportan los efectos que son estadísticamente significativos; valores p menores que el nivel de significancia ( $\alpha=0,05$ ). De acuerdo con la tabla, los efectos significativos son el factor A (tipo de biomasa) y factor B (flujo de aire primario) al igual que su interacción. Siendo fácil apreciar que los datos se ajustan a un modelo lineal con una regresión de aproximadamente 99%.

Tabla 4. Análisis de varianza del primer experimento.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	3	988.667	329.556	659.11	0.000
Lineal	2	913.667	456.833	913.67	0.000
A	1	705.333	705.333	1410.67	0.000
B	1	208.333	208.333	416.67	0.000
Interacciones de 2 términos	1	75.000	75.000	150.00	0.000
A*B	1	75.000	75.000	150.00	0.000
Error	8	4.000	0.500		
Total	11	992.667			

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0.707107	99.60%	99.45%	99.09%

Ecuación de regresión

$$C7 = 12.063 - 0.105 A + 5.176 B - 3.106 A*B$$

Para encontrar la mejor combinación de factores que aumentan la variable de respuesta del experimento, se utiliza la opción estadística, DOE, factorial, optimizador de respuesta del programa Minitab17. Este procedimiento permite maximizar la variable de respuesta del experimento. Para el caso en estudio, se recomienda entonces el uso de tallos de café a flujo máximo de aire primario. Este tipo de estufas permite un flujo de aire primario no superior a 3,5 m<sup>3</sup>/s.

El segundo diseño factorial que se realiza tiene como fin evaluar el efecto en la diferencia de tamaño de tallos de café al operar la estufa. Este será comparado bajo las mismas condiciones de flujo de aire primario del ensayo anterior. La Tabla 5 presenta el análisis de varianza donde se reportan los efectos que son estadísticamente significativos. Los factores del diseño fueron factor A (tamaño de biomasa) y factor B (flujo de aire primario), constatándose que el efecto del tamaño de biomasa no es significativo sobre la variable de respuesta.

Tabla 5. Análisis de varianza del segundo experimento.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	3	617.000	205.667	822.67	0.000
Lineal	2	616.667	308.333	1233.33	0.000
A	1	0.333	0.333	1.33	0.282
B	1	616.333	616.333	2465.33	0.000
Interacciones de 2 términos	1	0.333	0.333	1.33	0.282
A*B	1	0.333	0.333	1.33	0.282
Error	8	2.000	0.250		
Total	11	619.000			

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0.5	99.68%	99.56%	99.27%

Ecuación de regresión

$$C7 = 11.83 - 0.268 A + 8.282 B + 0.0828 A*B$$

De tal forma que el resultado del segundo plan experimental confirma que la eficiencia térmica está en función del consumo de biomasa y no del tamaño en el rango estudiado. Esto se debe a que el producto del consumo de biomasa y PCI es aproximadamente igual para ambas.

## **8 CONCLUSIONES**

El prototipo de estufa gasificadora es una alternativa conveniente para el suministro de calor para la cocción de alimentos gracias al aprovechamiento de los residuos agroindustriales (bagazo de caña, tallos de café). Los cuales son provenientes del sistema de agricultura integral sostenible y de los procesos que se realizan en la finca TOSOLY.

Gracias al protocolo WBT se evaluó la eficiencia térmica del prototipo de estufa gasificadora en función de cada uno de los residuos agroindustriales seleccionados y adicionalmente el estudio paramétrico permitió encontrar las condiciones óptimas de operación del sistema de microgasificación para lograr la mayor eficiencia térmica en las estufas. De tal manera la fundación UTA podrá contar con el reporte de datos de rendimiento del prototipo para futuros estudios.

## 9 RECOMENDACIONES

Para contar con una completa información del desempeño de la estufa gasificadora es recomendable realizar la medición de gases contaminantes implementando el protocolo de ebullición de agua o WBT.

