



**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA**

**INSTITUTO DE INGENIERÍA ENERGÉTICA**

**PROGRAMA DE DOCTORADO EN INGENIERÍA Y  
PRODUCCIÓN INDUSTRIAL**

**ESTUDIO DE LA OPTIMIZACIÓN DE ESTUFAS DE COCCION  
TRADICIONALES EMPLEADAS EN PAISES EN DESARROLLO  
UTILIZANDO BIOMASA LEÑA GASIFICADA (APLICADO A LA  
R.D.CONGO).**

**TESIS DOCTORAL**

**Autor: D. Oscar MULUMBA ILUNGA**

**Director: Dr. D. ELIAS HURTADO PEREZ**

**Valencia, Enero 2021**





- *Epígrafe*

*« La ciencia es un gran océano y cada tesis doctoral, una pequeña gota de agua en el gran océano ».*





- ***Dedicación***

A **YHWH** *el verdadero Dios y Salvador. El que es más que Salomón (Mt.12:42), él que es el gran doctor de todos los tiempos (Jn.3:2), que reciba aquí una dedicación especial y absoluta.*

A mi esposa **Esther Kuyi Ngalasa** y a mis hijos: **Gabriella Mbiya Mulumba, Anne-marie Mpemba Mulumba, Isaac Mulumba Ilunga** y **Benisha Kuyi Mulumba** *por sus sacrificios durante muchos años de ausencia de formación en Valencia.*





## Agradecimientos

*Un trabajo de investigación no puede hacerse literalmente solo. Hay personas que han contribuido físicamente, científicamente, moralmente o espiritualmente al éxito de este trabajo. No podemos dejar de mostrar nuestra gratitud a todos ellas.*

*Nuestra gratitud va al profesor **Elías Hurtado Pérez**, quien a pesar de sus múltiples obligaciones académicas y carga personal, ha aceptado dirigir esta tesis doctoral. Ha sido paciente y motivador con nosotros. Que encuentre en estas pocas líneas la expresión de nuestra gratitud.*

*El profesor emérito **Ángel Navarro**, cuando normalmente debería estar descansando después de haber trabajado mucho para la comunidad científica de la UPV y el mundo en general, ha dedicado mucho tiempo a leer y corregir minuciosamente y con un ojo agudo nuestros diversos borradores de publicaciones. Le estamos muy agradecidos.*

*El profesor **André Bandekela Kazadi** ha sido un verdadero padre científico para nosotros. Nos aceptó durante mucho tiempo como su asistente y nos admitió en este proyecto de la UPV, siendo él mismo el iniciador, aunque a veces sin querer aparecer, que el cielo bendiga a su descendencia por todo lo que ha hecho por nosotros.*

*Muchos colegas de la UPV nos han ayudado de muchas maneras. Pienso en primer lugar al **Dr. Rubén Puche**. Es el primero en enseñarnos con corazón, suave y silenciosamente, cómo manejar la plataforma de intranet de la UPV y a dominar algunas herramientas informáticas de búsquedas útiles para la investigación. El **Dr. David Alfonso solar** ha sido muy cortés con nosotros. Ha sido muy útil en los diversos trabajos sobre la caracterización de los biocombustibles sólidos alternativos. **Xavier** estaba muy cerca de nosotros, fue el primero en programar nuestros ordenadores, su comodidad moral era permanente. Nuestro agradecimiento a la **Dra. Elisa Peñalvo López** y al **Dr. Javier Cárcel carrasco** por sus apoyos en la publicación de los trabajos.*

*Cinco héroes en las sombras han contribuido al éxito de este trabajo. Porque sin su apoyo espiritual y moral, este trabajo apeararía. Cito: Pastor **Israël Kaboza**, Pastor **Philippe Mukendi**, Pastor **Mako** y Pastor **José Obandani** y el hermano **Daniel Mulumba Nzongola**.*

*Mi esposa, **Esther KUYI**, se merece el sombrero grande: moralmente, espiritualmente, financieramente y científicamente (porque contribuyó mucho a las pruebas experimentales de CCT y WBT de los diferentes diseños de estufas para cocinar), siempre estuvo lista hasta el éxito final.*





- ***Abreviaciones y acrónimos utilizados en este trabajo.***

ANSI: Instituto Nacional Estadounidense de Estándares (American National Standards Institute),

AP: Alta potencia (High power)

APF: Alta potencia arranque a frio

APC: Alta potencia arranque en caliente

BAU: Business as Usual (escenario referencial)

BC: Hollín o carbón negro (Black carbón)

BP: baja potencia (Low power)

BSW: briqueta de residuos agrícolas sólidos

BSSP: Protocolo de seguridad para las estufas de biomasa (Biomass stove security protocol)

CS: Estufa de cocción (Cookstoves)

CCT: prueba de cocina controlada (Controlled Cooking Test)

ER-CO<sub>2</sub>: Reducción de las emisiones de dióxido de carbono ( Emissions Reduction CO<sub>2</sub>)

ET: Eficiencia térmica

GACC: Global Alliance of the Cookstove

HHV: El valor calorífico bruto

ICS: Estufas de cocción mejoradas (Improved cookstoves)

ICS-C: Estufas de cocción mejoradas de carbón vegetal

ICS-G Estufas de cocción mejoradas de gasificación

ICS-G1: Estufas de cocción mejoradas de gasificación de un reactor

ICS-G2: Estufas de cocción mejoradas de gasificación de dos reactores

IAP: contaminación de aire interior (Indoor Air Pollution)

IAQ: Calidad de aire interior (Indoor Air Quality)

IWA: International Workshop Agreement/ISO

KPT: prueba de rendimiento de cocina (Kitchen Performance Test)

LHV: El poder calorífico inferior

PM: partículas finas (Particles Matter)

PEMS: Portable Emissions Measurement Standard

RDC: República Democrática del Congo



RCA: República Centra Africana

SDG: objetivo de desarrollo sostenible (Sustainable Development Goals )

SSA: África sub sahariana (Sub-Saharan África)

TCS: Estufa tradicional (Traditional cookstove)

TCS-3P: Estufa tradicional a 3 piedras (Traditional cookstove)

TCS-C: Estufa tradicional de carbón vegetal (Mas utilizada en Kinshasa)

TNMHC : hidrocarburos totales sin metano.

UL: Underwriters Laboratories (marca de seguridad)

UNFCCC: Convención de naciones unidas para el cambio climático

WBT: prueba de ebullición de agua (Water boiling Test)



## Resumen

Casi la mitad de la población mundial no tiene acceso a energías como la electricidad o el gas y tienen que utilizar forzosamente biomasa para cocinar, principalmente leña y carbón. Lo que en países desarrollados parece un lujo, en otros muchos es una obligación, ya que no hay otra alternativa. Con un pequeño ahorro en el combustible que utilizan estas estufas de los países sin acceso a otro tipo de energía, el resultado global es extraordinario.

En el caso de la República Democrática del Congo más del 80% de la población realiza sus actividades culinarias utilizando biomasa sólida (leña, carbón vegetal, etc.) Para cocinar en las zonas rurales y los extrarradios de las grandes ciudades se utiliza la tradicional estufa de tres piedras TCS-3P y en las zonas urbanas la tradicional estufa de carbón vegetal TCS-C. La principal desventaja de esta práctica es una combustión de baja eficiencia energética, con la consecuencia directa de un consumo excesivo de materias primas como carbón y leña y la correspondiente deforestación. Estos equipos de cocina tradicionales emiten muchos contaminantes perjudiciales para la salud (CO y PM), así como y emisiones que contribuyen al calentamiento global y al cambio climático (CO<sub>2</sub> y BC).

En este trabajo proponemos modelos para mejorar la eficiencia energética utilizando el modelo tradicional como punto de partida, tal como lo utiliza la comunidad local. Para las poblaciones que viven en condiciones muy críticas y precarias, se han propuesto "insertos de cerámica" que pueden fabricarse y añadirse a las estufas que utilizan en la actualidad. Estos insertos pueden actuar sobre el rendimiento con mejoras del 15%. Se ha propuesto y analizado una segunda mejora basada en la combustión natural de la estufa de carbón ICS-C. El modelo más prometedor es la estufa que utiliza el principio de micro gasificación de la biomasa. Se han diseñado dos modelos de esta estufa, el modelo ICS-G1 con un solo reactor de combustión y el modelo ICS-G2 con dos reactores de combustión, y se han realizado análisis de sostenibilidad con aplicación directa a las comunidades locales. El modelo de micro gasificación propuesto funciona con un suministro de aire forzado con una gran flexibilidad de variación de la potencia de fuego según el tipo de comida a cocinar. El sistema de suministro de aire es provisto por un pequeño motor alimentado por energía solar con autonomía proporcionada por una pequeña batería de litio recargable. Los modelos de gasificación muestran importantes ventajas en comparación con el sistema tradicional, mejor eficiencia energética, al necesitar menos de la mitad de leña que con la tradicional, reducciones drásticas de las emisiones contaminantes y atmosféricas, con un ahorro de emisiones de CO<sub>2</sub> en la ciudad de Kinshasa estimadas en 3405 kton/año y una reducción de casi la mitad del tiempo dedicado a la preparación de alimentos. Estas estufas pueden utilizar todo tipo de combustibles sólidos, además del carbón, se realizaron ensayos con combustibles alternativos que provienen de residuos agrícolas (BSW3) de esta forma se limita la presión ejercida sobre los bosques debido al uso de leña para cocinar.

Los métodos de prueba utilizados son la prueba de ebullición del agua y la prueba de cocción controlada, con esta última se realiza una preparación de alimentos en un ambiente controlado. Los resultados de estas mejoras se han aplicado a casos reales en Kinshasa y Bandundu.





## RESUM

Quasi la meitat de la població mundial no té accés a energies com l'electricitat o el gas i han d'utilitzar forçosament biomassa per a cuinar, principalment llenya i carbó. El que en països desenvolupats sembla un luxe, en molts altres és una obligació, ja que no hi ha una altra alternativa. Amb un xicotet estalvi en el combustible que utilitzen aquestes estufes dels països sense accés a una altra mena d'energia, el resultat global és extraordinari.

En el cas de la República Democràtica del Congo més del 80% de la població realitza les seues activitats culinàries utilitzant biomassa sòlida (llenya, carbó vegetal, etc.) Per a cuinar en les zones rurals i els extraradis de les grans ciutats s'utilitza la tradicional estufa de tres pedres (TCS-3P) i en les zones urbanes la tradicional estufa de carbó vegetal (TCS-C). El principal desavantatge d'aquesta pràctica és una combustió de baixa eficiència energètica, amb la conseqüència directa d'un consum excessiu de matèries primeres com a carbó i llenya i la corresponent desforestació. Aquests equips de cuina tradicionals emeten molts contaminants perjudicials per a la salut (CO i PM), així com i emissions que contribueixen al calfament global i al canvi climàtic (CO<sub>2</sub> i BC).

En aquest treball proposem models per a millorar l'eficiència energètica utilitzant el model tradicional com a punt de partida, tal com ho utilitza la comunitat local. Per a les poblacions que viuen en condicions molt crítiques i precàries, s'han proposat "inserir de ceràmica" que poden fabricar-se i afegir-se a les estufes que utilitzen en l'actualitat. Aquests inserits poden actuar sobre el rendiment amb millores del 15%. S'ha proposat i analitzat una segona millora basada en la combustió natural de l'estufa de carbó ICS-C. El model més prometedor és l'estufa que utilitza el principi de micro gasificació de la biomassa. S'han dissenyat dos models d'aquesta estufa, el model (ICS-G1) amb un sol reactor de combustió i el model (ICS-G2) amb dos reactors de combustió, i s'han realitzat anàlisi de sostenibilitat amb aplicació directa a les comunitats locals. El model de micro gasificació proposat funciona amb un subministrament d'aire forçat amb una gran flexibilitat de variació de la potència de foc segons la mena de menjar a cuinar. El sistema de subministrament d'aire és proveït per un xicotet motor alimentat per energia solar amb autonomia proporcionada per una xicoteta bateria de liti recarregable. Els models de gasificació mostren importants avantatges en comparació amb el sistema tradicional, millor eficiència energètica, en necessitar menys de la meitat de llenya que amb la tradicional, reduccions dràstiques de les emissions contaminants i atmosfèriques, amb un estalvi d'emissions de CO<sub>2</sub> a la ciutat de Kinshasa estimades en 3405 kton/any i una reducció de quasi la meitat del temps dedicat a la preparació d'aliments. Aquestes estufes poden utilitzar tot tipus de combustibles sòlids, a més del carbó, es van realitzar assajos amb combustibles alternatius que provenen de residus agrícoles (BSW3) d'aquesta forma es limita la pressió exercida sobre els boscos a causa de l'ús de llenya per a cuinar.

Els mètodes de prova utilitzats són la prova d'ebullició de l'aigua i la prova de cocció controlada, amb aquesta última es realitza una preparació d'aliments en un ambient controlat. Els resultats d'aquestes millores s'han aplicat a casos reals a Kinshasa i Bandundu.





## Abstract

Almost half of the world's population does not have access to energy such as electricity or gas and they have to use biomass for cooking, mainly firewood and charcoal. What in developed countries seems a luxury, in many others is an obligation, since there is no other alternative. With a small saving in the fuel used by these stoves in countries without access to other types of energy, the overall result is extraordinary. In the case of the Democratic Republic of the Congo, more than 80% of the population carries out their culinary activities using solid biomass (firewood, charcoal, etc.). The traditional stove is used to cook in rural areas and on the outskirts of large cities. three-stone TCS-3P and in urban areas the traditional TCS-C charcoal stove. The main disadvantage of this practice is low energy efficiency combustion, with the direct consequence of excessive consumption of raw materials such as coal and firewood and the corresponding deforestation. These traditional kitchen equipment emits many harmful pollutants for health (CO and PM), as well as emissions that contribute to global warming and climate change (CO<sub>2</sub> and BC). In this work we propose models to improve energy efficiency using the traditional model as a starting point, as used by the local community. For populations living in very critical and precarious conditions, "ceramic inserts" have been proposed that can be manufactured and added to the stoves they use today. These inserts can act on performance with improvements of 15%. A second improvement based on the natural combustion of the ICS-C coal stove has been proposed and analyzed. The most promising model is the stove that uses the principle of microgasification of biomass. Two models of this stove have been designed, the ICS-G1 model with a single combustion reactor and the ICS-G2 model with two combustion reactors, and sustainability analyzes have been carried out with direct application to local communities. The proposed micro gasification model works with a forced air supply with great flexibility of variation of the fire power according to the type of food to be cooked. The air supply system is provided by a small motor powered by solar energy with autonomy provided by a small rechargeable lithium battery. The gasification models show important advantages compared to the traditional system, better energy efficiency, since it requires less than half as much firewood than with the traditional system, drastic reductions in pollutant and atmospheric emissions, with savings in CO<sub>2</sub> emissions in the city of Kinshasa estimated at 3405 kton / year and a reduction of almost half the time spent on food preparation. These stoves can use all types of solid fuels, in addition to coal, tests were carried out with alternative fuels that come from agricultural residues (BSW3) in this way the pressure exerted on the forests due to the use of firewood for cooking is limited.

The test methods used are the water boiling test and the controlled cooking test, with the latter a food preparation is performed in a controlled environment. The results of these improvements have been applied to real cases in Kinshasa and Bandundu.





## ÍNDICE DE CONTENIDO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Capítulo 1. Introducción general.....</b>                                | <b>1</b>  |
| 1.1. Introducción.....  | 1         |
| 1.2. El problema de la energía en África subsahariana.....                  | 1         |
| 1.3. Energía y desarrollo sostenible.....                                   | 2         |
| 1.3. Situación de la pobreza energética en África.....                      | 2         |
| 1.4.1. Acceso al suministro de energía eléctrica en África.....             | 2         |
| 1.4.2. Un sistema energético basado principalmente en la biomasa.....       | 3         |
| 1.5. Contexto general.....  | 5         |
| 1.6. Objetivo final del trabajo.....  | 6         |
| 1.7. Proceso técnico de optimización del diseño.....                        | 7         |
| 1.8. Hipótesis de partida.....  | 7         |
| 1.9. Metodología del trabajo.....   | 8         |
| 1.10. Morfología del trabajo.....   | 8         |
| 1.11. Aportaciones científicas.....   | 10        |
| 1.12. Conclusión.....   | 12        |
| Referencias bibliográficas del capítulo 1.....                              | 13        |
| <br>  |           |
| <b>Capítulo 2. Estado del arte general sobre la estufas de cocción.....</b> | <b>17</b> |
| Preámbulo.....  | 17        |
| 2.1. Introducción.....  | 17        |
| 2.2 Revisión bibliográfica.....   | 18        |
| 2.2.1. Historia de las estufas.....   | 18        |
| 2.2.1.1. Estufas tradicionales de tres piedras.....                         | 18        |
| 2.2.1.2. Estufas mejoradas.....   | 18        |



|  |    |
|--|----|
| 2.2.2. Estufas de cocción y emisiones contaminantes.....                 | 19 |
| 2.2.3. Tecnologías y diseño de las estufas de cocción.....               | 21 |
| 2.2.4. Impactos socio-económico-ambiental y adopción de las estufas..... | 23 |
| 2.2.4.1 Difusión de las estufas y adopción efectiva por los hogares..... | 23 |
| 2.2.4.2. Estufas y deforestación.....                                    | 26 |
| 2.2.4.3. Estufas de cocción y Cambio climático.....                      | 26 |
| 2.3. Conclusión.....   | 26 |
| Referencias bibliográficas del capítulo 2.....                           | 27 |

**Capítulo 3. Los combustibles tradicionales y los combustibles alternativos.....35**

|   |    |
|---|----|
| 3.1. Preámbulo.....   | 35 |
| 3.2. Enfoque Sostenible del Aprovechamiento de los Recursos de Biomasa..... | 35 |
| 3.2.1. Enfoque no Sostenible del Sistema Actual.....                        | 35 |
| 3.2.2. Enfoque Sostenible de los Recursos de Biomasa.....                   | 36 |
| 3.3. El combustible tradicional.....  | 36 |
| 3.3.1. La leña.....   | 36 |
| 3.3.1.1 Tipos de madera o leñas.....  | 36 |
| 3.3.1.2. Propiedades físico-químicas de la madera.....                      | 37 |
| 3.3.1.4 Higroscopicidad de la madera.....                                   | 37 |
| 3.3.1.5 Contenido de ceniza de madera.....                                  | 39 |
| 3.3.1.6. La combustión de la leña.....                                      | 39 |
| 3.3.1.7. Poder calorífico del combustible.....                              | 40 |
| 3.3.1.8. Poder comburivoro.....   | 40 |
| 3.3.1.9. Poder fumígeno.....  | 40 |
| 3.3.1.10 La combustión completa del combustible.....                        | 40 |
| 3.3.2. Carbón vegetal.....  | 43 |
| 3.3.2.1 La Carbonización.....   | 43 |



|   |    |
|---|----|
| 3.3.2.2. Caracterización del carbón vegetal.....  | 44 |
| 3.3.3. La leña y carbón vegetal: un aspecto comparativo.....  | 44 |
| 3.4. Los combustibles alternativos.....   | 45 |
| 3.4.1. Problemática.....  | 45 |
| 3.4.2. Proceso de producción de briquetas biocombustibles sólidos a partir de residuos agrícolas..... | 45 |
| 3.4.2.1. Recogida y preparación de la biomasa.....  | 45 |
| 3.4.2.2. Pirolisis o carbonización.....   | 45 |
| 3.4.2.3. La trituración.....  | 45 |
| 3.4.2.4. La adición de un aglutinante.....  | 46 |
| 3.4.2.5. La densificación de los residuos obtenidos en briquetas de carbón.....                       | 46 |
| 3.4.2.6. Secado de briquetas.....   | 46 |
| 3.4.3. Problema de adopción de un nuevo modelo de biomasa para la cocina.....                         | 46 |
| 3.4.4. Caracterización briquetas biocombustibles.....   | 46 |
| 3.5. Conclusión.....  | 48 |
| Referencias bibliográficas del capítulo 3.....  | 49 |