Para aumentar la eficiencia térmica se recomienda realizar una reforma de diseño al prototipo de estufa, el cual deberá contar con una doble chaqueta con el fin de utilizar el calor generado por la estufa para aumentar la temperatura del aire suministrado por el ventilador y adicionalmente aprovecharse como sistema de aislamiento térmico.

Se recomienda que para el aprovechamiento del calor residual generado en la superficie de la estufa se puedan realizar adaptaciones como calentadores de agua o sistemas de secadores de granos.

Para la selección de biomasa se recomienda utilizar residuos con alto contenido de material volátil (superior al 70%), en este sentido uno de los residuos potenciales para la implementación en estufas gasificadoras es la tusa de maíz.

## CITAS

- [1] Roth C. Micro-gasification: cooking with gas from dry biomass. 2 ed. Eschborn: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH; 2013.
- [2] Oñate D. Gasificación y biomasa “una simbiosis de futuro”. España; 2006.
- [3] The Global Alliance for Clean Cookstoves (sitio en internet). Disponible en: <http://cleancookstoves.org>. Acceso el 26 de Febrero 2015.
- [4] Concha MC, Pabón G, Ospina OL, Cerón V. Lineamientos para un programa nacional de estufas eficientes para cocción con leña. Reporte preparado para Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Bogotá, D.C.; 2015.
- [5] Damien A. LA BIOMASA: Fundamentos, Tecnologías y Aplicaciones. Madrid: A. Madrid Vicente; 2010.
- [6] Roth C. Micro-gasificación: Cocinar con gas procedente de la biomasa sólida y seca. Eschborn: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH; 2011.
- [7] Belonio AT. Rice Husk Gas Stove. Appropriate Technology Center. Department of Agricultural Engineering and Environmental Management, College of Agriculture, Central Philippine University. Iloilo City; 2005.
- [8] Anderson PS, REED TB. Biomass Gasification: Clean Residential Stoves, Commercial Power Generation, and Global Impacts, Presented to the LAMNET Project International Workshop on “Bioenergy for a Sustainable Development”. Viña del Mar; 2004.

**[9]** Oliver P. Biomass Gasification (sitio en internet). Engineering, Separation and Recycling LLC Making Waste our Greatest Resource. Disponible en: <http://esrla.com>. Acceso el 4 de Marzo 2015.

**[10]** The Global Alliance for Clean Cookstoves. WBT 4.2.3 Protocol (sitio en internet). Disponible en: <http://cleancookstoves.org/technology-and-fuels/testing/protocols.html>. Acceso el 2 de Marzo 2015.

**[11]** Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. Descripción del Proceso Productivo y del Beneficio del Café (sitio en internet). Disponible en: <https://www.federaciondecafeteros.org/static/files/8Capitulo6.pdf>. Acceso el 6 de Marzo 2015.

**[12]** Escalante H, Orduz J, Zapata HJ, Cardona MC, Duarte M. Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia. Reporte preparado para la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM); 2011

**[13]** García LE. Obtención de gas combustible a partir de la gasificación de biomasa en un reactor de lecho fijo (tesis magíster en ingeniería mecánica). Bogotá D.C., Colombia; Universidad Nacional de Colombia; 2011.

**[14]** Romo N, Toro AF, Flores LM, Cañas A. Evaluación de las propiedades fisicoquímicas y térmicas de tallos de café y su análisis económico para la producción de pellets como biocombustible sólido. Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente. 2011; 10: 79-91.

**[15]** Varunkumar S, Rajan NKS, Mukunda HS. Experimental and computational studies on gasifier based stove. Energy Conversion and Management. 2012; 53: 135-141.

**[16]** Wang X, Niu B, Deng S, Liu Y, Tan H. Optimization study on air distribution of an actual agriculture up-draft biomass gasification stove. *Energy Procedia*. 2014; 61: 2335-2338.

**[17]** Pérez J. Gasificación de biomasa, Estudios teórico-experimentales en lecho fijo equicorriente. Medellín: Editorial Universidad de Antioquia; 2009.