## **Capítulo 4. Protocolos de prueba sobre las estufas de cocción.....55**

|   |    |
|---|----|
| 4.1. Introducción.....  | 55 |
| 4.2 Diferentes protocolos de prueba sobre las estufas de cocción.....           | 55 |
| 4.2.1 Prueba de ebullición de agua “Water Boiling Test” (WBT).....              | 56 |
| 4.2.1.1. Preámbulo.....   | 56 |
| 4.2.1.2 Proceso del WBT.....  | 56 |
| 4.2.1.3 Las disposiciones prácticas de la WBT y el desarrollo de la prueba..... | 57 |
| 4.2.1.4 Estimación de los parámetros e indicadores de rendimiento.....          | 58 |
| 4.2.2 Prueba de cocina controlada “Controlled Cooking Test” (CCT).....          | 64 |
| 4.2.2.1. Preámbulo.....   | 64 |
| 4.2.2.2. Proceso del CCT.....   | 64 |



|  |           |
|--|-----------|
| 4.2.2.3. Obtención de parámetros de rendimiento de una CCT.....  | 65        |
| 4.2.3 Prueba de rendimiento de cocina “Kitchen Performance Test” (KPT).....                                | 66        |
| 4.2.3.1 Preámbulo.....   | 66        |
| 4.2.3.2 Selección de hogares para participar en un KPT.....  | 66        |
| 4.2.3.3 Implementación de un KPT.....  | 67        |
| 4.2.3.4 Selección de comunidades para el KPT.....  | 67        |
| 4.2.4. Protocolo de seguridad para las estufas de biomasa (Biomass stove security protocol BSSP).<br>..... | 67        |
| 4.3. Metodología de cálculo para reducción de las emisiones de dióxido de carbono CO <sub>2</sub> .....    | 68        |
| 4.3.1. Preámbulo.....  | 68        |
| 4.3.2. Estimación de la reducción de CO <sub>2</sub> para la adopción de una nueva estufa ICS.....         | 68        |
| 4.3.3. Estimación de reducción de CO <sub>2</sub> para la adopción de un nuevo combustible.....            | 69        |
| 4.4. Conclusión.....   | 70        |
| Referencias bibliográficas del capítulo 4.....   | 71        |
| <b>Capítulo 5. Diseño de las estufas de cocción.....</b>   | <b>75</b> |
| Preámbulo.....   | 75        |
| 5.1. Mejoras en la eficiencia energética de las estufas domésticas.....                                    | 76        |
| 5.1.1. Cómo mejorar las estufas tradicionales.....   | 76        |
| 5.1.2. Principios para mejorar la eficiencia y reducir la contaminación.....                               | 76        |
| 5.1.2.1. Reducción de la contaminación.....  | 76        |
| 5.1.2.2. Mejora de la eficiencia energética.....   | 77        |
| 5.2. Mejora de los estufas de cocción de primera aproximación (mejora de nivel 1).....                     | 77        |
| 5.2.1. Mejoras basadas en el enfoque participativo de los usuarios primarios.....                          | 77        |
| 5.2.2. Modelos de diseños propuesta.....   | 78        |
| 5.2.3. Estufa tradicional de leña con 3 piedras (TCS-3P).....  | 78        |
| 5.2.3.1. Posición del problema.....  | 78        |
| 5.2.3.2. Técnica de construcción del TCS-3P.....   | 79        |



|   |    |
|---|----|
| 5.2.3.3 Estufa tradicional de 3 piedras con Base cerámica (TCS-3P+CB).....  | 79 |
| 5.2.3.4. Diseño de la Base cerámica (CB).....   | 80 |
| 5.2.4. Estufa tradicional de carbón vegetal con combustión natural (TCS-C).....                                   | 81 |
| 5.2.4.1. Descripción de la TCS-C.....   | 81 |
| 5.2.4.2 Posición del problema.....  | 82 |
| 5.2.4.3. Mejora de la estufa tradicional de carbón vegetal mediante placas de cerámica “Ceramic plate” (CPs)..... | 82 |
| 5.2.4.4. Diseño de los CPs.....   | 82 |
| 5.2.5. Críticas a las mejoras.....  | 83 |
| 5.3. Mejora de nivel 2.....   | 83 |
| 5.3.1. Influencia del diámetro de la cámara de combustión.....  | 83 |
| 5.3.2. Determinación del diámetro medio de la olla (Do) en la zona de estudio.....                                | 84 |
| 5.3.3. Selección del diámetro óptimo de la cámara de combustión.....  | 84 |
| 5.3.4. Elección de la profundidad de la cámara de combustión.....   | 86 |
| 5.3.5. La elección de la altura de los soportes-olla (Hso).....   | 86 |
| 5.3.6. Minimización de las pérdidas laterales: aislamiento de la cámara de combustión.....                        | 87 |
| 5.3.6.1 La pared de aislamiento térmico.....  | 87 |
| 5.4. Mejora del nivel 3 de los estufas de cocción.....  | 87 |
| 5.4.1 Estufas de gasificación de la biomasa.....  | 87 |
| 5.4.1.1. Concepto.....  | 87 |
| 5.4.1.2 Principio de funcionamiento de una estufa de gasificación ICS-G1.....                                     | 88 |
| 5.4.1.3. La importancia de la gasificación de la biomasa.....   | 89 |
| 5.4.1.4. Dimensionamiento de los diferentes elementos de un ICS-G1.....   | 90 |
| 5.4.1.5. Precaentamiento del aire secundario.....   | 93 |
| 5.4.1.6 La orientación de los agujeros de entrada de aire secundarios y El aspecto arremolinado.....              | 93 |
| 5.4.1.7. El suministro de energía de la estufa ICS-G1.....  | 94 |
| 5.4.1.8. La autonomía de la estufa ICS-G1.....  | 94 |
| 5.4.1.9. Suministro multi-combustible de las ICS-G1.....  | 94 |
| 5.4.2 Estufas de gasificación de doble cámara de combustión (ICS-G2).....   | 96 |



|  |     |
|--|-----|
| 5.4.2.1 Importancia de la ICS-G2 con doble reactor.....                                | 96  |
| 5.4.2.2 Diseño de la ICS-G2.....   | 96  |
| 5.4.2.3 Las diferentes potencias de los reactores y sus dimensiones constructivas..... | 98  |
| 5.5. Equipos de Medición.....  | 98  |
| 5.6. Conclusión.....   | 99  |
| Referencias bibliográficas del capítulo 5.....   | 100 |

**Capítulo 6: Resultados y discusiones.....105**

|   |     |
|---|-----|
| 6.1 Introducción.....   | 105 |
| 6.2 Resultados de las mejoras de las estufas TCS-3P y TCS-C.....  | 105 |
| 6.2.1 Comparación de la estufa tradicional (TCS-3P) frente a la tradicional con base cerámica (TCS-3P +CB)..... | 105 |
| 6.2.2 Mejora sobre la TCS-C basada en CP.....   | 107 |
| 6.3 Resultados de la optimización de la estufa mejorada ICS-C.....  | 108 |
| 6.3.1. Optimización del diámetro de la cámara de combustión.....  | 109 |
| 6.3.2. Optimización de la altura de los soportes-olla.....  | 111 |
| 6.3.3. Profundidad de la cámara de combustión.....  | 113 |
| 6.3.4. Minimización de las pérdidas laterales.....  | 115 |
| 6.4. Comparación de las diferentes estufas de cocción en respecto con la referencia tradicional.....            | 116 |
| 6.4.1 Resultados de las mejoras entre TCS-C y ICS-C.....  | 116 |
| 6.4.1.1. Resultados de Comparación entre TCS-C y ICS-C por método WBT.....                                      | 117 |
| 6.4.1.2. Resultados de Comparación entre TCS-C y ICS-C por método CCT.....                                      | 118 |
| 6.4.2 Resultados de las mejoras entre TCS-C y ICS-G1.....   | 119 |
| 6.4.2.1. Resultados de comparación entre TCS y ICS-G1 por método WBT.....                                       | 119 |
| 6.4.2.2. Resultados de Comparación entre TCS-C y ICS-G1 por método CCT.....                                     | 120 |
| 6.4.3. Resultados de las mejoras entre ICS-C y ICS-G1.....  | 121 |
| 6.4.3.1. Resultados de Comparación entre ICS-C y ICS-G1 por método WBT.....                                     | 121 |
| 6.4.3.2. Resultados de Comparación entre ICS-C y ICS-G1 por método CCT.....                                     | 122 |



|   |            |
|---|------------|
| 6.4.4. Síntesis de las mejoras de las estufas por método WBT.....   | 123        |
| 6.4.5. Síntesis de las mejoras de las estufas por método CCT.....   | 123        |
| 6.4.4. Análisis ambientales.....  | 124        |
| 6.4.4.1. Escenario estimativo del consumo de carbón vegetal en Kinshasa con adopción de ICS-C.....                        | 124        |
| 6.4.4.2. Escenario estimativo del consumo de carbón vegetal en Kinshasa con adopción de ICS-G1.....                       | 127        |
| 6.4.4.3 Análisis de la ER-CO <sub>2</sub> en la adopción de las estufas ICS-C y ICS-G1 en la ciudad de Kinshasa.<br>..... | 129        |
| 6.4.5 Análisis de impactos socioeconómicos.....   | 129        |
| 6.4.5.1 Aspectos sociales.....  | 129        |
| 6.4.5.2 Aspectos económicos.....  | 130        |
| 6.5. Análisis de flexibilidad de las estufas.....   | 131        |
| 6.6. Análisis del nivel de seguridad de las estufas de cocción.....   | 132        |
| 6.7. Conclusión.....  | 134        |
| Referencias bibliográficas del capítulo 6.....  | 134        |
| <b>ANEXOS.....</b>  | <b>145</b> |

## INDICE DE TABLAS.

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1.1. Tasa de acceso al suministro de la energía eléctrica.....                     | 3  |
| Tabla 1.2... Acceso a la cocina limpia en África.....                                    | 5  |
| Tabla 3.1. Composición elemental de las especies de madera seca [en % en masa].....      | 37 |
| Tabla 3.2 LHV de la madera en función de la humedad [MJ/kg].....                         | 39 |
| Tabla 3.3 Los tipos de especies más utilizadas para la producción de carbón vegetal..... | 42 |
| Tabla 3.4. Características termo físicas del carbón de leña de Kinshasa.....             | 44 |
| Tabla 3.5. La dosificación de las diferentes muestras [en % de masa].....                | 47 |
| Tabla 3.6. La composición elemental de las especies BSW [en % masa].....                 | 47 |
| Tabla 3.7. Características termo físicas de las briquetas BSW.....                       | 47 |



|   |     |
|---|-----|
| Tabla 4.1. Tamaño de muestra para un KPT.....   | 66  |
| Tabla 5.1. Distancias entre la falda y la olla.....   | 77  |
| Tabla 5.2. Influencia del tamaño del diámetro de la cámara de combustión en el SFC de una estufa.....   | 84  |
| Tabla 5.3. Parámetros iniciales para la construcción de la ICS-G1.....                                  | 90  |
| Tabla 5.4. Parámetros del reactor de potencia 3 kW.....   | 92  |
| Tabla 5.5. Parámetros de diseños de reactores de las estufas.....                                       | 98  |
| Tabla 6.1. Mejora TCS-3P vs TCS-3P+CB por WBT n=3.....  | 106 |
| Tabla 6.2. Mejora TCS-3P vs TCS-3P+CB por método CCT n=3.....   | 107 |
| Tabla 6.3 Mejora TCS-C vs TCS-C+CP por WBT n=3.....   | 107 |
| Tabla 6.4. Mejora entre TCS-C y TCS-C+CP por método CCT n=3.....  | 108 |
| Tabla 6.5 Descripción de la comida seca de las pruebas de CCT.....                                      | 109 |
| Tabla 6.6. Resultados de las pruebas por el método WBT utilizando como combustible carbón vegetal.....  | 117 |
| Tabla 6.7. Resultados de las pruebas por el método WBT utilizando como combustible BSW3.....            | 117 |
| Tabla 6.8. Resultados de las pruebas por método CCT utilizando como combustible carbón vegetal....      | 118 |
| Tabla 6.9. Resultados de las pruebas por método CCT utilizando como combustible BSW3.....               | 118 |
| Tabla 6.10 Resultados de las pruebas por el método WBT utilizando como combustible carbón vegetal.....  | 119 |
| Tabla 6.11. Resultados de las pruebas por el método WBT utilizando como combustible BSW3.....           | 119 |
| Tabla 6.12. Resultados de las pruebas por el método CCT utilizando como combustible carbón vegetal..... | 120 |
| Tabla 6.13. Resultados de las pruebas por el método CCT utilizando como combustible briquetas BSW3..... | 120 |
| Tabla 6.14. Resultados de las pruebas por el método WBT utilizando como combustible carbón vegetal..... | 121 |
| Tabla 6.15. Resultados de las pruebas por el método WBT utilizando como combustible briquetas BSW3..... | 121 |
| Tabla 6.16. Resultados de las pruebas por el método CCT utilizando como combustible carbón vegetal..... | 122 |
| Tabla 6.17. Resultados de las pruebas por el método CCT utilizando como combustible briquetas BSW3..... | 122 |
| Tabla 6.18 Síntesis de las mejoras de las estufas por método CCT [%].....                               | 123 |



|   |     |
|---|-----|
| Tabla 6.19. Estimación del consumo en biomasa [100% TCS-C y 0% ICS-C].....  | 125 |
| Tabla 6.20. Estimación del consumo en biomasa [80% TCS-C y 20% ICS-C].....  | 125 |
| Tabla 6.21. Estimación del consumo en biomasa [60% TCS-C y 40% ICS-C].....  | 125 |
| Tabla 6.22. Estimación del consumo en biomasa [40% TCS-C y 60% ICS-C].....  | 126 |
| Tabla 6.23. Estimación del consumo en biomasa [20% TCS-C y 80% ICS-C].....  | 126 |
| Tabla 6.24. Estimación del consumo en biomasa [0% TCS-C y 100% ICS-C].....  | 126 |
| Tabla 6.25. Estimación del consumo en biomasa [100% TCS-C y 0% ICS-G1].....   | 127 |
| Tabla 6.26. Estimación del consumo en biomasa [80% TCS-C y 20% ICS-G1].....   | 127 |
| Tabla 6.27. Estimación del consumo en biomasa [60% TCS-C y 40% ICS-G1].....   | 128 |
| Tabla 6.28. Estimación del consumo en biomasa [40% TCS-C y 60% ICS-G1].....   | 128 |
| Tabla 6.29. Estimación del consumo en biomasa [20% TCS-C y 80% ICS-G1].....   | 128 |
| Tabla 6.30. Estimación del consumo en biomasa [0% TCS-C y 100% ICS-G1].....   | 129 |
| Tabla 6.31 Biomasa ahorrada (Bsav.) y reducciones de CO <sub>2</sub> (ER-CO <sub>2</sub> ) para las estufas de cocción..... | 129 |
| Tabla 6.32 Análisis de seguridad de la TCS-C.....   | 132 |
| Tabla 6.33. Análisis de seguridad de la TCS-3P.....   | 132 |
| Tabla 6.34. Análisis de seguridad de la ICS-C.....  | 133 |
| Tabla 6.35. Análisis de seguridad de la ICS-G1.....   | 133 |

## INDICE DE FIGURAS.

|  |    |
|--|----|
| Figura 1.1 Demanda de la energía primaria en un escenario BAU de la R.D.Congo .....  | 4  |
| Figura 2.1 Estufa con falda.....   | 22 |
| Figura 3.1. Componentes de los gases de combustión.....  | 40 |
| Figura 3.2. Briquetas BSW3 densificadas.....   | 48 |
| Figura 4.1. Proceso de un WBT.....   | 57 |
| Figura 4.2. Disposición del termopar en la olla.....   | 58 |
| Figura 5.1 Estufa TCS-3P (a) y TCS-3P +CB (b) [Fuente: Elaboración propia].....  | 79 |
| Figura 5.2. Estufa tradicional con CB (1: piedras 2: CB 3: olla 4: Leña 5: movimiento de aire hacia la zona de combustión) [Fuente: Elaboración propia]..... | 79 |



|   |     |
|---|-----|
| Figura 5.3. Disposición de CB entre las tres piedras [Fuente: Elaboración propia].....  | 80  |
| Figura 5.4. TCS y TCS-C+CPs [TCS vacío (a); TCS-C+CPs vacío (b); TCS-C+CPs cargada de carbón vegetal; TCS-C+CPs en operación (d)].....            | 81  |
| Figura 5.5 Diseño y disposición de los CPs en la TCS-C [(a) disposición de los CPs en TCS-C;(b) Diseño de los CPs;(c) fotografía de 10 CPs.]..... | 83  |
| Figura 5.6. Diámetro $D_{CC}$ en función del diámetro $D_O$ .....   | 85  |
| Figura 5.7 Altura de los soportes-olla ( $H_{so}$ ).....  | 86  |
| Figura 5.8 Factores que influyen en las pérdidas laterales en la cámara de combustión.....  | 87  |
| Figura 5.9 Proceso de una estufa de gasificación.....   | 88  |
| Figura 5.10. Descripción de la ICS-G1.....  | 89  |
| Figura 5.11. Distribución del aire en el reactor (a) Mediciones del reactor (b).....  | 92  |
| Figura 5.12 Sistema de combustión con exceso de aire.....   | 93  |
| Figura 5.13. Reactor (cámara de combustión) y la orientación de las entradas de aire primarias (AP) y secundarias (AS).....                       | 94  |
| Figura 5.14Diferentes tipos de combustibles sólidos probados en la estufa de gasificación.....  | 95  |
| Figura 5.15 Estufa ICS-G1(a) ICS-G1+panel solar (b) ISC-G1 en funcionamiento.....   | 95  |
| Figura 5.16 Plano descriptivo de una estufa de gasificación de doble reactores ICS-G2.....  | 97  |
| Figura 5.17 Estufa de gasificación de doble reactores ICS-G2.....   | 97  |
| Figura 5.18 El Portable Emission Monitoring System (PEMS).....  | 99  |
| Figura 6.1 Dependencia de la eficiencia térmica con el diámetro de la cámara de combustión por el método CCT.....                                 | 124 |
| Figura 6.2 Dependencia de la eficiencia térmica con el diámetro de la cámara de combustión por el método WBT.....                                 | 110 |
| Figura 6.3. Dependencia del consumo específico de combustible con el diámetro de la cámara de combustión por el método WBT.....                   | 111 |
| Figura 6.4. Dependencia de la eficiencia térmica con la altura de los soportes de la olla por el método CCT.....                                  | 112 |
| Figura 6.5. Dependencia de la eficiencia térmica con la altura de los soportes de la olla por el método WBT.....                                  | 112 |
| Figura 6.6. Dependencia del consumo específico de combustible con la altura de los soportes de la olla por el método WBT.....                     | 113 |



|  |            |
|--|------------|
| Figura 6.7 Dependencia de la eficiencia térmica con la profundidad de la cámara de combustión por el método CCT.....               | 114        |
| Figura 6.8 Dependencia de la eficiencia térmica con la profundidad de la cámara de combustión por el método WBT.....               | 114        |
| Figura.6.9. Dependencia del consumo específico de combustible con la profundidad de la cámara de combustión por el método WBT..... | 115        |
| Figura.6.10. Pérdidas laterales en función del espesor del aislamiento térmico.....  | 116        |
| Figura 6.11. Síntesis de las mejoras de las estufas por método WBT.....  | 123        |
| Figura 6.12. Tiempo de cocción para los diferentes tipos de estufas (método CCT).....  | 130        |
| Figura 6.13.Potencia del fuego y flexibilidad de las estufas de cocción.....   | 131        |
| Figura 7.1. Estufa ICS-C2 à cogeneración (Cocción + agua caliente sanitaria).....  | 142        |
| Figura A1 Dimensiones ICS-C.....   | <u>145</u> |
| Figura A1 Dimensiones ICS-G1.....  | <u>146</u> |
| Figura A1 Dimensiones ICS-G2.....  | <u>147</u> |





# Capítulo 1

## Introducción general





## Capítulo 1. Introducción general.

### 1.1. Introducción.

Este capítulo es una introducción general que ofrece una visión global de este trabajo de investigación. Comienza explicando el problema de la energía en el África subsahariana y, por lo tanto, establece las hipótesis iniciales que se han planteado para llevar a cabo este trabajo de investigación. El contexto y la justificación que motivaron la elección de realizar un estudio sobre la mejora de las estufas de cocción, tratando de lograr una estufa sostenible y eficiente. El objetivo final y los objetivos específicos quedan claramente definidos en esta introducción. Se detallan los métodos y procedimientos aplicados para alcanzar los objetivos finales de integración, dando una morfología general o estructura de los capítulos de la presente tesis doctoral.

### 1.2. El problema de la energía en África subsahariana.

La energía y el desarrollo sostenible están estrechamente vinculados, en particular en los países de reducidos ingresos, donde la disponibilidad de energía es esencial para promover el crecimiento socioeconómico, preservar el medio ambiente y promover la inclusión social. Este principio está recogido en la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible [1.1] y en los Objetivos de Desarrollo Sostenible. (SDG 7)[1.2]. La demanda de energía ha aumentado de manera impresionante en muchos países de bajos ingresos durante las dos últimas décadas, pero el acceso a los servicios energéticos modernos, aunque creciente, a menudo sigue estando limitado y constituye un obstáculo para el desarrollo sostenible. Así pues, el acceso a la energía es un componente esencial del desarrollo económico, social y político ya que promueve el desarrollo individual a través de la mejora de las condiciones educativas y de salud.

El África subsahariana se enfrenta a dos grandes retos energéticos: al acceso insuficiente a la electricidad y, como en el resto del planeta, al cambio climático. De hecho, la energía está en el centro de dos aspectos fundamentales del futuro de África: el desarrollo económico y social, por una parte, y el cambio climático por otra. Se debería conseguir un acceso del 100% a la electricidad y desarrollar sistemas de energías limpias para mitigar los impactos del cambio climático. El África subsahariana, con una población de más de 950 millones de habitantes, es la región más pobre del mundo en término de nivel de suministro de energía eléctrica. Más de 600 millones de personas no tienen acceso a la electricidad y los que tienen este acceso, en su mayoría están conectados a una red poco fiable que no satisface completamente sus necesidades energéticas diarias. El consumo medio anual de electricidad en el sector residencial subsahariano es de 488 kWh per cápita, es decir, alrededor del 5% del consumo estadounidense [1.3]. Esta flagrante falta de recursos energéticos, a través de la electricidad y también del gas, hace que más del 80% de la población utilice la biomasa para satisfacer sus principales necesidades en materia de cocina y



calefacción. Este uso casi total de la biomasa para cocinar conduce a muchos otros problemas como: deforestación, reducción de los recursos de biomasa disponibles, enfermedades respiratorias debidas a las emisiones contaminantes procedentes de la combustión de biomasa sólida, etc.

### **1.3. Energía y desarrollo sostenible.**

El desarrollo sostenible se ha convertido en un tema de la agenda mundial durante un período de tiempo bastante largo [1.4-1.8]. El desarrollo sostenible se definió en 1987 en el Informe Brundtland como "el desarrollo que satisface las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades" [1.9-1.10]. El trípode sobre el que se asientan los ideales del desarrollo sostenible es la reconciliación exitosa de las demandas ambientales, sociales y económicas de los seres humanos. Estos pilares no son mutuamente excluyentes, sino que se refuerzan entre ellos debido a su naturaleza superpuesta.