## BIBLIOGRAFÍA

ANDERSON PS, REED TB. Biomass Gasification: Clean Residential Stoves, Commercial Power Generation, and Global Impacts, Presented to the LAMNET Project International Workshop on “Bioenergy for a Sustainable Development”. Viña del Mar; 2004.

BELONIO AT. Rice Husk Gas Stove. Appropriate Technology Center. Department of Agricultural Engineering and Environmental Management, College of Agriculture, Central Philippine University. Iloilo City; 2005.

CONCHA MC, Pabón G, Ospina OL, Cerón V. Lineamientos para un programa nacional de estufas eficientes para cocción con leña. Reporte preparado para Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Bogotá, D.C.; 2015.

DAMIEN A. LA BIOMASA: Fundamentos, Tecnologías y Aplicaciones. Madrid: A. Madrid Vicente; 2010.

ESCALANTE Humberto, *et. al.* Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia. Reporte preparado para la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM); 2011

OÑATE D. Gasificación y biomasa “una simbiosis de futuro”. Madrid, 2006.

ROTH C. Micro-gasificación: Cocinar con gas procedente de la biomasa sólida y seca. Eschborn: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH; 2011.

ROTH C. Micro-gasification: cooking with gas from dry biomass. 2 ed. Eschborn: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH; 2013.

VARUNKUMAR S, Rajan NKS, Mukunda HS. Experimental and computational studies on gasifier based stove. Energy Conversion and Management. 2012; 53: 135-141.

WANG X, Niu B, Deng S, Liu Y, Tan H. Optimization study on air distribution of an actual agriculture up-draft biomass gasification stove. Energy Procedia. 2014; 61: 2335-2338.

## **ANEXOS**

## Anexo A. Bitácora y hoja de cálculo del protocolo WBT.

### Bitácora

Temperatura del aire	<input type="text"/>
Condiciones del aire	<input type="text"/>
Dimensiones del combustible	<input type="text"/>
Contenido de humedad del combustible	<input type="text"/>
Peso seco de la olla	<input type="text"/>
Peso del contenedor para el carbón	<input type="text"/>
Temperatura local de ebullición	<input type="text"/>

### FASE EN FRIO

### FASE EN CALIENTE

	Inicio	Final	Inicio	Final
Tiempo ebullición	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Peso del combustible	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Temperatura del agua	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Peso de la olla con agua	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

## Hoja de cálculo

**Fuel description**

Your general description

Fuel type

Fuel description

Average length (cm)

Cross-sectional dimensions (cm x cm)

Default values (looked up)

Gross calorific value  HHV, kJ/kg

Net calorific value  LHV, kJ/kg

Char calorific value  LHV, kJ/kg

Char carbon content

If possible, enter a calorific value from measurements of local fuel below.

Check box if you have a measured calorific value

Measured gross calorific value  HHV measured, kJ/kg

Measured net calorific value  LHV, kJ/kg

Assumed net calorific value  LHV, kJ/kg

Values to be used for tests

Gross calorific value  HHV, kJ/kg

Net calorific value  LHV, kJ/kg

Fuel carbon content  by mass

### WATER BOILING TEST - VERSION 4.2.3 - TEST #1

#### DATA AND CALCULATION FORM (for one to four pots)\*

*Shaded cells and arrows require user input; unshaded cells automatically display outputs*

#### Qualitative data

Name(s) of Tester(s)