Aparte de las cuestiones ambientales, hay otros principios que afectan a la sostenibilidad de cualquier tipo de desarrollo y deben ser consideradas precisamente en la toma de decisiones para garantizar su desarrollo sostenible. Estos principios son [1.11-1.12]:

- Equidad: La preocupación por los pobres y los desfavorecidos;
- Futuro: La preocupación por la generación futura;
- El medio ambiente: La preocupación por la integridad de los ecosistemas;
- Participación pública: la preocupación de que el individuo tenga la oportunidad de influir en las decisiones que puedan tener consecuencias en su sociedad.

### **1.3. Situación de la pobreza energética en África.**

La situación de la pobreza energética en África puede medirse por el acceso a la energía mediante encuestas de hogares. Las encuestas de hogares suelen ser muy costosas y muchos países las realizan generalmente cada diez años, siempre y cuando tengan los medios materiales y económicos para hacerlo. Sin embargo, según el Banco Mundial, sólo 25 países de África subsahariana realizaron estas encuestas de hogares entre 2003 y 2012. De todos modos, hay dos indicadores simples para identificar la pobreza energética en África:

- La tasa de electrificación de la población;
- El acceso a la biomasa como energía para cocinar y calentar [1.13].

#### **1.4.1. Acceso al suministro de energía eléctrica en África.**

La tasa de acceso a la electricidad en el África subsahariana se ilustra en la tabla 1.1. En ella se observa la reducida electrificación existente, especialmente en las zonas rurales.

**Tabla 1. 1. Tasa de acceso al suministro de la energía eléctrica**

| Países                            | Tasa de acceso |            |            |            |            |            | Población sin acceso (millones) |
|-----------------------------------|----------------|------------|------------|------------|------------|------------|---------------------------------|
|                                   | Nacional       |            |            |            | Urbano     | Rural      |                                 |
|                                   | 2000           | 2005       | 2010       | 2016       | 2016       | 2016       | 2016                            |
| <b>África sub sahariana( SSA)</b> | <b>23%</b>     | <b>27%</b> | <b>32%</b> | <b>42%</b> | <b>71%</b> | <b>22%</b> | <b>600</b>                      |
| <b>África Central</b>             | <b>10%</b>     | <b>15%</b> | <b>21%</b> | <b>25%</b> | <b>50%</b> | <b>5%</b>  | <b>98</b>                       |
| Camerún                           | 20%            | 47%        | 49%        | 63%        | 94%        | 21%        | 9                               |
| RCA                               | 1%             | 2%         | 2%         | 3%         | 5%         | 1%         | 5                               |
| Chad                              | 2%             | 3%         | 4%         | 9%         | 32%        | 1%         | 13                              |
| Congo                             | 21%            | 23%        | 37%        | 43%        | 56%        | 16%        | 3                               |
| RD Congo                          | 7%             | 7%         | 15%        | 15%        | 35%        | 1%         | 68                              |
| Guinea Ecuatorial.                | 22%            | 25%        | 27%        | 68%        | 93%        | 48%        | <1                              |
| Gabón                             | 31%            | 46%        | 60%        | 90%        | 97%        | 38%        | <1                              |

Fuente : [1.13]

#### 1.4.2. Un sistema energético basado principalmente en la biomasa.

La bioenergía es la forma más antigua de energía que el hombre ha desarrollado y la biomasa es la principal fuente para la mayoría de la población de los países en desarrollo y principalmente en África subsahariana. Pero el uso de la biomasa para cocinar y calentar es un gran problema energético para los países en desarrollo, ya que la mayoría de las técnicas y sistemas utilizados para las tareas domésticas no son sostenibles ni eficientes. Esta falta de acceso a instalaciones de cocina limpias en los países en desarrollo afecta a más de 3.000 millones de personas [1.4] que utilizan equipos de elevado consumo energético para cocinar y calentar, alimentados por fuentes tradicionales de biomasa (incluida la madera, los residuos animales, los residuos de los cultivos, el carbón vegetal), lo que tiene graves consecuencias para la salud. Se estima en 4,3 millones de muertes prematuras al año a causa de la contaminación del aire interior debido a la combustión de la biomasa sólida. El objetivo de desarrollo sostenible “the Sustainable Development Goals” (SDG) para la energía (SDG 7) tiene por objeto garantizar el acceso universal a los combustibles y a las tecnologías limpias. Lograr este objetivo evitaría millones de muertes y mejoraría la salud y el bienestar de miles de millones de personas que utilizan tecnologías y combustibles contaminantes para cocinar, calentar e iluminar. La reducción de la carga de morbilidad asociada a la contaminación atmosférica (tanto en interiores como en exteriores) servirá para supervisar los avances hacia el Objetivo de Desarrollo Sostenible para la Salud (SDG 3).

En un escenario BAU, como se muestra en la Figura 1.1, queda evidenciado que el sistema energético de la RD Congo se basa esencialmente en la biomasa.

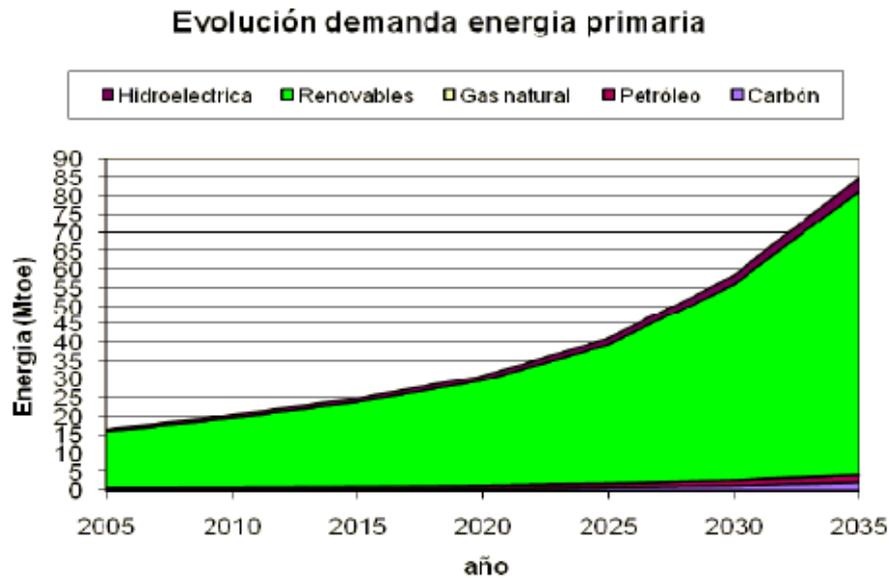


Fig.1.1.Demanda de la energía primaria en un escenario BAU de la R.D.Congo.

Fuente: [14]

La madera y sus derivados son las fuentes de energía más utilizadas por los hogares africanos, especialmente los rurales, debido a su disponibilidad y a la falta de derechos de propiedad privada sobre los recursos forestales, que los convierten en un recurso casi gratuito a nivel individual. Sin embargo, la disponibilidad de estos combustibles está disminuyendo significativamente en algunas zonas debido a su sobreexplotación, lo que obliga a las mujeres y los niños a recorrer distancias cada vez más largas para su recogida [1.15]. Además, la baja eficiencia calorífica de la biomasa aumenta enormemente el coste de su uso por caloría consumida. Por último, las malas condiciones de combustión no sólo conducen a una baja eficiencia, sino que también constituyen un peligro para la salud de la población (contribuyen en particular a la contaminación en el interior de los hogares, que es una fuente de graves enfermedades respiratorias) [1.16].

Un hogar sin acceso a una cocina limpia se define como un hogar que depende principalmente de la biomasa, el carbón o el queroseno para cocinar [1.17].

En la tabla 1.2 se indica la tasa de acceso a la cocina limpia en el África subsahariana.

**Tabla 1. 2. Acceso a la cocina limpia en África.**

| Países                            | Personas sin acceso a la cocina limpia |            |            |            | Población sin acceso | Población que depende de la biomasa |
|-----------------------------------|--|------------|------------|------------|----------------------|-------------------------------------|
|                                   |  |            |            |            | (millones)           |                                     |
|                                   | 2000                                   | 2005       | 2010       | 2015       | 2015                 | 2015                                |
| <b>África</b>                     | <b>76%</b>                             | <b>75%</b> | <b>72%</b> | <b>72%</b> | <b>848</b>           | <b>785</b>                          |
| <b>África sub sahariana (SSA)</b> | <b>91%</b>                             | <b>89%</b> | <b>86%</b> | <b>84%</b> | <b>846</b>           | <b>783</b>                          |
| <b>África Central</b>             | <b>93%</b>                             | <b>92%</b> | <b>92%</b> | <b>91%</b> | <b>116</b>           | <b>113</b>                          |
| Camerún                           | 88%                                    | 83%        | 79%        | 77%        | 18                   | 17                                  |
| RCA                               | >95%                                   | >95%       | >95%       | >95%       | 5                    | 5                                   |
| Chad                              | 94%                                    | >95%       | >95%       | 95%        | 13                   | 13                                  |
| Congo                             | 94%                                    | 93%        | 86%        | 84%        | 4                    | 3                                   |
| DR Congo                          | >95%                                   | >95%       | >95%       | >95%       | 75                   | 74                                  |
| Guinea Ecuatorial.                | 78%                                    | 78%        | 78%        | 77%        | <1                   | <1                                  |
| Gabón                             | 37%                                    | 42%        | 25%        | 15%        | <1                   | <1                                  |

Fuente :[1.13]

Ambas tablas (Tabla 1.1 y Tabla 1.2) muestran que, puesto que el acceso a la electricidad es bajo, la mayoría de las personas dependen de la biomasa como su principal fuente de energía. Por lo tanto, es necesario acelerar el acceso universal a la electricidad en África para corregir la situación de pobreza energética en la mayoría de los países. Para abordar la pobreza energética en África se requieren políticas que combinen el alivio de la pobreza con un mejor acceso a las fuentes de energía sostenible [1.18].

### 1.5. Contexto general.

El contexto general sobre la preparación de alimentos y el entorno de la cocina en los países en desarrollo y en particular en la República Democrática del Congo pueden describirse de la siguiente forma:

- Más de 80% de las necesidades energéticas provienen de la biomasa, con el impacto negativo sobre el medio ambiente, el calentamiento climático global y sus consecuencias, La deforestación y la desertificación suponen una grave amenaza para la biodiversidad y son las principales causas de la degradación de las cuencas hidrográficas y la consecuente destrucción de las reservas de agua.
- Las estufas tradicionales actualmente en uso en la RD Congo no son económicas en términos de consumo de combustible y no cumplen ninguna norma de seguridad.
- Más de la mitad de las muertes por neumonía en niños menores de 5 años se deben a la inhalación de partículas de la contaminación del aire interior [1.19].



- La estufa clásica o tradicional de biomasa-leña es la célebre y antigua estufa de tres piedras usada desde hace muchas décadas en varios pueblos de los países de África subsaharianos. El uso de las estufas tradicionales por la población tiene impactos negativos como:
  - ❖ La degradación de la cubierta vegetal y del medio ambiente;
  - ❖ El uso irracional de leña para sus necesidad de cocinar;
  - ❖ Problemas económicos en las familias, por el elevado consumo de leña;
  - ❖ El alto riesgo de incendio en las aldeas;
  - ❖ La mala gestión del tiempo y de la energía;
- La estufa tradicional clásica de carbón vegetal, su concepción y su "diseño" se diferencia de un lugar a otro. Sigue siendo una estufa tradicional clásica de carbón vegetal que tiene en común con las anteriores:
  - ❖ Pérdidas de energía significativas,
  - ❖ Grandes cantidades de emisiones de gases de efecto invernadero.
  - ❖ Grandes cantidades de emisiones nocivas en el interior de la cocina, lo que tiene un impacto negativo en la salud de las personas. Las partículas finas emitidas PM son la base de las enfermedades respiratorias, principalmente, entre las mujeres y los niños.
  - ❖ Como el aire necesario para la combustión no se canaliza en este tipo de estufa, la llama del fuego se vuelve incontrolable. Lo que constituye un peligro permanente para las cocineras y las personas próximas.

### 1.6. Objetivo final del trabajo.

El objetivo final de este trabajo es aumentar la calidad de vida de las personas que viven en países en desarrollo a través de la utilización de equipos de cocción de alimentos más eficientes y menos contaminantes. Para ello, diseñaremos y probaremos una estufa de alta eficiencia energética que cumpla con los siguientes criterios:

- Reducción del consumo de combustible
- Reducir las emisiones de contaminantes (CO y PM) que causan diversas enfermedades respiratorias mortales a la vez de que son responsables del calentamiento global y el cambio climático.
- Reducción del tiempo de cocción.
- Ahorro en los costos de compra de combustible
- Uso de varios tipos de combustibles locales en una sola estufa de cocina (leña, carbón, pellets, briquetas,...),
- Uso seguro, flexible y fácil de usar
- Tener en cuenta las costumbres culinarias locales.



### 1.7. Proceso técnico de optimización del diseño.

Así pues, en este trabajo, que trata de la optimización de la estufa tradicional utilizada en República Democrática del Congo, se han desarrollado las siguientes fases de diseños, que corresponden a mejorar sucesivas en el diseño de las estufas:

- **Mejora de nivel 1:** Desarrollar un sistema simple y mejorado basado en unas placas cerámicas extraíbles añadidas a la cámara de combustión de una estufa de cocción tradicional.
- **Mejora de nivel 2:** Desarrollar una estufa de carbón vegetal de ventilación natural de alta eficiencia energética que combina el ahorro de combustible, la reducción de las emisiones contaminantes, la reducción del tiempo de cocción y el aumento de la seguridad en la cocina.
- **Mejora de nivel 3:** - Diseñar una estufa de gasificación de biomasa de aire forzado con doble cámara de combustión con uso multi combustible, con posibilidad de utilizar madera, carbón vegetal, pellets, combustibles alternativos procedentes de residuos agrícolas, residuos de la industria maderera, etc. Que además cumplan con las siguientes características: alta eficiencia energética, ahorro de tiempo de cocción, menor emisión de contaminantes, cumplimiento de normas de seguridad y alta aceptabilidad para los usuarios primarios.

### 1.8. Hipótesis de partida.

Para alcanzar el objetivo final de este trabajo de investigación, hemos planteado las siguientes hipótesis de partidas:

- La biomasa leña es la más importante fuente de energía doméstica para muchas familias en África sub-sahariana.
- El escenario BAU de la R.D del Congo muestra una fuerte dependencia energética enfocada en biomasa-leña hasta 2035. La figura 1.1 ilustra este escenario BAU.
- Más de 80% de la población depende de la biomasa para cocinar alimentos (Tabla 1.2).
- Aproximadamente 1% en medio rural y 35% en medio urbano de la población tiene acceso al suministro de energía eléctrica (Tabla 1.1).
- El proyecto de difusión y de introducción en las costumbres locales, la utilización de las estufas mejoradas podría promover a la reducción del consumo de la leña, tendría un impacto positivo sobre la deforestación y la limitación de las emisiones nocivas para la salud (CO y PM) y las emisiones que contribuye al cambio climático y el calentamiento global (CO<sub>2</sub> y BC), y finalmente podría contribuir al desarrollo socio económico local.



- La difusión de estufas mejoradas de alta eficiencia sigue siendo una solución sencilla y rápida que requiere menos recursos materiales para su puesta en marcha.
- Una estufa mejorada que tenga en cuenta el contexto y los hábitos culinarios local será fácilmente aceptada por la población local y los hogares (usuarios finales).

### 1.9. Metodología del trabajo.

La metodología seguida para la realización del presente trabajo de investigación ha sido:

- Hacer un inventario general de la situación culinaria en la R.D del Congo principalmente, y en la ciudad de Kinshasa en particular.
- Identificación del tipo de estufas de cocción utilizadas.
- Caracterización de tipos de ollas utilizadas en los hogares.
- Caracterizar los tipos de combustible preferidos por la población local.
- Diseñar las estufas teniendo en cuenta las diferentes caracterizaciones: de la estufa tradicional, de la olla y del combustible.
- Probar las estufas según los protocolos estándares establecidos.
- Desarrollar una estufa de cocción óptima en término de economía de combustibles, baja en emisiones contaminantes y seguridad por métodos de laboratorios.
- Ensayar la estufa de cocción diseñada en condiciones real de uso, cocinando comida reales por los primeros usuarios.

### 1.10. Morfología del trabajo.

El presente trabajo tiene la siguiente estructura:

- Capítulo uno: « **Introducción general** » ofrece una visión global del trabajo. Comienza por difundir el problema de la energía en el África subsahariana. Se exponen las hipótesis iniciales de esta tesis doctoral, el contexto y la justificación que establece la elección de diseñar una cocina limpia y eficiente. El objetivo final y los objetivos específicos están claramente definidos. Se detallan los métodos y procedimientos aplicados para alcanzar los objetivos finales de integración. Al final del capítulo se incluye una estructura general de este trabajo.
- Capítulo dos: “**Estado del arte general sobre las estufas de cocción**” Este capítulo proporciona una revisión bibliográfica general de las investigaciones referentes a las estufas para cocinar en países en desarrollo. Después de la introducción y de una referencia histórica de las estufas, se discuten brevemente las diferentes tecnologías sobre el diseño de las estufas de cocción. Se ha documentado y revisado los trabajos relativos a las emisiones contaminantes debidas a las estufas



de cocción. Se han agrupado las diferentes investigaciones sobre los problemas del cambio climático y el calentamiento global debido a la combustión de biomasa en las estufas de cocción. Por último se analizan aspectos socioeconómicos y medioambientales, así como el gran problema de la aceptación de las estufas de cocción en hogares.

- Capítulo tres: **“Los Combustibles tradicionales y los combustibles alternativos”**. El capítulo 3 ofrece una visión general del combustible utilizado en las cocinas, con un enfoque en los combustibles tradicionales y alternativos. Se proporciona información básica sobre la combustión en general y la combustión de biomasa en particular, así como la carbonización de la madera. Durante varias décadas se ha demostrado que la demanda de la leña para cocinar es una de las principales causas de la degradación de los ecosistemas forestales. Hasta hace poco, esto no se consideraba en África Central, donde los recursos leñosos se suponían ilimitados. También se revisa en este capítulo la caracterización de la leña y el carbón vegetal, los dos combustibles tradicionalmente utilizados en el África subsahariana. Por último, los combustibles alternativos que se derivan del aprovechamiento energético de las miles de toneladas de residuos agrícolas y forestales mediante su transformación en briquetas y pellets de biocombustible.
- Capítulo cuatro **“Diferentes protocolos de pruebas sobre las estufas de cocción”**. Este capítulo comienza por una historia de los protocolos de prueba en laboratorio de las estufas. A continuación, se analizan estas pruebas sobre las estufas. Los protocolos que se han revisado son:
  - Prueba de ebullición de agua “Water Boiling Test” (WBT).
  - Prueba de cocina controlada “Controlled Cooking Test” (CCT).
  - Prueba de rendimiento de cocina “Kitchen Performance Test” (KPT)
  - Protocolo de seguridad para las estufas de biomasa “Biomass stove security protocol” (BSSP).
- Por último, en este capítulo se exponen claramente los métodos de cálculo de los diferentes indicadores de rendimiento y los métodos estadísticos para analizar la precisión de las mediciones realizadas.
- Capítulo cinco: **“Diseños de las estufas de cocción”**
- “ En esta parte se analizan los distintos aspectos que intervienen en la construcción de las estufas de alta eficiencia. Se explican las mejoras del rendimiento en los diferentes niveles 1, 2 y 3. En el nivel 1 se utiliza la estufa tradicional con una pequeña mejora tecnológica que afecta significativamente a la eficiencia energética. El nivel 2 se refiere a las estufas mejoradas de combustión directa con ventilación natural y con una o dos cámara de combustión. El nivel 3 se centra en el desarrollo de las estufas de gasificación de aire forzado (con un o dos rectores). Se incluyen modelizaciones de la estufa de cocción para futuras investigaciones.
- Capítulo seis: **“Resultados y discusiones”** Se presentan los diferentes resultados obtenidos de las estufas diseñadas.



- Finalmente, **una conclusión general** viene cerrar el presente trabajo de investigación. En la misma sección se proponen diferentes líneas de investigación futura para abordar el tema en futuros trabajos de investigación.

### 1.11. Aportaciones científicas.

Fruto de este trabajo de tesis ha sido la publicación de los siguientes artículos científicos:

**1° Analyse des impacts économique-environnementaux du changement d’usage d’un foyer de cuisson traditionnel par un foyer de cuisson amélioré optimisé à charbon de bois dans les ménages de la ville de Kinshasa** [1.20]. (Publicado en la revista indexada « Déchets, Sciences & Techniques”)

Elías José Hurtado Pérez, Oscar Mulumba Ilunga, María Cristina Moros Gómez et Carlos Vargas Salgado.

#### Abstract

This study is oriented to the economic and environmental impacts of the substitution in Kinshasa traditional cookstoves by improved clean cookstoves. We selected two traditional cookstoves (TCS), the TCS D27 and the TCS D23 and two improved cookstoves (ICS), the ICS 16/8/NC and the ICS 16/8/C. The test was carried out under the cooking controlled test (CCT) protocol, which is a laboratory test under strictly controlled conditions. All tests were carried out using the meal much preferred by the average and poor households of Kinshasa. To cook a dry meal of 1150g of beans and 1250g of rice, it takes 2429g of charcoal for a traditional cookstove TCS D27 and 1847g for traditional cookstove TCS D23. However, this only requires 1198g of charcoal for an improved cookstove ICS 16/8/NC and 1081g for an improved clean cookstove ICS 16/8/C. This represents fuel savings ranging from 37% to 55%. A household of 10 people in Kinshasa would spend up to \$ 48.61 per month to purchase fuel with a TCS D27 while it will only need \$ 22.01 per month for the same culinary tasks using an ICS 16/8/C.