Test Number

Date

Location

Stove type/model

Type of fuel

gray: efficiency
blue: emissions
pink: error, missing input

#### Initial Test Conditions

Data	value	units	label	Data	value	units	label
Air temperature	<input style="width: 50%;" type="text"/>	°C		Dry weight of Pot # 1 (grams)	<input style="width: 50%;" type="text"/>	g	P1
Wind conditions	<input style="width: 50%;" type="text" value="(Select from list)"/>			Dry weight of Pot # 2 (grams)	<input style="width: 50%;" type="text"/>	g	P2
Fuel dimensions	<input style="width: 50%;" type="text"/>			Dry weight of Pot # 3 (grams)	<input style="width: 50%;" type="text"/>	g	P3
Fuel moisture content (wet basis)	<input style="width: 50%;" type="text"/>	%	MC	Dry weight of Pot # 4 (grams)	<input style="width: 50%;" type="text"/>	g	P4
Gross calorific value (dry fuel)	<input style="width: 50%;" type="text" value="-"/>	kJ/kg	HHV	Weight of container for char (grams)	<input style="width: 50%;" type="text"/>	g	k
Net calorific value (dry fuel)	<input style="width: 50%;" type="text" value="-"/>	kJ/kg	LHV	Local boiling point	<input style="width: 50%;" type="text" value="-"/>	°C	T <sub>b</sub>
Effective calorific value	<input style="width: 50%;" type="text" value="-"/>	kJ/kg	EHV	Background concentrations: CO <sub>2</sub>	<input style="width: 50%;" type="text"/>	ppm	CO <sub>2,b</sub>
(accounting for fuel moisture)	<input style="width: 50%;" type="text" value="-"/>	kJ/kg		CO	<input style="width: 50%;" type="text"/>	ppm	CO <sub>2,b</sub>
Char calorific value	<input style="width: 50%;" type="text" value="-"/>	kJ/kg		PM	<input style="width: 50%;" type="text"/>	ug/m3	PM <sub>b</sub>

TEST #1		COLD START HIGH POWER			
Measurements	Units	Start		Finish: when Pot #1 boils	
		data	label	data	label
Time (in 24 hour form)	hr:min		$t_{cl}$		$t_{cf}$
Weight of fuel	g		$f_{cl}$		$f_{cf}$
Water temperature, Pot # 1	°C		$T1_{cl}$		$T1_{cf}$
Water temperature, Pot # 2	°C		$T2_{cl}$		$T2_{cf}$
Water temperature, Pot # 3	°C		$T3_{cl}$		$T3_{cf}$
Water temperature, Pot # 4	°C		$T4_{cl}$		$T4_{cf}$
Weight of Pot # 1 with water	g		$P1_{cl}$		$P1_{cf}$
Weight of Pot # 2 with water	g		$P2_{cl}$		$P2_{cf}$
Weight of Pot # 3 with water	g		$P3_{cl}$		$P3_{cf}$
Weight of Pot # 4 with water	g		$P4_{cl}$		$P4_{cf}$
Fire-starting materials (if any)	--				
Weight of charcoal+container	g				$c_c$
Average CO2	ppm				$CO2_c$
Average CO	ppm				$CO_c$
Average PM	ug/m3				$PM_c$
Average Duct Temperature	°C				$T_{cd}$
Total CO2 (if available)	g				$m_{CO2,c}$
Total CO (if available)	g				$m_{CO,c}$
Total PM (if available)	g				$m_{PM,c}$

Calculations/Results	Units	COLD START		HOT START	
		data	label	data	label
Fuel consumed (moist)	g	-	$f_{cm}$	-	$f_{hm}$
Net change in char during test	g	-	$\Delta C_c$	-	$\Delta C_h$
Equivalent dry fuel consumed	g		$f_{cd}$		$f_{hd}$
Water vaporized from all pots	g	-	$W_{cv}$	-	$W_{hv}$
Effective mass of water boiled	g		$W_{cr}$		$W_{hr}$
Time to boil Pot # 1	min	-	$\Delta t_c$	-	$\Delta t_h$
Temp-corr time to boil Pot # 1	min		$\Delta t_c^T$		$\Delta t_h^T$
Thermal efficiency	%		$h_c$		$h_h$
Burning rate	g/min		$r_{cb}$		$r_{hb}$
Specific fuel consumption	g/liter boiled		$SC_c$		$SC_h$
Temp-corr sp consumption	g/liter		$SC_c^T$		$SC_h^T$
Temp-corr sp energy consumpt.	kJ/liter		$SE_c^T$		$SE_h^T$
Firepower	watts		$FP_c$		$FP_h$