**Mots-clés :** biomasse, bois, charbon, cuisson propre, foyer amélioré

**Keywords:** biomass, charcoal, clean cookstove, improved.

**2° Environmental Impacts (ER-CO<sub>2</sub>) of an Improved Multi-Fuel Gasifier Forced Air Cookstove in the City of Kinshasa** [1.21]. (Publicado en la revista indexada « Journal of Environmental Protection”)

Oscar Mulumba Ilunga and Hurtado Pérez Elías José



## Abstract

Sub-Saharan African countries depend 80% on the biomass-wood to meet their daily needs in terms of cooking foods. Traditional cookstoves are much more used to this effect. Many change programmes for replacing cookstove model have been planned. Yet many of these programmes have not been preceded by environmental impact studies. This work offers high-performance cookstove models and determines their impact on the reduction of CO<sub>2</sub> emissions, a very harmful greenhouse gas causing the planet warming and climate change. Replacing the traditional cookstove by an improved stove may lead to an economy in terms of fuel ranging from 33.2% to 75.4% according to the model of cookstoves. Yet the Gasifier using pellets as fuel remains the most beneficial stove in terms of fuel saving (75.4%) and in terms of ER-CO<sub>2</sub>, i.e. 2.74 t CO<sub>2</sub>/Year. An improved gasifier cookstove is multi-fuel. He can use charcoal, pellets and wood. This is an indispensable cooking tool with alternative fuels. In this work, the ER CO<sub>2</sub> was evaluated using two methods. The KPT, which is a field method and the CCT which is a laboratory method. By the KPT method a gasifier ICS/GAS/P records up to an ER-CO<sub>2</sub> of 2.74 t CO<sub>2</sub>/Year, while with the same gasifier, an ERCO<sub>2</sub> of 2.61 t CO<sub>2</sub>/year is found by the CCT method. The comparison between the two methods shows the same trend but with very high values of ERCO<sub>2</sub> for the KPT method results. The variation between the two methods ranges between 1% approximately to 6.9 percent.

**Keywords:** Improved Cookstove, Biomass, Gasifier, CO<sub>2</sub> Emissions.

**3º Evaluación de rendimiento y de sostenibilidad de una estufa mejorada de carbón vegetal por métodos WBT Y CCT. Aplicación a Bandundu (R.D. CONGO) [1.22].** (Publicado en la revista indexada «DYNA ingeniería e industria»).

Oscar Mulumba-Ilunga, Elías Hurtado-Pérez, Elisa Peñalvo-López y Francisco-Javier Cárcel- Carrasco.

## Abstract

Más del 80% de la población de los países en desarrollo utiliza madera para cocinar alimentos. La cocción se lleva a cabo utilizando estufas tradicionales (TCS) de baja eficiencia energética, lo que conduce a un consumo excesivo de combustible con consecuencias directas sobre la deforestación y los ecosistemas locales. Este trabajo consiste en el análisis de funcionamiento y realización de las pruebas necesarias de una estufa mejorada (ICS) para la sustitución del modelo TCS. Se utilizaron dos métodos de pruebas de laboratorio, la prueba de ebullición del agua (WBT 4.3.2) y la prueba de cocina controlada (CCT v.02). Los resultados muestran una clara mejora en términos de ahorro de combustible del 40.7% respecto al modelo TCS, y una reducción en emisiones contaminantes entre el 24.8 y 27.5% para el CO y entre el 18.8 y 28.3% para las PM, en las fases de alta y baja potencia, respectivamente. La reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> de la ICS se estima en 1.4 t CO<sub>2</sub> al año por familia y el ahorro económico de los hogares, por la reducción de consumo de combustible, representa al año 193.7 US\$, por hogar.



**4° Sustainable Cooking Based on a 3 kW Air-Forced Multifuel Gasification Stove Using Alternative Fuels Obtained from Agricultural Wastes** [1.23]. (Publicado en la revista indexada « Sustainability /MPDI»).

Eliás Hurtado Pérez, Oscar Mulumba Ilunga, David Alfonso Solar, Maria Cristina Moros Gómez and Paula Bastida Molina

**Abstract:** In this research work, a 3 kW stove based on biomass gasification, together with a fuel obtained from agriculture wastes as an alternative to the commonly used charcoal, have been developed looking for sustainable cooking in poor communities. Alternative fuel (BSW) are briquettes obtained by carbonization and densification of agricultural solid wastes. Two laboratory methods, water boil test (WBT) and controlled kitchen test (CCT) were used to analyze the performance of this approach by comparing the proposed improved stove (ICS-G1) with the traditional one (TCS-C), when using both types of fuels: charcoal and BSW. Results indicate that consumption of charcoal decreases by 61% using the improved ICS-G stove instead of the traditional TCS-C. Similar fuel savings are obtained when using BSW fuels. BSW fuel allows for a carbon monoxide (CO) emission reduction of 41% and 67%, and fine particles (PM) in a 84% and 93%, during the high and low power phases of the tests, respectively. Use of BSW fuel and ICS-G1 stove instead of the TCS-C stove with charcoal, provides a cooking time reduction of 18%, savings of \$353.5 per year per family in the purchase of fuel, and an emission reduction of 3.2 t CO<sub>2</sub>/year.family.

**Keywords:** cook stove; alternative fuel; gasification; sustainability.

## 1.12. Conclusión.

En este capítulo de introducción general se ha ofrecido una visión general de la tesis doctoral. Se revisó el problema de la energía en países en desarrollo, especialmente en los del África subsahariana, concluyendo el escaso acceso a la energía como se entiende en países desarrollados, (gas y electricidad) y la elevada utilización de recursos biomásicos que pueden causar elevadas desertizaciones en zonas boscosas de estos países. También se analizó el problema de las contaminaciones que producen en los hogares este tipo de combustible. Para reducir estos problemas se piensa en el diseño de estufas que reduzcan la utilización de recursos forestales y sean menos contaminantes, de esta forma se presentaron diferentes hipótesis de partida. Por último, se detallaron los objetivos y se explicaron los diferentes métodos para alcanzarlos.



### Referencias bibliográficas del capítulo 1.

- [1.1] United Nations, Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development, 2015. doi:10.1007/s13398-014-0173-7.2.
- [1.2] United Nations, Sustainable Development Goals - Goal 7, 2015. (n.d.). <http://www.un.org/sustainabledevelopment/energy/>.
- [1.3] Avila, N., Carvallo, J. P., Shaw, B. and Kammen, D. M, The energy challenge in sub-Saharan Africa: A guide for advocates and policy makers: Part 1: Providing energy for sustainable and equitable development. Oxfam Research Backgrounder series (2017): <https://www.oxfamamerica.org/static/media/files/oxfam-RAEL-energySSA-pt1- fr.pdf>.
- [1.4] Abubakari, M., Asamoah, P. and Agyemang, F. (2018) Ghana and Sustainable Development: The 40-Year National Development Plan in Retrospective. *Journal of Human Resource and Sustainability Studies*, 6, 24-36. doi: 10.4236/jhrss.2018.61024
- [1.5] Giddings, B., Hopwood, B. and O'brien, G. (2002) Environment, Economy and Society: Fitting Them Together into Sustainable Development. *Sustainable Development*, 10, 187-196. <https://doi.org/10.1002/sd.199>
- [1.6] Hopwood, B., Mellor, M. and O'Brien, G. (2005) Sustainable Development: Mapping Different Approaches. *Sustainable Development*, 13, 38-52. <https://doi.org/10.1002/sd.244>
- [1.7] Redclift, M. (2005) Sustainable Development (1987-2005): An Oxymoron Comes of Age. *Sustainable Development*, 13, 212-227. <https://doi.org/10.1002/sd.281>
- [1.8] Dempsey, N., Bramley, G., Power, S. and Brown, C. (2011) The Social Dimension of Sustainable Development: Defining Urban Social Sustainability. *Sustainable Development*, 19, 289-300. <https://doi.org/10.1002/sd.417>
- [1.9] Amasuomo, E., Hasnain, S.A. and Osanyinlusi, A.Y. (2015) Sustainable Development in the Context of Major Infrastructure Projects in United Kingdom. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 3, 44-55. <http://dx.doi.org/10.4236/gep.2015.34006>
- [1.10] UN Document (1987). *Our Common Future, from One Earth to One World*. From A/42/427, Our Common Future: Report of the World Commission on Environment and Development, Gathering a Body of Global Agreements. Online <http://www.un-documents.net/ocf-ov.htm>(ultima consulta 07/10/2020).
- [1.11] Brandon, P.S. and Lombardi, P. (2011) *Evaluating Sustainable Development in the Built Environment*. John Wiley & Sons Publishing, New York. 280 pages, ISBN: 978-1-4051-9258-3 (Hardcover).
- [1.12] Jafari Salim, M. (2017) GIScience for Sustainable Development. *Journal of Geographic Information System*, 9, 482-492. <https://doi.org/10.4236/jgis.2017.94030>.
- [1.13] IEA, World Energy Outlook 2017-Biomass Database, 2017. <http://www.worldenergyoutlook.org/media/weowebiste/2015/CopyofWEO2015Biomassdatabase.xlsx>.
- [1.14] Ndaye Nkanka, B. (2009). Planificación energética en los países en vías de desarrollo. Caso de la República Democrática del Congo [Tesis doctoral no publicada]. Universitat Politècnica de València.



Online <https://riunet.upv.es/handle/10251/4331> doi:10.4995/Thesis/10251/4331

[1.15] Gitau, J.K.; Sundberg, C.; Mendum, R.; Mutune, J.; Njenga, M. Use of Biochar-Producing Gasifier Cookstove Improves Energy Use Efficiency and Indoor Air Quality in Rural Households. *Energies* 2019, *12*(22), 4285.

<https://doi.org/10.3390/en12224285>

[1.16] Centre de Développement de l'OCDE « Un meilleur accès à l'énergie pour les Africains »- [www.oecd.org/dev](http://www.oecd.org/dev).

[1.17] OECD.IEA 2017.<http://www.iea.org/energyaccess/>

[1.18] Contaminación del aire interior:  
[http://es.hesperian.org/hhg/A\\_Community\\_Guide\\_to\\_Environmental\\_Health:Contaminaci%C3%B3n\\_del\\_aire\\_interior](http://es.hesperian.org/hhg/A_Community_Guide_to_Environmental_Health:Contaminaci%C3%B3n_del_aire_interior)

[1.19] Nzobadila G. Pauvreté énergétique en Afrique. AFREC. [https://afrec-energy.org/Docs/FR/PDF/2017/paper\\_on\\_africa\\_energy\\_poverty\\_fr.pdf](https://afrec-energy.org/Docs/FR/PDF/2017/paper_on_africa_energy_poverty_fr.pdf).

[1.20] Elías José Hurtado Pérez, Oscar Mulumba Ilunga, María Cristina Moros Gómez et Carlos Vargas Salgado « Analyse des impacts économique-environnementaux du changement d'usage d'un foyer de cuisson traditionnel par un foyer de cuisson amélioré optimisé à charbon de bois dans les ménages de la ville de Kinshasa », *Déchets sciences et techniques* [En ligne], 2017, N°75,1-9. URL : <http://odel.irevues.inist.fr/dechets-sciences-techniques/index.php?id=3714>, <https://doi.org/10.4267/dechets-sciences-techniques.3714>

[1.21] Ilunga, O. and José, H. (2018) Environmental Impacts (ER-CO<sub>2</sub>) of an Improved Multi-Fuel Gasifier Forced Air Cookstove in the City of Kinshasa. *Journal of Environmental Protection*, *9*, 619-635. doi: 10.4236/jep.2018.96039.

[1.22] Oscar Mulumba-Ilunga, Elias Hurtado-Pérez, Elisa Peñalvo-López y Francisco-Javier Cárcel Carrasco.2020. Evaluación de rendimiento y de sostenibilidad de una estufa mejorada de carbón vegetal por métodos WBT Y CCT. Aplicación a Bandundu (R.D. CONGO).Dyna, Cod. 9590 | Tecnología de productos metálicos | 3316.05 Hornos, calderas y estufas. Vol. 95 -345-347. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/9590>.

[1.23] Hurtado Pérez, E.; Mulumba Ilunga, O.; Alfonso Solar, D.; Moros Gómez, M.C.; Bastida-Molina, P. Sustainable Cooking Based on a 3 kW Air-Forced Multifuel Gasification Stove Using Alternative Fuels Obtained from Agricultural Wastes. *Sustainability* 2020, *12*(18), 7723; <https://doi.org/10.3390/su12187723>.



## **Capítulo 2**

### **Estado del arte general sobre la estufas de cocción**





## Capítulo 2. Estado del arte general sobre la estufas de cocción.

### Preámbulo.

Este capítulo proporciona una revisión bibliográfica general de las estufas para cocinar utilizados en países en desarrollo. Tras una breve introducción se analiza la historia de las estufas de cocción, discutiendo brevemente las diferentes tecnologías sobre el diseño de estas estufas. Se ha documentado y revisado las literaturas en relación directa con las emisiones contaminantes producidas por las estufas de cocción. Se han agrupadas en un párrafo las diferentes investigaciones sobre los problemas del cambio climático y el calentamiento global debido a la utilización de las estufas de cocina por la liberación de gases de efecto invernadero (CO<sub>2</sub>, BC,...). Se exponen los problemas del desarrollo sostenible (más concretamente los aspectos socioeconómicos y medioambientales), así como el gran problema de la adopción efectiva de las estufas de cocción mejoradas por parte de los hogares (primeros usuarios) a los que están destinadas.

### 2.1. Introducción.

La falta de acceso a instalaciones de cocinas limpias en los países en desarrollo involucra a 3.000 millones de personas [2.1]. Lo que significa que estas personas, dependen de dispositivos ineficientes como cocinas y estufas tradicionales que utilizan como combustibles para cocinar y calentar diversos tipos de biomasa como madera, estiércol animal, residuos de cultivos y carbón vegetal. Esta situación de la fuerte dependencia de la biomasa tradicional como fuente de energía y de la utilización de estufas de bajo rendimiento para satisfacer las necesidades de cocción de alimentos, conllevan graves consecuencias para la salud [2.2] debido las emisiones contaminantes, principalmente el monóxido de carbón (CO), partículas finas (PM) y carbón negro u hollín” Black carbón” (BC) [2.3-2.6]. Además, dependiendo del contexto, el uso tradicional de la biomasa puede contribuir al estrés en los recursos forestales, aunque la relación directa entre la deforestación o la degradación de los bosques y el uso de la biomasa para fines de cocción de alimentos y calefacción no está completamente evaluada en la literatura [2.7-2.14]. Las estufas de cocción mejoradas (ICS) representan la solución tecnológica más comúnmente promovida para abordar este problema. Según indican Kshirsagar y Kalamkar [2.15], un ICS es "una estufa diseñada con ciertos principios científicos, para ayudar a una mejor combustión y transferencia de calor, para mejorar las emisiones y el rendimiento eficiente" en comparación con los dispositivos de cocción tradicionales. K.B. Sutar at al. [2.16] tienen como objetivo reunir la literatura que abarca más de tres décadas y que aborda aspectos técnicos de las estufas de biomasa: es decir, su diseño, análisis y pruebas. Se ha revisado la literatura sobre varios principios de diseño, características que determinan el rendimiento de la estufa y diferentes métodos de predicción del rendimiento, comparando diferentes protocolos de prueba de estufas y discutiendo críticamente varios problemas relacionados con las pruebas de estufas. Se presentan los



resultados de estudios de laboratorio y de campo sobre estufas realizados por varios investigadores, incluyendo información sobre el impacto en la salud de las estufas, su difusión y adopción. El análisis crítico se ha centrado en los hallazgos presentados por varios investigadores durante las últimas 3 a 4 décadas [2.16]. En estos artículos se analizan los principios del diseño y el ensayo de estufas desde una perspectiva científica. Son herramientas importantes para los investigadores que participan en el diseño y el análisis de estufas, así como en el desarrollo y la mejora de los métodos de ensayo.

## **2.2 Revisión bibliográfica.**

### **2.2.1. Historia de las estufas.**

La historia de la cocina comenzó con la invención del fuego, justificado en las excavaciones arqueológicas de “Chou Kutien” en China. Esta historia nos enseña que el “*Homo erectus pekingnensis*” usó el fuego durante la primera era glacial de hace unos 400.000 años [2.17].

#### **2.2.1.1. Estufas tradicionales de tres piedras.**

Todo comenzó con el uso del fuego abierto. En primer lugar, el fuego abierto fue simplemente un arreglo piramidal de combustible, que se transformó en un fuego blindado para equilibrar la olla en el fuego. Las desventajas de un fuego abierto pueden ser: la dispersión de las llamas y el calor, especialmente en tiempo de viento, la falta total de un control adecuado del fuego, la exposición al calor y al humo contaminante, y los altos riesgos de incendio. La forma inicial y más simple de fuego abierto fue hecha con tres piedras. En esta disposición, las piedras se colocaban en ciertos ángulos (unos 120° entre las piedras), en un terreno plano para poder soportar ollas de diferentes tamaños, lo que mejoraba la eficiencia de la cocción y reducía la dispersión del fuego en caso de viento. Con el desarrollo del fuego blindado (o fuego enmarcado), el diseño de tres piedras evolucionó gradualmente hasta convertirse en un recinto de arcilla en forma de U. Cabe señalar que todas las estufas desarrolladas en los primeros tiempos (antes del siglo XVII) se llamaban "estufas tradicionales", su eficiencia térmica era muy baja y el material de construcción también era muy pobre, y emitían mucho humo [2.18]. Las estufas tradicionales se caracterizan por su baja eficiencia y sus altas emisiones.

#### **2.2.1.2. Estufas mejoradas.**

La implantación de estufas de cocción mejoradas de biomasa comenzó en la India a principios del decenio de 1940. Estas estufas fueron llamadas "Estufas de barro mejoradas" o "Estufas de primera generación". La primera estufa de barro mejorada, llamada "Magan Chulha" [2.19], se desarrolló en 1947 en la India. Raju



[2.20] introdujo este tipo de estufa en los hogares rurales de la India. Theodorovic [2.21] realizó pruebas de laboratorio en estufas de biomasa mejoradas en Egipto en 1954. La medición de la eficiencia energética de una estufa de cocina mejorada en Indonesia fue realizada en 1961 por Singer [2.22]. El tipo de estufa de cocción que se probó fue la desarrollada por Raju [2.20]. En estas estufas mejoradas, se introdujo una chimenea para evacuar el humo de la cocina. Fueron hechas con un sistema de regulación del aire de combustión.

Desde la cocción a fuego abierto de los tiempos prehistóricos [2.23-2.24] hasta los fuegos de tres piedras, los diseños de las estufas han evolucionado hacia los fuegos protegidos [2.25], lo que allanó el camino para el desarrollo de estufas mejoradas [2.16]. El diseño y la difusión de estufas mejoradas de alta eficiencia y baja emisión tienen una historia de más de una década [2.26]. Un resumen histórico y la evolución de las estufas en todo el mundo se incluyen en dos artículos de revisión recientes [2.27-2.28]. En el decenio de 1980, el movimiento de mejora de la cocina se aceleró en varios países en desarrollo [2.29]. En la India, el programa nacional de estufas "chulha mejorada" se puso en marcha en 1982. También se pusieron en marcha programas de estufas de cocción mejoradas en muchos otros países del Asia meridional [2.30] y del África oriental [2.31]. A diferencia de otros países del África subsahariana, el programa de desarrollo y puesta en marcha de la difusión de estufas mejoradas en la RD Congo es muy reciente (unos 4 años). En la RD Congo, este programa no era anteriormente oportuno y prioritario debido a la abundancia de recursos forestales que, aunque mal utilizados los políticos consideraban inagotables.

Sonam et al. [2.32] examinan la clasificación de las estufas, los protocolos de prueba disponibles en todo el mundo y la adaptación mundial de las estufas de cocción mejoradas. También presentan los recientes avances en la tecnología de las estufas, el potencial de mitigación del CO<sub>2</sub> y la evaluación económica. En él se abordan las diversas cuestiones relacionadas con la mejora de las estufas para una mejor adopción por parte de los usuarios. Tyagi et al. [2.33] presentan un examen del diseño, del desarrollo y del progreso tecnológico de las estufas de biomasa y los efectos de los dispositivos convencionales de combustión de biomasa en las emisiones, los riesgos para la salud y la contaminación ambiental

### **2.2.2. Estufas de cocción y emisiones contaminantes.**

Con la creciente concienciación de la comunidad científica sobre los impactos negativos en la salud debido a las emisiones de combustibles sólidos de biomasa para cocinar, a principios de la década de 1990 se inició una investigación rigurosa sobre la reducción de las emisiones, la deforestación, la salud, y las cuestiones sociales, etc. [2.34].

El funcionamiento de una estufa cerca de las condiciones estequiometrias determina que los gases de combustión estén a temperatura máxima. Esta temperatura determina la cantidad de calor recibido por el área inferior del recipiente. Por lo tanto, la estufa funciona a su máximo potencial cuando la relación de aire-combustible se mantiene cerca de la estequiometria. Esto también ayuda a reducir las emisiones de



monóxido de carbono. La propiedad del combustible, la cantidad de suministro de aire para la combustión y su distribución determina la eficiencia y los niveles de emisión de una estufa.

La combustión ineficiente de la biomasa sólida libera gran cantidad de contaminantes como partículas finas (principalmente PM<sub>2.5</sub>), carbón negro u hollín (BC), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), amoníaco, benceno, etc. [2.35-2.36]. Entre estos contaminantes gaseosos, la combustión incompleta de la biomasa sólida es la principal fuente de CO [2.37]. Estos contaminantes están estrechamente relacionados con varias enfermedades pulmonares, cardiovasculares, retinianas y dermatológicas [2.35, 2.38], y la exposición al CO en particular puede incurrir en hipoxia tisular en los fetos en gestación. Barnes et al. [2.39] destacan que la exposición a la contaminación del aire interior se ha asociado con la enfermedad pulmonar obstructiva crónica, el cáncer de pulmón, el cáncer nasofaríngeo, la tuberculosis y las enfermedades oculares en los adultos; el bajo peso al nacer y, lo que es especialmente preocupante, las infecciones agudas de las vías respiratorias inferiores, como la neumonía en los niños menores de cinco años.

En un estudio que se realizó en una cocina rural india [2.35], no se encontraron diferencias significativas en las concentraciones interiores de PM y CO cuando se usaron estufas de ventilación natural y estufas tradicionales con cualquier tipo de combustible sólido. Sin embargo, se registraron concentraciones significativamente más bajas de PM y CO con estufas de aire forzado en comparación con otras. Con la utilización de diferentes tipos de combustibles sólidos de biomasa, las concentraciones de PM y CO en el ambiente interior se redujeron del 21% al 57% y del 30% al 74% respectivamente, con la estufa de aire forzado en comparación con la estufa tradicional [2.40].

Los investigadores N. MacCarty et al. [2.41] hicieron un estudio de diferentes estufas concluyendo que el consumo de combustible en las estufas tipo “rocket stove” reduce un 33% respecto a las estufas tradicionales; mientras que las emisiones de CO y PM se reducen un 75% y 46% respectivamente, en comparación con la estufa tradicional. Hay que recordar que los más afectados por el uso de la biomasa sólida como combustible para cocinar alimentos, son las mujeres y los niños, debido a la contaminación del aire interior de las viviendas a causa de la mala tecnología de cocción de biomasa y que, en los países en desarrollo, ellos son los que más tiempo permanecen en el interior de las viviendas. La contaminación del aire interior causada por el uso de cocinas tradicionales produjo millones de muertes al año [2.42]. Las estufas de aire forzado se consideran una opción viable para superar estos problemas [2.42-2.43].

Masera et al. [2.44] tratan de monitorear cuantitativamente y evaluar los impactos de las estufas mejoradas en el estado de Michoacán en México. Los autores demuestran que las concentraciones promedio de CO y PM al utilizar la cocina mejorada “Patsari” frente a las estufas tradicionales se reducen un 66 % (n = 32) y un 67 % (n = 33), respectivamente. Por lo tanto, la estufa “Patsari” proporciona un medio eficaz para reducir la contaminación del aire de la cocina siendo considerables los beneficios potenciales de la instalación de estas estufas. Las estufas “Patsari” son estufas del tipo “plancha” que pueden usar 2 o 3 ollas a la vez. Están equipados con una chimenea para la evacuación de los gases de combustión. Los



investigadores Sharma D. y Jain S. [2.45] realizan sus estudios en las zonas rurales de la India septentrional. El estudio consiste en una evaluación comparativa del impacto de las cocinas tradicionales (TCS) y las mejoradas (ICS), que se combinan con diferentes características de la cocina para estimar las concentraciones de PM y CO. El estudio incluyó un monitoreo de la calidad del aire interior (IAQ) durante las dos sesiones de cocina del día. Las concentraciones de contaminantes se obtuvieron en términos de promedios de 24 horas y de 8 horas (horas de cocción que incluyen la comida de la mañana y de la noche). Se analizaron tres características de la cocina de forma exhaustiva: cocina cerrada, semicerrada y abierta. Los resultados del estudio destacaron que el despliegue de ICS ayudaría a mejorar la IAQ en la cocina al reducir las concentraciones de PM de un 80% y las de CO hasta un 93%. En este trabajo subrayó que las características de la cocina influían significativamente en la acumulación de contaminantes atmosféricos, lo que se demostró con los resultados que las IAQ son peores en una cocina cerrada, que se traduce en valores más altos de índice de exposición. La conclusión es que el uso de la ICS combinado con un diseño eficaz de la cocina puede mejorar la IAQ general del hogar y por tanto proporcionar elevados beneficios para la salud.

### 2.2.3. Tecnologías y diseño de las estufas de cocción.

El documento de la FAO escrito por Sharma S.K. et al. [2.46] señala que el diseño de una estufa debe tener como objetivo mejorar la productividad general del sistema de cocción, lo que significa que el diseño debe tener en cuenta la salud, la seguridad, la higiene y la eficiencia energética.

Micuta investigó en 1985[2.47] sobre los principios de diseño. En su estudio centrado en el diseño de las estufas, recuerda por un lado que el diámetro de la cámara de combustión debe ser siempre relativamente pequeño y su superficie debe ser siempre menor que la del fondo de la olla y, por otro lado, insiste en reducir al mínimo las pérdidas por radiación, convección y conducción. Lo ideal sería que la combustión tuviera lugar dentro de una caja de fuego cerrada. Otra técnica interesante descrita en este documento es la idea de colocar una chimenea corta sobre el fuego para reducir las emisiones nocivas. El estudio señala que el diámetro óptimo de cualquier chimenea depende de su altura y de la potencia de la estufa. Se recomienda un diámetro de 10 a 12 cm para las estufas de tamaño familiar, para asegurar un tiro regular. Para la altura de la chimenea, en las condiciones que prevalecen en los países en desarrollo, debería ser adecuada una altura de chimenea de unos 2 a 3 m [2.47].

Winiarski [2.48] desarrolló unos principios de diseño para mejorar la combustión y la eficiencia de la transferencia de calor y desarrolló la famosa “rocket stove” en 1980. Entre estos principios de diseño los siguientes [2.49]:

Aislar térmicamente alrededor del fuego usando materiales ligeros y resistentes al calor.

- Construir una chimenea corta y aislada por encima del fuego.

- Calentar y quemar los extremos de la leña cuando entran en el fuego.
- Mantener una rápida corriente de aire durante la combustión, ya que, si la corriente de aire es demasiado débil, se produce humo y exceso de carbón.
- Poner una rejilla bajo el fuego.
- Aislar todo el recorrido del flujo de calor.
- Maximizar la transferencia de calor a la olla con espacios de tamaño apropiado.

Mediante el método de Baldwin y Winiarski [2.33,2.50] se estableció, para una estufa con falda(Figura 2.1), una interdependencia o relación entre la potencia de fuego, el consumo de leña por hora, la longitud y anchura de los espacios alrededor de la olla, el tamaño y la eficiencia de la estufa. Cabe señalar que para un valor constante de 20 cm de longitud de la falda, y una variación en el ancho de los espacios entre la olla y la falda que va de 8 a 14 mm, la potencia de fuego varía en proporciones entre 2,8 y 9,6 kW, la eficiencia energética varía entre el 25% y el 40%. Y el consumo de leña de 0,5 a 1,7 kg/h de funcionamiento de la estufa. En el diseño el objetivo del faldón es hacer que el flujo de calor que se pierde a la atmósfera se redirija primero hacia la parte lateral de la olla para aumentar la transferencia térmica.

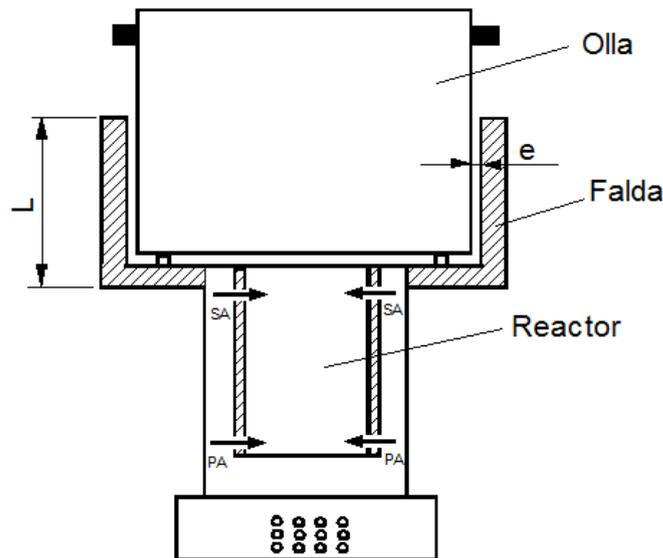


Fig.2.1. Estufa de cocción con falda. [L es la longitud de la falda, e es espacio entre olla y falda]

Fuente: Elaboración propia

En el estudio de GIZ, Christo [2.51] dio el principio básico de funcionamiento de una estufa de gasificación de biomasa. R. Preetha y S. Kamaraj en su estudio [2.52] dan los resultados del proceso de diseño de un reactor de gasificación. Estos resultados incluyen parámetros geométricos, operativos y de rendimiento. El



tamaño geométrico incluye la configuración del reactor, la sección transversal y la altura (diseño del equipo). Los parámetros de funcionamiento más importantes son: (i) temperatura del reactor, (ii) temperatura de precalentamiento del aire, y (iii) cantidad de aire (es decir, la relación aire/biomasa). En su estudio Odesola et al. [2.53] dieron el diseño de una estufa de gasificación que puede funcionar con aserrín, madera, carcasas de cacahuete y carbón vegetal como combustible principal. Antes de la fabricación, los parámetros de diseño se obtuvieron utilizando las ecuaciones apropiadas. También se hicieron aportes para simplificar la construcción de la estufa y para minimizar la pérdida de calor al medio ambiente. Se obtuvieron eficiencias térmicas del 32,2%, 80,1%, 38,8% y 50,3% cuando la estufa fue alimentada con carbón vegetal, aserrín, leña y carcasas de cacahuete, respectivamente. La temperatura más alta de la llama se registró a 805°C cuando se usó la madera como combustible. La temperatura más alta registrada para la carcasa exterior de la estufa fue de 56°C. La mayor potencia de fuego se obtuvo con madera, con la que se consiguió hervir 2 kg de agua en 20 minutos, mientras que con aserrín, carbón y carcasas de cacahuete la cocción duro 29, 23 y 27 minutos, respectivamente. Los autores Panwar y Rathore [2.54] diseñan una estufa de leña a gas de 5kW que funciona en modo de tiro natural para satisfacer las necesidades de energía para cocinar utilizando el principio operativo de la gasificación de la biomasa. Los resultados muestran que la estufa funciona con una eficiencia térmica del 26% y una temperatura de la llama de 736°C. El trabajo de Panwar [2.55] y Yohannes [2.56] sobre el diseño de estufas de gas que pueden utilizar diferentes tipos de biomasa, a saber, leña y briquetas para la primera y bambú, eucalipto para la segunda, da respectivamente resultados de un 36% y un 31,8% de eficiencia energética de las estufas. El trabajo reciente de Himanshu K. y N. L. Panwar [2.57] hace el diseño de una estufa de gasificación que funciona eficientemente tanto en el modo de tiro natural como en el de tiro forzado, utilizando leña (acacia nilotica) y pellets de cáscara de cacahuete (*Arachis hypogaea*). Los resultados mostraron que con tiro de aire forzado y leña, como combustible, la potencia nominal fue de 3,15 kW, la eficiencia térmica media del 36,5%, las emisiones de CO y CO<sub>2</sub> y el total de partículas se estimaron en 0,2 ppm y 10,4 ppm, y  $134,1 \times 10^{-6}$  g /kJ, respectivamente. Con tiro natural y leña de Acacia nilotica, se encontró que la eficiencia térmica media era de alrededor del 33,4%.

## **2.2.4. Impactos socio-económico-ambiental y adopción de las estufas.**

### **2.2.4.1 Difusión de las estufas y adopción efectiva por los hogares.**

En el cinturón central de Ghana se realizó un estudio [2.58] con el objetivo de explorar y documentar las ventajas y los inconvenientes para la utilización de estufas limpias. Las ventajas del uso de estufas mejoradas son, en primer lugar, el uso reducido de leña, que determina menores emisiones de humo y de problemas de salud asociados a la contaminación del aire interior, igualmente se reduce también el tiempo de recolección de la leña y de cocción, así como el buen olor y sabor de los alimentos. Las potenciales barreras para la adopción de una estufa limpia son el coste, la posible falta de disponibilidad de piezas de repuesto en el mercado abierto para reemplazar los accesorios defectuosos de la estufa, el tamaño de la



estufa y el tamaño del hogar. Algunas estufas son de construcción fija, por lo que puede ser un problema para la adopción de ellas cuando el hogar no tiene suficiente espacio para su construcción.

Las opiniones sobre las características de la estufa, el consumo de combustible, los efectos sobre la salud y la aceptabilidad se evaluaron en Kenia [2.59] mediante entrevistas estructuradas y discusiones de grupos focales, buscando una comparación, desde el punto de vista de las mujeres, entre las ICS y el fuego tradicional de tres piedras. En total, se realizaron 262 entrevistas y 11 grupos focales de 43 mujeres. Las mujeres prefirieron la ICS al fuego tradicional de tres piedras por varias razones, entre ellas la facilidad de uso, la eficiencia de la estufa y del combustible y la reducción percibida del humo que determina la mejora de la salud.

Se realizó un estudio [2.60] sobre la adopción de ICS en el noroeste de Pakistán utilizando un análisis logit (modelo basado en la distribución logística). Los resultados mostraron que la educación del encuestado, el número de miembros del hogar que trabajan y el ingreso total del hogar tuvieron efectos significativos en la adopción de las ICS. Por el contrario, la edad y la posesión de la tierra no mostraron ninguna influencia significativa en la aceptación. El modelo general fue significativo con  $p < 0.001$  lo que revela que las variables socioeconómicas seleccionadas tienen una relación estadísticamente significativa con la adopción de las ICS [2.60-2.61]. Esto lleva a la conclusión de que los esfuerzos por mejorar los aspectos sanitarios y ambientales pueden tener éxito si los programas de implementación de las ICS en los hogares tienen en cuenta los factores socioeconómicos, contextuales y de mercado de la población local.

En un estudio realizado en China, sobre los factores y barreras que tienen un claro impacto en la elección combustibles más limpios y estufas de cocina [2.62], determino que los más importantes son: las tecnologías de combustibles y estufas como la eficiencia térmica, la comodidad de funcionamiento, el coste del combustible y de la estufa, el conocimiento de la población, la concienciación sobre la protección del medio ambiente, el ahorro de energía, el entorno, la estructura del hogar, el tamaño de la familia, la edad y el sexo. El apoyo financiero y el desarrollo del mercado son esenciales para el uso sostenible de combustibles y cocinas limpias. Se determinó también la influencia de políticas favorables, incluyendo leyes, regulaciones y estándares. La voluntad y el entusiasmo en la aceptación de las estufas mejoradas se fomentarían directamente a través de la publicidad, la demostración en el vecindario y un buen servicio de seguimiento.

Los estudios [2.63] realizados para analizar las preferencias energéticas y la influencia de las variables sociológicas y económicas en las preferencias energéticas en Uagadugú demostraron que los hogares desean mantener la situación actual en lo que respecta a su preferencia energética para cocinar. Esta situación se debe, en primer lugar, a los bajos ingresos y al escaso acceso de los hogares a la electricidad y, en segundo lugar, al bajo nivel de vida de los hogares, así como al tamaño de las familias.

A fin de estudiar los factores que influyen en la aceptación de las estufas mejoradas en tres zonas rurales geográfica y culturalmente diversas [2.64], se administró un cuestionario a 1.200 hogares sobre tres cuestiones: i) el uso de estufas de combustible sólido, ii) el uso de estufas de gas licuado de petróleo, y iii)



el cambio de las estufas tradicionales. El resultado muestra que el 87% de los hogares informó de una mejora diaria en el uso de estufas de combustible sólido, el 51% en el uso de estufas de gas licuado de petróleo, y el 66% cambió de la estufa tradicional a otro modelo más mejorado. Las variables asociadas con uno o más de los tres resultados son: educación, edad, estado civil de la mujer informante, riqueza y tamaño del hogar.

Un programa de introducción de estufas mejoradas puede lograr sus objetivos si las personas las aceptan inicialmente y las sigue utilizando a largo plazo. Por lo tanto, para comprender mejor el proceso de adopción y evaluar los impactos de la introducción de una nueva estufa de cocción es necesario examinar las ventajas de cada una con la utilización de las principales prácticas culinarias y combustibles disponibles. Una generación de herramientas basadas en sensores está haciendo posible el monitoreo continuo y objetivo del proceso de aceptación de las estufas de cocción [2.65]. Las mediciones del uso de las estufas basadas en sensores han permitido la cuantificación objetiva de diferentes parámetros como el rendimiento, las emisiones, etc. La medición de la temperatura como parámetro primario para el seguimiento de la actividad de las estufas es una opción obvia y ha sido implementada por Ruiz-Mercado et al. [2.65-2.66]. Los monitores de uso de estufa (SUMs) permitieron la parametrización del comportamiento del uso de las estufas como un parámetro crítico de rendimiento que, por otro lado, es igualmente importante para otras especificaciones técnicas de la estufa. Con una ubicación adecuada, una recopilación de datos estandarizada y una gestión cuidadosa de los datos, las SUMs pueden proporcionar datos objetivos y discretos sobre el uso de la estufa con una resolución, precisión y nivel de detalle que antes no eran posibles [2.67]. Un estudio realizado en Sudán [2.68] se llevó a cabo para examinar la tasa de adopción y los factores que afectan a la introducción de estufas mejoradas en el estado de Jartum. El estudio se basa en datos primarios recogidos a través de entrevistas personales con matrimonios en 300 hogares seleccionados al azar. El resultado llegó a las siguientes conclusiones: el conocimiento de las ventajas relativas de las estufas mejoradas y el nivel de educación medio de las mujeres del hogar tuvo un efecto positivo importante en la capacidad de innovación del hogar en la adopción de las ICS, por otro lado, la edad del marido con un nivel de educación más bajo tuvo un efecto negativo muy importante en la adopción. Dado que el Sudán es una sociedad patriarcal, todas las tareas domésticas, en particular la preparación de alimentos y las actividades conexas, se consideran responsabilidad exclusiva de las mujeres, y todas las decisiones al respecto son adoptadas por ellas. El estudio [2.69] trata de la adopción de dos ICS en Etiopía (ICS Merchaye et ICS Lakech). En cuanto al estado de adopción de las ICS, el 43.7% de los hogares de la muestra fueron afines a la utilización de las estufas Merchaye y el 31.3% a las Lakech. Por tanto, el conjunto que no adoptó las ICS fue el 25% de la muestra. Esta adopción estuvo influenciada por la edad del jefe del hogar, el sexo, el nivel de educación y los ingresos de la familia.

La difusión de las estufas de cocción requiere de la inversión del sector público, que puede ser internacional y/o nacional. Las finanzas públicas deberían utilizarse para el desarrollo de la capacidad a través de programas de sensibilización para un mayor desarrollo tecnológico y para encontrar las estrategias de



difusión adecuadas. Además, se requiere un marco político de apoyo para la difusión de las estufas de biomasa para un desarrollo sostenible [2.33].

#### **2.2.4.2. Estufas y deforestación.**

Los autores Jagger P. y Kittner N. [2.70] estudian en Uganda el grado de deforestación debido a la agricultura y el grado de deforestación debido al uso de biomasa como fuente de energía en una resolución espacial de 500 m. Los datos de la encuesta proceden de 451 hogares que identifican el tipo, la cantidad y la fuente de los combustibles de biomasa utilizados. Los resultados muestran una pérdida neta de 4,51 millones de toneladas de biomasa, o el 26% de la biomasa secada al aire libre durante un período de 8 años en una zona de 5 km alrededor de las aldeas estudiadas.

#### **2.2.4.3. Estufas de cocción y Cambio climático.**

El cambio climático se debe a la acumulación de gases de efecto invernadero en la atmósfera. Estos gases de efecto invernadero incluyen el BC, CO<sub>2</sub>, el metano y muchos otros. Los BC y CO<sub>2</sub> son los principales gases que se liberan durante la combustión de la biomasa en las estufas de cocción [2.71-2.72]. La forma de obtención del combustible tiene una gran influencia en el potencial del cambio climático, ya que si la biomasa se obtiene de forma sostenible (biomasa de origen renovable), el CO<sub>2</sub> liberado por la combustión será teóricamente reabsorbido por la biomasa que crece para reemplazarla. Pero si la biomasa no se cosecha de forma sostenible (biomasa de origen no renovable), el CO<sub>2</sub> que se libera durante la combustión de la biomasa contribuirá a la acumulación de CO<sub>2</sub> en la atmósfera. Según el UNFCC [2.72] el 90% de la biomasa que se utiliza como combustible es biomasa de origen no renovable. Esto significa que la utilización de la biomasa como combustible principal contribuye, de forma importante, al cambio climático y al calentamiento global. El uso a gran escala de cocinas más limpias puede reducir la emisión del CO<sub>2</sub> a la atmósfera, tratándose de biomasa no renovable. MacCarty et al. [2.33, 2.73] estudiaron las emisiones relativas de cinco tipos comunes de estufas de biomasa. Sus resultados mostraron que en situaciones de explotación sostenible, en las que las emisiones de CO<sub>2</sub> se consideraban neutras, algunas estufas mejoradas con cámara de combustión de tipo “rocket stove” o con asistencia de ventilador podrían reducir el impacto global sobre las emisiones de los productos de combustión incompleta (PICs) entre un 50 y un 95%.

### **2.3. Conclusión.**

Desde que se descubrió, el fuego ha servido para que el hombre lo utilice en la preparación de alimentos. En los primeros tiempos de una forma muy rudimentaria y su utilización apenas producía problemas en el medioambiente y en la salud de las personas. Las técnicas rudimentarias de la antigüedad se han trasladado



a nuestros tiempos, en algunas ocasiones sin ningún cambio, pero en la actualidad, dado la elevada cantidad de personas que lo utilizan, puede ocasionar graves problemas en el medioambiente y en la salud, ya que antiguamente la preparación de alimentos se hacía en su gran mayoría al aire libre y ahora se hace en el interior de las casas.

Con el intento de resolver ambos problemas, el de la salud de las personas y el del medioambiente, desde principio del siglo XX numerosos investigadores han desarrollado diversos modelos de estufas de cocción de alimentos obteniendo resultados satisfactorios, válidos para cada zona geográfica que se diferenciarán unas de otras por los recursos biomásicos que se encuentren y por la cultura de los habitantes de cada región. Estas investigaciones son muy necesarias ya que casi la mitad de la población mundial todavía utiliza el fuego para la preparación de alimentos, por no disponer de fuentes de energía más limpias y menos perjudiciales para la salud como son la electricidad y el gas natural.

En este capítulo se han referenciado numerosos diseños de estas estufas para las diferentes regiones, dando a conocer los resultados obtenidos y los problemas socioeconómicos que presentan la introducción de las nuevas estufas.

### Referencias bibliográficas del capítulo 2.

- [2.1] IEA, World Energy Outlook 2015-Biomass Database, 2015. <http://www.worldenergyoutlook.org/media/weowebsite/2015/CopyofWEO2015Biomassdatabase.xlsx>. (Última consulta 07/10/2020)
- [2.2] WHO, Household Air Pollution and Health, 2016. <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs292/en/> (Última consulta 25/03/2020).
- [2.3] R. Bailis, R. Drigo, A. Ghilardi, O. Masera, The carbon footprint of traditional woodfuels, *Nat. Clim. Chang.* 5 (2015) 266-272, <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate2491>.
- [2.4] M. Johnson, R. Edwards, C. Alatorre Frenk, O. Masera, In-field greenhouse gas emissions from cookstoves in rural Mexican households, *Atmos. Environ.* 42 (2008) 1206-1222, <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.10.034>.
- [2.5] O.R. Masera, R. Bailis, R. Drigo, A. Ghilardi, I. Ruiz-Mercado, Environmental burden of traditional bioenergy use, *Annu. Rev. Environ. Resour.* 40 (2015) 121-150, <http://dx.doi.org/10.1146/annurev-environ-102014-021318>.
- [2.6] Z.A. Chafe, M. Brauer, Z. Klimont, R. Van Dingenen, S. Mehta, S. Rao, K. Riahi, F. Dentener, K.R. Smith, Household cooking with solid fuels contributes to ambient PM<sub>2.5</sub> air pollution and the burden of disease, *Environ. Health Perspect.* 122 (2014) 1314-1320, <http://dx.doi.org/10.1289/ehp.1206340>.
- [2.7] J.E.M. Arnold, G. Keohlin, R. Persson, Woodfuels, livelihoods, and policy interventions: changing perspectives, *World Dev.* 34 (2006) 596-611, <http://dx.doi.org/10.1016/j.worlddev.2005.08.008>.
- [2.8] G. Hiemstra-van der Horst, A.J. Hovorka, Fuelwood: the “other” renewable energy source for Africa? *Biomass Bioenergy* 33 (2009) 1605-1616, <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.08.007>.
- [2.9] T. Bensef, Fuelwood, deforestation, and land degradation: 10 years of evidence from Cebu province, the Philippines, *L. Degrad. Dev.* 19 (2008) 587-605, <http://dx.doi.org/10.1002/ldr.862>.
- [2.10] S.M. Oduori, F. Rembold, O.H. Abdulle, R. Vargas, Assessment of charcoal driven deforestation rates in a fragile rangeland environment in North Eastern Somalia using very high resolution imagery, *J. Arid. Environ.* 75 (2011) 1173-1181, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaridenv.2011.05.003>.



- [2.11] N. Hosonuma, M. Herold, V. De Sy, R.S. De Fries, M. Brockhaus, L. Verchot, A. Angelsen, E. Romijn, An assessment of deforestation and forest degradation drivers in developing countries, *Environ. Res. Lett.* 7 (2012) 44009, [http:// dx.doi.org/10.1088/1748-9326/7/4/044009](http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/7/4/044009).
- [2.12] C.A. Cuvilas, R. Jirjis, C. Lucas, Energy situation in Mozambique: a review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 14 (2010) 2139-2146, [http://dx.doi.org/10.1016/ j.rser.2010.02.002](http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2010.02.002).
- [2.13] S. Mandelli, J. Barbieri, L. Mattarolo, E. Colombo, Sustainable energy in Africa: a comprehensive data and policies review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 37 (2014) 656-686, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.069>
- [2.14] P.L. Sankhayan, O. Hofstad, A village-level economic model of land clearing, grazing, and wood harvesting for sub-Saharan Africa: with a case study in southern Senegal, *Ecol. Econ.* 38 (2001) 423-440, [http://dx.doi.org/10.1016/ S0921-8009\(01\)00189-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0921-8009(01)00189-6).
- [2.15] M.P. Kshirsagar, V.R. Kalamkar, A comprehensive review on biomass cookstoves and a systematic approach for modern cookstove design, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 30 (2014) 580-603, [http://dx.doi.org/10.1016/ j.rser.2013.10.039](http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.10.039).
- [2.16] K.B. Sutar, S. Kohli, M.R. Ravi, A. Ray, Biomass cookstoves: a review of technical aspects, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 41 (2015) 1128-1166, <http:// dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.09.003>.
- [2.17] Fullerton DG, Brucec N, Gordona SB. Indoor air pollution from biomass fuel smoke is a major health concern in the developing world. *Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene* 2008; 102: 843–851.
- [2.18] Improved solid biomass burning cookstoves: A development manual, Regional Wood Energy Development Program in Asia, FAO, file document 44; 1993 available from website [wgbis.ces.iisc.ernet.in/energy/HC270799/RWEDP/Acrobat/fd44.pdf](http://wgbis.ces.iisc.ernet.in/energy/HC270799/RWEDP/Acrobat/fd44.pdf) [Última consulta 27/03/2020].
- [2.19] Anhalt J, Holanda S. Policy for subsidizing efficient stoves. Project no. 10604030. Available from: [http://toolkits.reeep.org/file\\_upload/ 10604030\\_2.pdf](http://toolkits.reeep.org/file_upload/10604030_2.pdf) [Ultima consulta 25/03/2020].
- [2.20] Raju SP. Smokeless kitchens for the millions. Madras, India: The Christian Literature Society; 1953, Rev. edn. ISBN-10: 0861865774
- [2.21] Theodorovic B. Experiments with the improved Egyptian rural stove. Short paper Arab States Fundamental Education Centre, Sirs-el-Layyan, Menoufia, Egypt; 1954.
- [2.22] Singer H. Improvement of fuel wood cooking stoves and economy in fuel wood consumption. Report to the Government of Indonesia. Rome: Expanded Technical Assistance Program, FAO; 1961 Report no. 1315.
- [2.23] Prehistoric food15000000-3500BC. [Internet]. Available from: <http://www.library.thinkquest.org/C005446/Food/English/prehistoric.html> [Ultima consulta 16/05/2020].
- [2.24] Chomcharn A. Improved biomass cooking stoves for household use. Royal Forest Department, Thailand. [Internet]. Available from: [http://www.pdf.usaid.gov/pdf\\_docs/PNAAS530.pdf](http://www.pdf.usaid.gov/pdf_docs/PNAAS530.pdf) [Ultima consulta 17/05/2020].
- [2.25] De Lepeleire G, Krishana Prasad K, Verhaart P, Visser P. A woodstove compendium. Netherlands: Eindhoven University of Technology; 1981.
- [2.26] Mukunda HS. Understanding clean energy and fuels from biomass. New Delhi: Wiley India Pvt. Ltd.; 2011. 300p. ISBN13 9788126529698
- [2.27] Kumar M, Kumar S, Tyagi S K. Design, development and technological advancement in the biomass cookstoves :a review. *Renew Sustain Energy Rev* 2013; 26: 265–285.
- [2.28] Kshirsagar MP, Kalamkar VR . A comprehensive review on biomass cook- stoves and a systematic approach for modern cookstove design .*Renew Sustain Energy Rev* 2014;30:580–603.
- [2.29] Barnes DF, Kumar P, Openshaw K. Cleaner hearths, better homes: new stoves for India and the developing world. New Delhi: Oxford University Press; 2012. 176p. ISBN13 9780198078364



- [2.30] Rahman ML. Improved cookingstoves in South Asia. [Internet]. Islamabad, Pakistan: SAARC Energy Centre .Available from: ([http://www.sa-energy.net/m/Improved\\_Cooking\\_Stoves\\_in\\_South\\_Asia.pdf](http://www.sa-energy.net/m/Improved_Cooking_Stoves_in_South_Asia.pdf)); 2010[Última consulta 06/04/2020].
- [2.31] Suresh R., Singh V.K., Malik J.K., Datta A. , Pal R.C. Evaluation of the performance of improved biomass cooking stoves with different solid biomass fuel types<http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.08.002> 0961-9534/© 2016 Published by Elsevier Ltd.
- [2.32] Sonam A. Mehetre,A.S. Panwar,N.L. Sharma D.,Kumar, H.Improved biomass cookstoves for sustainable development: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.Volume 73, June 2017, 672-687  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.150>
- [2.33] Tyagi,S.K, Kumar,M., Sachin Kumar,S.Design, development and technological advancement in the biomass cookstoves: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 26 (2013) 265–285. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.010>
- [2.34] Household cookstove, environment, health and climate change. The World Bank. ([climatechange.worldbank.org/Household%20Cookstoves-web.pdf](http://climatechange.worldbank.org/Household%20Cookstoves-web.pdf)); 2011 [última consulta 04/04/2020]
- [2.35] Karekezi S, Turyareeba P. Woodstove dissemination in Eastern Africa – a review.*Energy Sustain Dev* 1995;1(6):12–19.
- [2.36] C.A. Roden, T.C. Bond, S. Conway, A.B.O. Pinel, N. MacCarty, D. Still, Laboratory and field investigations of particulate and carbon monoxide emissions from traditional and improved cookstoves, *Atmos. Environ.* 43 (6) (2009) 1170-1181.
- [2.37] T. Halloway, H. Levy, P. Kasibhatla, Global distribution of carbon monoxide, *Geophys. Res. Lett.* VOL. 105, NO. D10 (2000) 12123-12147.
- [2.38] M. Ezzati, B.M. Mbinda, D.M. Kammen, Comparison of emissions and residential exposure from traditional and improved cookstoves in Kenya, *Environ. Sci. Technol.* 34 (4) (2010) 578-583.
- [2.39] Barnes,B., Mathee,A., Thomas,E., Bruce,N.2009 Household energy, indoor air pollution and child respiratory health in South Africa. *Journal of Energy in Southern Africa* 20(1): 4–13 DOI: <http://dx.doi.org/10.17159/2413-3051/2009/v20i1a3296>.
- [2.40] C. L'Orange, J. Volckens, M. DeFoort, Influence of stove type and cooking pottemperature on particulate matter emissions from biomass cookstoves, *Energy Sustain. Dev.* 16 (4) (2012) 448-455.
- [2.41] N. MacCarty, D. Still, D. Ogle, T. Drouin, Assessing Cookstove Performance: Field and Lab Studies of Three Rocket Stoves Comparing the Open Fire and Traditional Stoves in tamil nadu, India on Measures of Time to Cook, Fuel Use, Total Emissions, and Indoor Air Pollution, Aprovecho Research Center, Oregon, USA, 2008 [cited 2014 December 10]. Available from: [www.aprovecho.org/lab/rad/](http://www.aprovecho.org/lab/rad/) ( Última consulta 20/04/2020).
- [2.42] Raman P., Murali J., Sakthivadivel D., Vigneswaran V.S. Performance evaluation of three types of forced draft cook stoves using fuel wood and coconut shell. *Biomass and bioenergy* 49(2013)333-340. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.12.028>
- [2.43] Mukunda HS, Dasappa S, Paul PJ, Rajan NKS, Yagnaraman M, Ravi kumar D, et al. Gasifier stoves e science, technology and field outreach. *Curr Sci* 2010; 98(5):627-638
- [2.44] Masera o.,Edwards R.,Cynthia A. A. ,Berrueta V.Johnson M.,Rojas B.L.Riojas-Rodríguez H.,SmithK.R. Impact of Patsari improved cookstoves on indoor air quality in Michoacán, Mexico. *Energy for Sustainable Development* Volume XI No. 2, June 2007. 45-56. DOI: [10.1016/S0973-0826\(08\)60399-3](https://doi.org/10.1016/S0973-0826(08)60399-3)
- [2.45]Sharma D., Jain S. Impact of intervention of biomass cook stove technologies and kitchen characteristics on indoor air quality and human exposure in rural settings of India. *Environment International* 123 (2019) 240–255. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.11.059>.
- [2.46]FAO, 1993. Improved solid biomass burning cookstoves: A development manual, RegionalWood Energy Development Program in Asia, FAO, file document 44; 1993 available from website ([wgbis.ces.iisc.ernet.in/energy/HC270799/RWEDP/Acrobat/fd44.pdf](http://wgbis.ces.iisc.ernet.in/energy/HC270799/RWEDP/Acrobat/fd44.pdf)) [Última consulta 04/04/2020].



- [2.47] Micuta W. Modern stoves for all. Intermediate Technology Publications, Geneva, the Bellerive Foundation; 1985. [Última consulta 13/04/2020].
- [2.48] Still D., Kness J. Capturing HEAT Five Earth-Friendly Cooking Technologies and How to Build Them, Aprovecho Research Center, 2nd ed., (weblife.org/ capturing\_heat/pdf). [Última consulta 14/07/2020]
- [2.49] Bryden M, Still D, Scott P, Hoffa G, Ogle D, Bailis R, et al. Design Principles for Wood Burning Cook Stoves. Aprovecho Research Center. Available from: [www.aprovecho.org/lab/index.php?option=com](http://www.aprovecho.org/lab/index.php?option=com). [Última consulta 24/07/2020]
- [2.50] Baldwin SF. Biomass stoves: engineering design, development, and dissemination. Princeton, NJ: Center for Energy and Environmental Studies; 1952.287p. ISBN 0866192743
- [2.51] Christa Roth, Micro-gasification: cooking with gas from biomass, GIZ HERA— Poverty-oriented Basic Energy Service; 2011 (www.newdawnengineering.com/.../HERA-GIZ%20micro). [Última consulta 23/08/2020].
- [2.52] R. Preetha Devi1 and S. Kamaraj. Design and Development of Updraft Gasifier Using Solid Biomass. *Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci* (2017) 6(4): 182-189. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.604.021>.
- [2.53] Odesola I.F, Ebenezer O. I. and Idris O. Y. Design and Performance Evaluation of Energy Efficient Biomass Gasifier Cook Stove Using Multi Fuels *JENRR*, 3(4): 1-7, 2019. DOI: 10.9734/JENRR/2019/v3i430103.
- [2.54] Panwar, N. L. and Rathore, N.S., 2008. Design and performance evaluation of a 5 kW producer gas stove. *Biomass Bioenergy* 33:1349–1352.
- [2.55] Panwar, N.L., 2009. Design and performance evaluation of energy efficient biomass gasifier based cook stove on multi fuels. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, Springer, vol. 14(7), pages 627-633, October.
- [2.56] Yohannes, S. S., 2011. Design and performance evaluation of biomass gasifier cookstove; M.Sc thesis, Addis Ababa University, Ethiopia.
- [2.57] Kumar, H., Panwar, N.L. Experimental investigation on energy-efficient twin-mode biomass improved cookstove. *SN Appl. Sci.* 1, 760 (2019). <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0804-x>.
- [2.58] Obi O.F., Ezeoha L.S., Okorie C.I. Energetic performance of a top-lit updraft (TLUD) cookstove. *Renewable Energy* 99 (2016) 730-737. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2016.07.060>.
- [2.59] Loo J.D. at al. User Perspectives of Characteristics of Improved Cookstoves from a Field Evaluation in Western Kenya. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2016, 13, 167; 1-14. doi: 10.3390/ijerph13020167
- [2.60] Inayatullah J. , Sabir U. , Waqar A. , Noor P. K. , Syed M. A. ,Zafar M. , Muhammad N. A. , Shaikh S. A. Adoption of improved cookstoves in Pakistan: A logit analysis. *Biomass and Bioenergy* 103 (2017) 55-62. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.05.014> 0961-9534/
- [2.61] W.H. Greene, *Econometric Analysis*, fifth ed., Prentice Hall, 2003, pp. 736-740.
- [2.62] G. Shen, W. Lin, Y. Chen, D. Yue, Z. Liu, C. Yang, Factors influencing the adoption and sustainable use of clean fuels and cookstoves in China – a Chinese literature review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 51 (2015) 741-750.
- [2.63] Ouedraogo B., Household energy preferences for cooking in urban Ouagadougou, Burkina Faso, *Energy Policy* 34 (2006) 3787-3795.
- [2.64] Jennyfer W., Daniel M., Hector V. and Stella M. H. Adoption of Clean Cookstoves after Improved Solid Fuel Stove Programme Exposure: A Cross-Sectional Study in Three Peruvian Andean Regions. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2017, 14(7), 745; <https://doi.org/10.3390/ijerph14070745>
- [2.65] I. Ruiz-Mercado, O. Masera, H. Zamora, K.R. Smith, Adoption and sustained use of improved cookstoves, *Energy Policy* 39 (12) (2011) 7557-7566.
- [2.66] Ruiz-Mercado, I., Lam, N., Canuz, E., Davila, G., Smith, K.R., 2008. Low-cost temperature loggers as stove use monitors (SUMS). *Boiling Point* 55, 16–18.
- [2.67] S.T. Muneer, W.M. Mohamed. Adoption of biomass improved cookstoves in a patriarchal society: an example from Sudan, *Sci. Total Environ.* 307 (1-3) (2003) 259-266.



- [2.68] Mamuye F. , Lemma B., Woldeamanuel T .Emissions and fuel use performance of two improved stoves and determinants of their adoption in Dodola, southeastern Ethiopia. Sustainable Environment Research 28 (2018) 32-38. <https://doi.org/10.1016/j.serj.2017.09.003>
- [2.69] Jagger P., Kittner N. Deforestation and biomass fuel dynamics in Uganda. Biomass and Bioenergy 105 (2017) 1-9.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.06.005>.
- [2.70] Ramanathan, V. 2007.Role of Black Carbon in Global and Regional Climate Changes. <http://www-ramanathan.ucsd.edu/files/bc-testimony.pdf>. [Última consulta 14/04/2020]
- [2.71]Ramanathan, V., Carmichael, G.2008. Global and regional climate changes due to black carbon. Nat. Geosci. 1, 221–227. DOI: 10.1038/ngeo156.
- [2.72] UNFCCC, 2019. AMS-II.G. Small-Scale Methodology: Energy Efficiency Measures in Thermal Applications of Non-Renewable Biomass Version 10.0 SectoralScope(s):03.[https://cdm.unfccc.int/filestorage/1/F/S/1FSPVQM7JWELKHB5U94DXR23TOC6AZ/EB100\\_ren12\\_AMSII.G.pdf?t=QnJ8cHBmcHhxfDD4WnsRhxp0I9t-xRRTpRM](https://cdm.unfccc.int/filestorage/1/F/S/1FSPVQM7JWELKHB5U94DXR23TOC6AZ/EB100_ren12_AMSII.G.pdf?t=QnJ8cHBmcHhxfDD4WnsRhxp0I9t-xRRTpRM). [Última consulta 14/02/2020]
- [2.73] MacCarty N, Ogle D, Still D, Bond T, Roden C. A laboratory comparison of the global warming impact of five major types of biomass cooking stoves. Energy for Sustainable Development 2008; XII (2):56–65.





# **Capítulo 3**

## **Los combustibles tradicionales y los combustibles alternativos**





## **Capítulo 3. Los combustibles tradicionales y los combustibles alternativos.**

### **3.1. Preámbulo.**

Durante varias décadas se ha demostrado que la demanda de la madera con fines energéticos es una de las principales causas de la degradación de los ecosistemas forestales. Hasta hace poco, esto no se aplicaba en África Central, donde los recursos madereros se consideraban ilimitados. La especial atención que se presta actualmente a los ecosistemas de los bosques tropicales (biodiversidad, lucha contra el calentamiento global, mantenimiento de los servicios de los ecosistemas, etc.) ha puesto de relieve que la producción de la madera con fines energéticos es una de las principales causas de la degradación y deforestación de los bosques naturales en la periferia de los centros urbanos en todos los países en desarrollo. Esta observación debe, en adelante, orientar las políticas internacionales y nacionales en la gestión sostenible de los ecosistemas forestales mediante políticas de gestión apropiadas, a través de un mejor uso del recurso de la madera para la obtención de energía.

Para que la utilización de la biomasa leñosa fuera sostenible habría que poner en marcha varias acciones, entre las que destacamos tres: La primera sería actuar a nivel de "producción", aumentando el rendimiento de carbonización al pasar de los hornos de carbonización tradicionales a los hornos de carbonización mejorados. Una segunda línea de acción sería actuar a nivel de uso doméstico. Esto implicaría la sustitución de las estufas de cocina tradicionales por modelos de estufas mejoradas y, finalmente, la tercera acción sería pensar en un combustible alternativo a la leña. Este combustible alternativo provendría del uso energético de miles de toneladas de residuos agrícolas y forestales, transformándolos en briquetas y pellets de biocombustible. La estrategia de la R D Congo sobre energía sostenible para todos para 2030, incluye la mejora de las cadenas de valor del combustible leñoso a través de una mejor tecnología de carbonización, la promoción de mejores estufas de cocción y fuentes de energía alternativa para reducir el uso de combustible leñoso en un 50% [3.1-3.6].

### **3.2. Enfoque Sostenible del Aprovechamiento de los Recursos de Biomasa.**

#### **3.2.1. Enfoque no Sostenible del Sistema Actual.**

El actual sistema de cocción de alimentos utiliza estufas tradicionales de leña o carbón vegetal con baja eficiencia [3.7] energética, lo que lleva a un consumo excesivo de recursos, acentuando la deforestación por un lado, y por otro, generando elevadas emisiones de CO<sub>2</sub> y BC que contribuyen al cambio climático y al calentamiento global. Este enfoque del uso de los recursos de la biomasa es insostenible [3.8-3.9].

### 3.2.2. Enfoque Sostenible de los Recursos de Biomasa.

Un enfoque más sostenible en el uso de la energía en la cocina podría incluir, además de la biomasa tradicional (leña y carbón vegetal), el uso de biocombustibles alternativos derivados de residuos sólidos agrícolas (pellets y briquetas). La cocción se puede realizar en un gasificador multi-combustible con una alta eficiencia térmica, por encima del 60% [3.8-3.10, 3.11-3.12], así como de una menor emisión de contaminantes (CO, PM, BC y CO<sub>2</sub>). Se han realizado muchos estudios centrados exclusivamente en aumentar la eficiencia de las estufas mejoradas, con la opción de utilizar el mismo combustible tradicional, pero un enfoque más sostenible de la cocina debe incluir además combustibles alternativos.

### 3.3. El combustible tradicional.

La biomasa leñosa se utiliza en la RDC en dos formas diferentes: leña cogida directamente del bosque, sin tratamiento alguno y leña transformada en carbón vegetal.

- **La leña** se usa con mayor frecuencia en las comunidades rurales en la antigua estufa tradicional de tres piedras.

- **El carbón vegetal**, que proviene de la leña carbonizada se utiliza en las estufas de cocción mejorada o tradicional. El carbón vegetal se utiliza mucho más en las zonas urbanas y semi-urbanas. Su consumo es bajo en las zonas rurales [3.13].

#### 3.3.1. La leña.

Producida por el árbol, la madera es un material natural definido de manera diferente según el usuario y el interés. Pero en nuestro contexto lo definiremos como tejido vegetal. Constituye la mayor parte del tronco de las plantas leñosas. Desempeña un doble papel como conductor de la savia cruda y el tejido de soporte que le da resistencia a los tallos.

##### 3.3.1.1 Tipos de madera o leñas.

Si tomamos la madera para el sentido general, se pueden dividir en 3 categorías principales: las maderas duras, las blandas y madera de coníferas.

**Las maderas duras:** el roble, haya, castaño, olmo, fresno, acacia. Estas maderas tardan más en secarse, pero tienen un mayor poder calorífico y mayor duración de la combustión que otros tipos de madera.

**Las maderas blandas:** álamo, arce, abedul, tilo. Estas maderas tienen un poder calorífico ligeramente inferior a las maderas duras.

**Las maderas de coníferas** – pino marítimo, abeto, pino silvestre, abeto o alerce. Esta madera es a menudo mucho más rica en savia que otros tipos. Como resultado, además de quemar más rápido, tienden a obstruir los hornos y chimeneas si la temperatura de combustión no es lo suficientemente alta.

### 3.3.1.2. Propiedades físico-químicas de la madera.

- Composición química de la madera

La madera es una biomasa compuesta de materia orgánica, principalmente en forma de celulosa (alrededor del 50%), lignina (20-30%) y hemicelulosa (15-25%), así como de cantidades muy pequeñas (<1%) de elementos minerales como se detalla en la literatura [3.14-3.16]. En la composición química de la madera podemos retener cuatro elementos esenciales: carbono (C), oxígeno (O), hidrógeno (H) y nitrógeno (N) esta última en proporciones muchos menores. La composición de cada tipo de madera varía ligeramente dependiendo de su especie. A título indicativo, podemos encontrar la composición de los diferentes tipos de madera en la siguiente tabla 3.1.

**Tabla 3. 1 .Composición elemental de las especies de madera seca [en % en masa].**

| Tipos | C%   | H%  | O%   | N%  |
|-------|------|-----|------|-----|
| Haya  | 49.7 | 6.1 | 43.8 | 0.1 |
| Abeto | 49.0 | 6.0 | 44.9 | 0.1 |
| Roble | 49.5 | 5.4 | 44.7 | 0.3 |
| Álamo | 49.9 | 6.1 | 44.3 | 0.3 |
| Arce  | 49.5 | 6.0 | 44.3 | 0.1 |

Fuente :[15]

Como primera aproximación, podemos asumir que la composición elemental media de la madera seca es la siguiente: 50% de carbono, 44% de oxígeno y 6% de hidrógeno. Aunque contribuye a la emisión de óxidos de nitrógeno cuando se quema la madera, la presencia de nitrógeno (en forma de proteínas y aminos) no tiene importancia desde el punto de vista energético. Además, la madera también puede contener compuestos de azufre (0,02%) y cloro en cantidades extremadamente pequeñas (0,001 a 003%) [3.14].

### 3.3.1.4 Higroscopicidad de la madera.

Los estudios han demostrado que los productos demasiado secos o la madera demasiado húmeda aumentan las emisiones de CO y PM [3.17]. Cuando la madera está demasiado húmeda, no se quemará. Además el contenido de humedad de la madera reduce su poder calorífico y por tanto la energía que se puede utilizar para cocinar. La madera con un contenido de humedad de entre el 10 y el 15% tiende a arder a un ritmo constante. La madera que está demasiado seca puede quemarse demasiado rápido, lo que determina un aumento de las emisiones.



El contenido de humedad de la madera depende de varios factores, como las condiciones y la duración del almacenamiento, la parte del árbol recolectada, su granulometría, etc. El agua contenida en la madera puede clasificarse en tres categorías: i) agua libre, presente en la madera verde, que se elimina sin que la madera se encoja; ii) agua ligada, atrapada en la estructura de la madera, que provoca su contracción cuando se evapora; y, por último, iii) agua de constitución que entra en la composición química de la madera y que sólo puede liberarse por combustión.

La humedad de la madera en bruto puede variar entre un 15% y un 60%. Es decir, una humedad máxima del 60% para la madera verde, del 10% al 20% para la madera secada al aire (durante al menos 1 a 2 años), del 10% y menos para la madera secada artificialmente bajo flujo de aire caliente (durante 1 a 3 semanas). En general, independientemente de la especie de madera, el contenido de humedad de las maderas "secas al aire" se estabiliza en valores del 15% a los 20%, correspondientes a la humedad mínima del ambiente. El contenido de humedad de la madera influye considerablemente en la calidad de la combustión. Para quemar, la materia orgánica debe liberar primero toda el agua libre o ligada presente en su estructura. La vaporización de agua es un proceso altamente endotérmico, es decir, un proceso que necesita absorber parte del calor liberado por la combustión para poder tener lugar. Al mantener la temperatura en niveles relativamente bajos, la vaporización del agua no sólo ralentiza, sino que también degrada la calidad de la combustión, promoviendo así la emisión de material no quemado durante esta fase. En la tabla 3.2 se indica el poder calorífico inferior (LHV) de la madera de frondosa y de resinosa en función del contenido de humedad.

Tabla 3. 2. LHV de la madera en función de la humedad [MJ/kg]

| H[%] | Frondosa | Resinosa |
|------|----------|----------|
| 0    | 19       | 20       |
| 5    | 17,9     | 18,9     |
| 10   | 16,9     | 17,8     |
| 15   | 15,8     | 16,8     |
| 20   | 14,7     | 15,5     |
| 25   | 13,6     | 14,4     |
| 30   | 12,6     | 13,3     |
| 35   | 11,5     | 12,1     |
| 40   | 10,4     | 11       |
| 45   | 9,4      | 9,9      |
| 50   | 8,3      | 8,8      |
| 55   | 7,2      | 7,7      |
| 60   | 6,1      | 6,5      |
| 65   | 5,1      | 5,4      |
| 70   | 4        | 4,3      |
| 75   | 2,9      | 3,2      |

Fuente: [18]

Es importante señalar que no es recomendable quemar madera húmeda. Además de proporcionar menos energía que la seca, obstruye y deteriora el equipo, impide alcanzar la potencia nominal (en comparación con la madera seca) y libera más sustancias contaminantes. También provoca una combustión incompleta [3.19].

### 3.3.1.5 Contenido de ceniza de madera.

Las cenizas son el resultado de la oxidación de los elementos minerales inicialmente contenidos en la madera. Teóricamente, la madera contiene sólo entre un 0,3% y un 0,8% de minerales [3.16]. Las cenizas pueden desempeñar un papel perjudicial en el sistema de combustión ya que dan lugar a la formación de escorias, que pueden obstruir las rejillas de la cámara de combustión y plantean problemas de corrosión.

### 3.3.1.6. La combustión de la leña.

Cuando la madera se quema, simplemente libera en el aire el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) que ha absorbido durante su crecimiento. Por lo tanto, su impacto es neutro en el efecto de los gases de efecto invernadero, siempre y cuando se respete el equilibrio entre el desarrollo y la retirada del recurso de forma global.

#### 3.4.1.7. Poder calorífico del combustible.

Por definición, el poder calorífico de un combustible es la cantidad de energía liberada por la combustión completa de ese combustible. El combustible y el oxidante (normalmente aire) tomados a una temperatura y presión de referencia y los productos de la combustión devueltos a la misma temperatura. El valor del poder calorífico se refiere generalmente a las condiciones normales, es decir, a 273 K (es decir, 0°C) y a la presión atmosférica, es decir, 1 atm. (101325 Pa; 1,013 bares). En el caso de un combustible sólido, el calor liberado por la reacción de combustión se expresa en kilojulios por kg (kJ/kg).

Se definen dos tipos principales de poderes caloríficos:

- **El poder calorífico inferior (PCI) "LHV"** Esta es la energía liberada por la combustión de la biomasa sin recuperar el calor latente del vapor de agua producido por la combustión.
- **El poder calorífico bruto (PCS) "HHV"** Esta es la energía liberada por la combustión de la biomasa al recuperar el calor latente del vapor de agua producido por la combustión.

#### 3.3.1.8. Poder comburivoro.

El **poder comburivoro** es la cantidad de aire seco, medida en condiciones normales ( $T^a = 0^\circ\text{C}$  y  $P = 1\text{atm}$ ), necesario para la combustión completa y estequiometría de la unidad de combustible. Las unidades habituales:  $\text{Nm}^3/\text{kg}$  combustible o  $\text{Nm}^3/\text{Nm}^3$  combustible.

#### 3.3.1.9. Poder fumígeno.

El **poder fumígeno** es la cantidad de productos de la combustión ( $\text{Nm}^3$ ) que se producen en la combustión estequiometría de la unidad de combustible. En función de considerar o no el vapor de agua existente en los productos de la combustión, se definen **Poderes Fumígenos Húmedo y Seco**, respectivamente.

#### 3.3.1.10 La combustión completa del combustible.

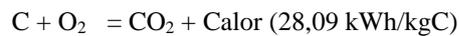
La combustión es un conjunto de reacciones de oxidación con desprendimiento de calor, que se producen entre dos elementos: el **COMBUSTIBLE**, que puede ser un sólido (Carbón, Madera, etc.) y el **COMBURENTE**, Oxígeno. La combustión se diferencia de otros procesos de oxidación lenta por el hecho de que es un proceso de oxidación rápida con presencia de llama; también se diferencia de otros procesos de oxidación muy rápida (detonaciones, deflagraciones y explosiones) por el hecho de que se mantiene una llama estable. Para que la combustión tenga lugar han de coexistir tres factores:



- **Combustible**
- **Comburente**
- **Energía de activación.**

Estos tres factores son necesarios para que la combustión pueda llevarse a cabo.

El comburente universal es el oxígeno, por lo que en la práctica se utiliza el aire como comburente, ya que está compuesto, prácticamente, por 21% Oxígeno (O<sub>2</sub>) y 79% Nitrógeno (N<sub>2</sub>). La energía de activación es el elemento desencadenante de la reacción de combustión. Las reacciones de combustión de los elementos que componen la madera son:



La **combustión estequiometria** Es la Combustión Completa realizada con la cantidad estricta de oxígeno; es decir, el aire empleado en la combustión es el mínimo necesario para contener la cantidad de oxígeno correspondiente a la oxidación completa de todos los componentes del combustible.

La combustión estequiométrica prácticamente es irrealizable, lo que obliga a operar con excesos de aire con el fin de lograr combustiones completas. La mayor parte de las combustiones no se realizan en estas condiciones ideales (completa y estequiometria), el principal aspecto a considerar es la posibilidad de que la combustión transcurra con exceso o defecto de aire, para caracterizar la proporción de oxígeno se define el parámetro "coeficiente de exceso de aire":

$n = \text{volumen aire por unidad de combustible} / \text{Poder Comburívoro}$

Así la combustión puede ser clasificada en:

$n = 1$ : Combustión estequiometria

$n < 1$ : Combustión defecto de aire, se dice que la mezcla es rica

$n > 1$ : Combustión exceso de aire, se dice que la mezcla es pobre.

La cantidad de aire necesaria para quemar un combustible depende de las características de este. A esta cantidad "estequiométrica", que es requerida por la ecuación química de la combustión, se le añade un ligero exceso de aire para asegurar que todas las moléculas del combustible estén en contacto con el oxígeno. En efecto, en el caso de las estufas, es necesario contemplar que ciertas moléculas de oxígeno pasarán a través de la estufa sin unirse al combustible, esto se hace para evitar tener zonas donde el proceso de combustión se quede localmente sin oxígeno. Lo que significa que se va a trabajar con un exceso de aire de combustión, que en el caso de la biomasa asciende a un 20% aproximadamente [3.21-3.22]. En resumen, el suministro de aire para el proceso de combustión debe ser adecuado para la combustión teórica y también proporcionar "exceso de aire" para asegurar una combustión completa.

La combustión que se realiza con una cantidad de oxígeno insuficiente, se le denomina combustión incompleta. Da como resultado la producción de elementos no quemados (carbón negro u hollín y otros) y de elementos parcialmente oxidados que aún pueden quemarse, como el monóxido de carbono (CO), que es un gas muy peligroso, comúnmente conocido como "el asesino silencioso", es inodoro y pasa al torrente sanguíneo uniéndose a la hemoglobina en lugar del oxígeno impidiendo el transporte de este último a las células. Un nivel de 0,2% de CO en el aire puede causar la muerte en menos de media hora. La figura 3.1 muestra la evolución de la composición de los gases de combustión en función del exceso de aire en el caso de una combustión premezclada (aire y combustible).

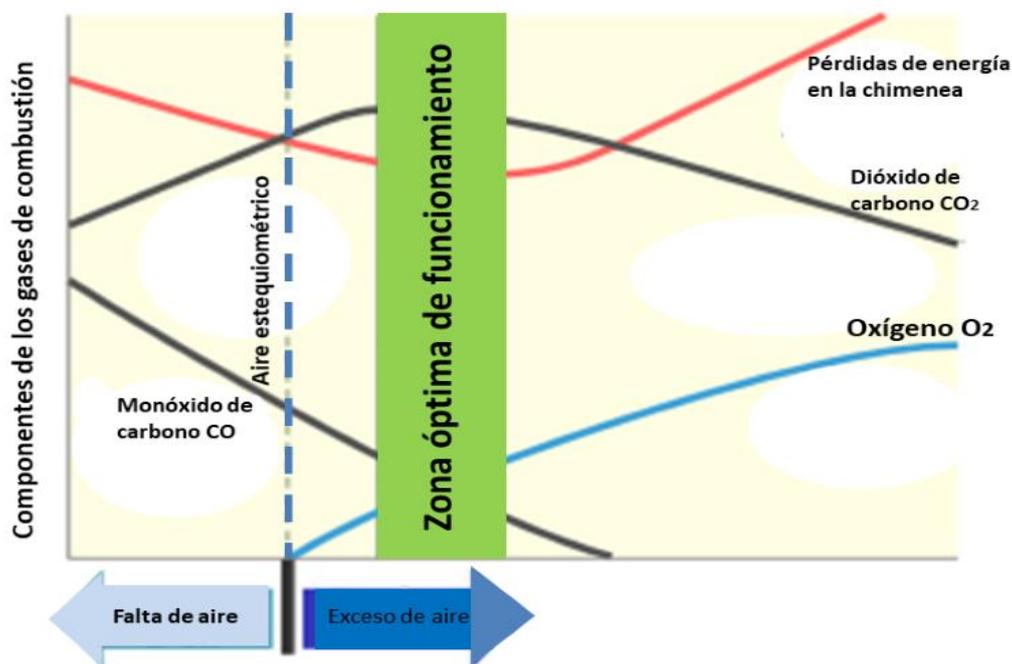


Fig.3.1. Componentes de los gases de combustión.

Fuente: [3.23]

En el eje de abscisas se indica la cantidad de aire, la combustión estequiométrica se produce en el punto señalado con la línea gruesa, tal que no hay ni exceso ni defecto de aire. A la derecha de este punto tendremos exceso y a la izquierda defecto de aire. En el eje de ordenadas se encuentran las concentraciones de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$  y  $\text{CO}$  (en 3 escalas diferentes, no mostradas). Podemos ver: i) que cuando hay un exceso de aire, hay oxígeno residual en los gases de combustión y que la concentración de  $\text{CO}_2$  disminuye por dilución por este; ii) que cuando hay falta de aire, no queda oxígeno en los gases de combustión, ya que todo se utiliza para oxidar el combustible pero que el contenido de  $\text{CO}$  aumenta con la falta de aire. La presencia de  $\text{CO}$  significa que parte del carbono del combustible no se ha oxidado completamente pasando a  $\text{CO}_2$ . Se observa que, en realidad, la presencia de  $\text{CO}$  aparece cuando, al reducir el exceso de aire, nos acercamos a la estequiometría. Esto se debe a la dificultad de que el  $\text{CO}$  se oxide completamente si no hay un pequeño

exceso de oxígeno en la llama. Por eso, en la práctica, siempre se mantiene el exceso de aire (la banda verde del gráfico). A la derecha de esta zona, los humos se diluyen innecesariamente con el exceso de aire, lo que reduce la eficiencia de la combustión. En este caso hablamos de "combustión completa con exceso de aire". A la izquierda de esta zona, parte del carbono no se quema completamente (presencia de CO y hollín) lo que significa que parte del combustible se desperdicia y emite CO y partículas peligrosas para la salud. Lo que se denomina "combustión incompleta" [3.23].

### 3.3.2. Carbón vegetal.

El carbón vegetal es un residuo de carbono negro ligero producido por la eliminación del agua y otros componentes volátiles de materiales vegetales. El carbón vegetal se produce generalmente por pirólisis lenta, es decir, el calentamiento de la madera u otros materiales orgánicos en ausencia de oxígeno.

#### 3.3.2.1 La Carbonización.

La carbonización es la transformación más o menos rápida de una sustancia orgánica en carbón (carbono) bajo el efecto del calor. La carbonización puede implicar varias operaciones de transformación química distintas como la Pirólisis, que es una transformación por calor en ausencia de aire.

La carbonización es un proceso químico de combustión incompleta de ciertos sólidos sometidos a un alto calor en ausencia de oxígeno. Bajo la acción del calor, la carbonización elimina el hidrógeno y el oxígeno del sólido, de modo que el carbón vegetal restante está compuesto principalmente de carbono.

La pirólisis de la madera, a veces llamada "destilación", "destilación seca", "destilación destructiva" o "carbonización", da lugar, en todos los casos, a un residuo sólido, carbón vegetal, así como a varias fracciones que se condensan para formar ácido pirolíneo y diversos alquitranes.

Los dispositivos de carbonización son los hornos de carbonización forman parte de los sistemas de carbonización por combustión de carga parcial. La técnica se basa en el hecho de que una parte de la carga de madera debe ser quemada para liberar la energía necesaria para el secado y la carbonización de la masa. Se distinguen tres tipos de hornos de carbonización, el horno vertical tradicional (el frente de carbonización se mueve hacia arriba y hacia abajo en forma de abanico), el horno horizontal (el frente de carbonización se mueve de un lado a otro) y el horno mejorada o horno Casamance. En este último caso, la principal mejora es el uso de una chimenea prefabricada. El uso de la chimenea permite una carbonización más rápida y una circulación más fácil de los gases de la pirólisis. De esta forma se mejora la eficiencia gracias al tiro inverso. Un horno de 100 m<sup>3</sup> de leña sólo puede requerir carbonización durante 3 días y enfriamiento durante 4 días [3.13, 3.24-3.28].

### 3.3.2.2. Caracterización del carbón vegetal.

La tabla 3.3 presenta las diferentes especies utilizadas para la producción de carbón vegetal en las tres principales ciudades de la RDC. Estas mismas especies son las más utilizadas para la producción de leña. Las características termofísicas del carbón vegetal en Kinshasa se detallan en la tabla 3.4.

**Tabla 3. 3. Los tipos de especies más utilizadas para la producción de carbón vegetal.**

| Ciudad de Kinshasa       | Ciudad de Bandundu       | Ciudad de Kisangani       |
|--------------------------|--------------------------|---------------------------|
| Pentaclethra eetveldeana | Pentaclethra eetveldeana | Gilbertiodendron dewevrei |
| Millettia laurentii      | Millettia laurentii      | Cynometra sessiliflora    |
| Cynometra sessiliflora   | Cynometra sessiliflora   | Holoptelea grandis        |
| Sclerocroton cornutus    | Sclerocroton cornutus    | Julbernadia seretii       |
| Acacia auriculiformis    | Acacia auriculiformis    | Xylopiya aethiopica       |

Fuente :[3.29]

**Tabla 3. 4. Características termo físicas del carbón vegetal de leña de Kinshasa.**

| Densidad              | Humedad | Materia volátil | Cenizas | Carbón fijo | PCS                    | PCI                    |
|-----------------------|---------|-----------------|---------|-------------|------------------------|------------------------|
| [kg.m <sup>-3</sup> ] | [%db]   | [%db]           | [%db]   | [%db]       | [MJ.kg <sup>-1</sup> ] | [MJ.kg <sup>-1</sup> ] |
| 365                   | 7       | 13              | 2       | 85          | 30.2                   | 29.8                   |

Fuente: Elaboración propia

### 3.3.3. La leña y carbón vegetal: un aspecto comparativo.

La transformación de la leña en carbón vegetal siempre va acompañada de grandes pérdidas de energía. Esto puede llevarnos a concluir rápidamente que no siempre es apropiado carbonizar la madera. Sin embargo, sería más prudente tener en cuenta el rendimiento global de la extracción de la leña hasta la quema de carbón vegetal, en comparación con el rendimiento de la leña quemada directamente. Entre la leña y el carbón vegetal, hay que elegir el que dé más calor por unidad de volumen o peso de combustible [3.13]. La ventaja de quemar carbón vegetal en comparación con la madera es la ausencia de agua y otros componentes. Esto permite que el carbón vegetal se queme a temperaturas más altas, y que emita muy poco humo [3.30].



### **3.4. Los combustibles alternativos.**

#### **3.4.1. Problemática.**

El uso de combustibles tradicionales (leña y carbón vegetal) con estufas ineficientes tiene un impacto negativo en el uso de los recursos locales. Sin embargo, muchos pueblos y ciudades en los países del África subsahariana tienen una gran cantidad de desechos agrícolas y urbanos que pueden ser utilizados con fines energéticos, no para cubrir completamente las necesidades de energía local para cocinar y calentar, sino para apoyar la alta demanda de energía de una población en constante crecimiento. En los siguientes párrafos nos dedicaremos a una breve discusión de estos tipos de biocombustibles sólidos que tienen un atractivo impacto ambiental y social.

#### **3.4.2. Proceso de producción de briquetas biocombustibles sólidos a partir de residuos agrícolas.**

Las briquetas de residuos agrícolas pueden ser un sustitutivo parcial importante del carbón vegetal o de la leña. Se obtienen mediante el siguiente proceso de fabricación:

1. La recolección de biomasa
2. La carbonización
3. La molienda del producto carbonizado
4. La mezcla con un aglutinante
5. La densificación
6. El secado

##### **3.4.2.1. Recogida y preparación de la biomasa.**

Las fuentes bibliográficas ponen de relieve una amplia variedad de biomasa, distinta de la madera, que puede ser utilizadas en lugar de carbón vegetal, como residuos agrícolas y agroindustriales (tallos de mijo y algodón, cáscara de arroz, cáscara de maní, etc.).

##### **3.4.2.2. Pirolisis o carbonización.**

Es la descomposición térmica de la materia orgánica en ausencia de oxígeno o en una atmósfera pobre en oxígeno. El equipo utilizado para este paso puede ser extremadamente variable. Por ejemplo, los pequeños productores utilizan hornos sencillos contruidos con latas de hierro reciclado, tanques metálicos de 200 litros transformados en pirolizadores.

##### **3.4.2.3. La trituración.**



Los residuos obtenidos de la pirolisis son generalmente en forma de polvo. La molienda se realiza para obtener un polvo casi homogéneo con una granulometría de 1mmx1mm.

#### **3.4.2.4. La adición de un aglutinante.**

Este polvo se mezcla con un aglutinante para permitir su compactación. Las fuentes bibliográficas mencionan un cierto número de aglutinantes: almidón, goma arábica, melaza y arcilla.

#### **3.4.2.5. La densificación de los residuos obtenidos en briquetas de carbón.**

Esta etapa muestra una gran variabilidad en las técnicas utilizadas: la densificación puede realizarse con prensas manuales o industriales según el nivel de mecanización elegido. La elección de la prensa depende de la capacidad de producción deseada.

Un aspecto importante de este paso es la elección de la forma de las briquetas y el nivel de densificación. La combustión no se producirá de la misma manera si el carbón se encuentra en forma de bolas o briquetas. El nivel de densificación influirá directamente en la velocidad de la combustión, será menos homogéneo en el caso de la densificación manual que en el caso de la densificación mecánica.

#### **3.4.2.6. Secado de briquetas.**

El propósito de este paso es reducir el nivel de humedad para mejorar la combustión de las briquetas. El secado se puede realizar al aire libre en zonas de baja pluviosidad. Sin embargo, existen muchos tipos de estructuras de secado.

#### **3.4.3. Problema de adopción de un nuevo modelo de biomasa para la cocina.**

Las briquetas de biocombustible tienen el mismo aspecto exterior que el carbón vegetal y se utilizan en las mismas condiciones que este, es decir, con el mismo tipo de estufa utilizada por los hogares, por lo tanto respeta las tradiciones y los hábitos culinarios locales, lo que permite una rápida apropiación, integración y de adopción sin dificultades por parte de la población local.

#### **3.4.4. Caracterización briquetas biocombustibles.**

Las briquetas se fabrican a partir de residuos agrícolas sólidos (BSW). En RDC, los residuos más utilizados son como cáscaras de cacahuete y cascarilla de arroz. La cantidad de residuos de cáscara de cacahuete producida anualmente en la República Democrática del Congo se estima en 114.000 toneladas y la de cáscara de arroz ronda las 133.200 t / año [3.31]. Las diferentes dosificaciones de estos residuos se detallan en la tabla 3.5.

**Tabla 3.5. La dosificación de las diferentes muestras [en % de masa].**

| Muestra      | E1% | E2% | E3% | E4% | E5% |
|--------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| <b>BSW 1</b> | 50  | -   | 32  | 15  | 15  |
| <b>BSW 2</b> | -   | 50  | 30  | 10  | 10  |
| <b>BSW 3</b> | -   | 20  | 50  | 15  | 15  |

E1= biochar arroz, E2=biochar cacahuete, E3= serrin, E4=pasta de papelería, E5= fibra xileno de mandioca.

La composición elemental y las diferentes propiedades termo físicas se presentan en las tablas 3.6 y 3.7 respectivamente, valores que se han obtenido siguiendo las normativas vigentes [3.32-3.38].

**Tabla 3.6. La composición elemental de las especies BSW [en % mass].**

| Muestra      | C%    | H%   | N%   | O%    |
|--------------|-------|------|------|-------|
| <b>BSW 1</b> | 51.71 | 2.41 | 0.76 | 45.12 |
| <b>BSW 2</b> | 52.54 | 3.26 | 0.77 | 43.43 |
| <b>BSW 3</b> | 50.66 | 2.75 | 0.59 | 46    |

Fuente : Elaboracion propia

**Tabla 3.7. Características termo físicas de las briquetas BSW.**

|              | Densidad [kg.m <sup>-3</sup> ] | Humedad [%db] | Materia volátil [%db] | Cenizas [%db] | Carbón fijo [%db] | PCS [MJ.kg <sup>-1</sup> ] | PCI [MJ.kg <sup>-1</sup> ] |
|--------------|--------------------------------|---------------|-----------------------|---------------|-------------------|----------------------------|----------------------------|
| <b>BSW 1</b> | 520                            | 7.47          | 34.26                 | 24.55         | 33.72             | 17.70                      | 17.67                      |
| <b>BSW 2</b> | 550                            | 10.18         | 36.01                 | 25.79         | 28.01             | 17.72                      | 17.68                      |
| <b>BSW 3</b> | 560                            | 10.27         | 38.82                 | 19.03         | 32.88             | 18.37                      | 18.34                      |

Fuente :Elaboración propia

La siguiente figura 3.2 muestra las briquetas formadas con gránulos BSW3. Con forma cilíndrica de 2 mm de diámetro y 3.5 mm altura que fueron utilizadas en el experimento.



**Fig. 3. 2. Briquetas BSW3 densificados.**

Los residuos de biomasa sólida procedentes de actividades agrícolas son muy variados en los bosques y sabanas de la República Democrática del Congo. Sus cantidades se estiman en miles de toneladas anuales. En este trabajo, hemos seleccionado algunas composiciones y escogido las más prometedoras en términos de propiedades termo físicas. En las pruebas realizadas, hemos trabajado con BSW3 que tiene un mayor poder calorífico que las otras composiciones BSW1 y BSW2, y cuyas características se muestran en la tabla 3.7.

### **3.5. Conclusión.**

Para la preparación de alimentos es necesario disponer del equipo en donde se producirá la combustión y del combustible. En el capítulo 5 se estudiará el diseño óptimo del equipo y en el actual se ha indicado los posibles combustibles utilizados en la preparación de alimentos.

Estos combustibles, en definitiva, van a partir de madera y ser utilizados de forma directa o con alguna transformación. Así se tiene que en las estufas se puede quemar directamente la leña o, partiendo de ella, procesarla para obtener un combustible más compacto, esto es, de menor peso o que provenga de residuos forestales, en lugar de la tala de árboles. La ventaja de quemar leña directamente es que no necesita ningún procesado, pero generalmente proviene de talas incontroladas y su peso es elevado. En segundo lugar se tiene el carbón que, al ser manufacturado a partir de la leña, también puede provenir de talas incontroladas, pero la ventaja está en el menor peso y volumen, asunto bastante importante cuando hay que abastecer de este combustible a ciudades tan densamente pobladas como Kinshasa, teniendo además, una manipulación más sencilla en las estufas que, por lo general, se pretende que sean de reducido tamaño. En tercer lugar están las briquetas de combustible, que tienen la ventaja de ser de elevada densidad, por tanto fácilmente



manipulables y al proceder de residuos agrícolas se soslaya el problemas de talas abusivas y la consiguiente desertificación.

### Referencias bibliográficas del capítulo 3.

- [3.1] Sola P., Schure J., Eba'a Atyi R., Gumbo D., Okeyo I., Awono A., 2019. Woodfuel policies and practices in selected countries in Sub-Saharan Africa – a critical review. *Bois et Forêts des Tropiques*, 340: 27-41. Doi : <https://doi.org/10.19182/bft2019.340.a31690>
- [3.2] Schure J., Ingram V., Assembe-Mvondo S., Mvula-Mampasi E., Inzamba J., Levang P., 2013. La filière bois énergie des villes de Kinshasa et Kisangani. In: Marien J.-N., Dubiez E., Louppe D., Larzillière A (eds.), *Quand la ville mange la forêt: les défis du bois-énergie en Afrique centrale*. France, Éditions Quæ, 27-44.
- [3.3] MECNDD, 2016. Arrêté Ministériel No 025/CAB/MIN/ECN-DD/ CJ/00/RBM/2016 du 09 Fév. 2016 portant dispositions spécifiques relatives à la gestion et à l'exploitation de la concession forestière des communautés locales. Le Ministère de l'Environnement, Conservation de la Nature et Développement Durable.
- [3.4] MECNT, 2013. Stratégie-Cadre Nationale REDD de la République démocratique du Congo. Fcpf and Un-Redd Kinshasa, MECNT. <https://www.forestcarbonpartnership.org/sites/fcp/files/2015/March/Strategie-cadre%20nationale%20REDD%20de%20la%20RDC.pdf>. (Ultima consulta 14/06/2020)
- [3.5] RDC, 2015. Soumission de la contribution nationale prévue déterminée au niveau national au titre de la Convention des Nations unies sur les changements climatiques. Kinshasa, République démocratique du Congo. <https://www4.unfccc.int/sites/ndcstaging/PublishedDocuments/Democratic%20Republic%20of%20the%20Congo%20First/CPDN%20%20R%20C3%20A9p%20D%20C3%20A9m%20du%20Congo.pdf>. (Ultima consulta 14/08/2020)
- [3.6] Sustainable Energy for All, République démocratique du Congo, PNUD, 2013. Rapport national énergie durable pour tous à l'horizon 2030. Programme National et Stratégie. [http://www.cd.undp.org/content/dam/dem\\_rep\\_congo/docs/eenv/UNDP-CD-RAPPORT-ENERGIE-DURBALE-POUR-TOUS-HORIZON-2030.pdf](http://www.cd.undp.org/content/dam/dem_rep_congo/docs/eenv/UNDP-CD-RAPPORT-ENERGIE-DURBALE-POUR-TOUS-HORIZON-2030.pdf). (Ultima consulta 14/10/2020)
- [3.7] Kituyi, E., Marufu, L., Wandiga, S.O., Jumba, I.O., Andreac, M.O., Helas, G.: Carbon monoxide and nitric oxide from biofuel fires in Kenya. *Energy Conserv. Manage.* 42, 1517–1524 (2001)
- [3.8] Belonio, A.T.: Cookstove initiatives on production, promotion and commercialization: the CPU experience. Paper presented at the consultation meeting on the formulation of a national cookstove program held at Silliman University, Dumaguete City, Negros Oriental, 3–5 November 1993
- [3.9] Hossain, M.M.G.: Improved cookstove and biogas programmes in Bangladesh. *Energy Sustain. Dev.* 7(2), 97–100 (2003).
- [3.10] Panwar, N.L., Kurchania, A.K., Rathore, N.S.: Mitigation of greenhouse gases by adoption of improved biomass cookstoves. *Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Change* 14, 569–578 (2009).
- [3.11] Kishore, V.V.N., Ramana, P.V.: Improved cookstoves in rural India: how improved are they? A critique of the perceive benefit from the national programme on improved chulhas (NIPC). *Energy* 27, 47–63 (2002).
- [3.12] Panwar N.L. Performance Evaluation of Developed Domestic Cook Stove with Jatropha Shell. *Waste Biomass Valor* (2010) 1:309–314. DOI 10.1007/s12649-010-9040-8.
- [3.13] Babou N. (1986). Carbonisation du bois et de la tourbe en four métallique transportable. Analyse du produit final. ISRA, Senegal, 1986.
- [3.14] Hazard C., Barette J.P., Meyer J. (1996), *Mémotech : bois et matériaux associés* ; Paris, Editions Casteilla, 455 p.



- [3.15] Collet S. (2000), Facteurs d'émission. Emissions de dioxines, de furanes et d'autres polluants liées à la combustion du bois naturel et adjuvanté ; Rapport INERIS, INERIS-DRC n°00/60- MAPA-SCO-25420, 68 p.
- [3.16] Rogaume Y. (2009), La combustion du bois et de la biomasse, Pollution atmosphérique, Numéro spécial/Le bois énergie : Enjeux écologiques et de santé environnementale, p.66-81
- [3.17] Yuntanwi, Ernestine & MacCarty, Nordica & Still, Dean & Ertel, Jürgen. (2008). Laboratory study of the effects of moisture content on heat transfer and combustion efficiency of three biomass cook stoves. *Energy for Sustainable Development*. 12. 66-77. 10.1016/S0973-0826(08)60430-5.
- [3.18] Connaissance des énergies, 2019. <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/bois-energie>
- [3.19] Bois de chauffe, 2019. <https://www.picbleu.fr/page/bois-de-chauffage-pouvoir-calorifique-pci-pcs-sechage-stockage>. (Ultima consulta 21/10/2020)
- [3.20] RECORD, 2008. Voies alternatives à la combustion classique - Etat de l'art, 2008, 110 p, n°06-0224/1A.
- [3.21] Combustion et combustibles, 2019. <https://energieplus-lesite.be/theories/chauffage11/combustion-et-combustibles>
- [3.22] combustion fundamentals.2020. Online: <https://www.myodesie.com/wiki/index/returnentry/id/3054>(acceded 08/04/2020) (Ultima consulta 24/10/2020)
- [3.23] J.Michotte, 2013. Comment interpréter une analyse des fumées de combustion? <https://energie.wallonie.be/fr/comment-interpreter-une-analyse-des-fumees-de-combustion.html?IDC=8049&IDD=97827>
- [3.24] FAO, 1983. « Techniques simples de carbonisation »pp.1-152 Document n°41.Food and Agriculture Organization,Rome. (Ultima consulta 24/10/2020)
- [3.25] Foley G., 1986. Charcoal making in developing contries”pp.1-214.Earthscan, London.
- [3.26] Schenkel Y.,Bertaux P.,Stephane V.,José C. 1997.Evaluation de la technique de carbonisation en meule.*Biotechnol.Agron.Soc.Environ*.1997 1(2),113-124.
- [3.27] Schenkel Y. (1990). « Essais d'accompagnement des Bateke.Experimentation de carbonisation par le secteur privé.note de synthese des premiers resultats ».pp1-12.Centre de recherches agronomiques,Zaire Trading and engineering.
- [3.28] Schenkel Y. (1991). « Essais d'accompagnement des Bateke.Experimentation de carbonisation par le secteur privé.Rapport », pp.1-10. Centre de recherches agronomiques,Zaire Trading and engineering.
- [3.29] Schure, J., Ingram, V. and Akalakou-Mayimba, C. 2011. Bois énergie en RDC: Analyse de la filière des villes de Kinshasa et Kisangani. Yaoundé, CIFOR, Projet Makala (<http://makala.cirad.fr/>).
- [3.30] Charcoal.2020. Online: <https://en.wikipedia.org/wiki/Charcoal>. (Última consulta 08/10/2020).
- [3.31] Hurtado Pérez, E.; Mulumba Ilunga, O.; Alfonso Solar, D.; Moros Gómez, M.C.; Bastida-Molina, P. Sustainable Cooking Based on a 3 kW Air-Forced Multifuel Gasification Stove Using Alternative Fuels Obtained from Agricultural Wastes. *Sustainability* 2020, 12, 7723. <https://doi.org/10.3390/su12187723>
- [3.32] Norma UNE-EN 14774-3. Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido de humedad. Método de secado en estufa. Parte 2: Humedad total. Método simplificado. AENOR. Julio 2010.
- [3.33] Norma UNE-EN 15103. Biocombustibles sólidos. Determinación de la densidad a granel. AENOR. Noviembre 2010.
- [3.34] Norma UNE-EN 15104. Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido total de carbono, hidrógeno y nitrógeno. Métodos instrumentales. AENOR. Noviembre 2011.
- [3.35] Norma UNE-EN 15148. Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido en materias volátiles. AENOR. Septiembre 2010
- [3.36] Norma UNE-EN 14775. Biocombustibles sólidos. Método para la determinación del contenido en cenizas. AENOR. Septiembre 2010.



[3.37] Norma UNE-EN 14918. Biocombustibles sólidos. Determinación del poder calorífico. AENOR. Febrero 2011.

[3.38] Norma UNE-EN 15289. Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido total de azufre y cloro. AENOR. Mayo 2011.





# **Capítulo 4**

## **Protocolos de prueba sobre las estufas de cocción**





## Capítulo 4. Protocolos de prueba sobre las estufas de cocción.

### 4.1. Introducción.

El funcionamiento de las estufas de cocción o “cookstove” (CS) puede evaluarse mediante dos enfoques diferentes: protocolos de prueba basados en laboratorio y pruebas de campo [1]. Los protocolos establecidos para pruebas de laboratorio tradicionalmente están destinados a la optimización del diseño y representan herramientas para que los diseñadores de estufas evalúen los cambios en el rendimiento debido a los diferentes diseños y características. Por ello se realizan en un entorno de laboratorio controlado, lo que debería permitir evitar cualquier variabilidad relacionada con las condiciones externas y con el comportamiento del usuario que puede influir de forma importante en el rendimiento del "sistema de cocción" [4.1, 4.2-4.11]. Por otro lado, los protocolos de campo generalmente consisten en encuestas prolongadas para medir el ahorro de combustible entre los hogares que utilizan una estufa de cocción mejorada o “improved cookstove” (ICS), en comparación con modelos anteriores. Estos protocolos realizados en campo también pueden proporcionar información fiable sobre el rendimiento energético real de una estufa cuando se realiza en una situación real de uso, sobre todo si la evaluación en el campo se realiza empleando monitores de uso de la estufa (SUM), que son registradores de datos de temperatura y/o emisiones de bajo costo. Este último se puede instalar en las ICS para obtener estimaciones fiables de su patrón de utilización [4.1, 4.12]. En algunos casos, las campañas de campo pueden incluir también una evaluación del rendimiento de emisión de las estufas en un contexto real de uso. Algunos ejemplos son Bailis et al. [4.1, 4.12] y Roden et al. [4.13] que evaluaron las emisiones de PM, CO y CO<sub>2</sub> de las estufas en Kenia y Honduras, respectivamente. Johnson et al. [4.3] evaluaron las emisiones medidas en el campo en México, incluyendo también CH<sub>4</sub> y TNMHC (hidrocarburos totales sin metano). Se supone que las pruebas de campo (que incluyen el nivel de adopción de una estufa mejorada) siguen a las pruebas de laboratorio (que ayuda a la optimización del diseño) para una evaluación efectiva de la energía consumida por la estufa [4.1].

### 4.2 Diferentes protocolos de prueba sobre las estufas de cocción.

En esta sección se revisarán diferentes protocolos que serán utilizados en las pruebas realizadas en el presente trabajo, estos son:

- Prueba de ebullición de agua “Water Boiling Test” (WBT).
- Prueba de cocina controlada “Controlled Cooking Test” (CCT).
- Prueba de rendimiento de cocina “Kitchen Performance Test” (KPT)
- Protocolo de seguridad “Biomass stove security protocol” (BSSP).



## 4.2.1 Prueba de ebullición de agua “Water Boiling Test” (WBT).

### 4.2.1.1. Preámbulo.

La prueba de agua en ebullición (WBT) es una simulación simplificada del proceso de cocción real utilizando solamente el agua. Esta prueba sirve para medir la eficiencia energética de una estufa de cocción y la cantidad de emisiones producidas cuando se utiliza para calentar agua en una olla [4.14]. Este método, cuando se utiliza para medir la eficiencia energética de una CS, no requiere de equipos complejos, por lo que puede utilizarse en cualquier lugar. Sin embargo, el método WBT sí que necesitaría de equipos más sofisticados si se realizaran la prueba de emisiones contaminantes. Las principales ventajas y beneficios de un WBT son:

- Proporciona evaluaciones iniciales bajo condiciones de laboratorio estrictas y controladas, como la eficiencia energética de una CS.
- Ofrece una primera comparación de la eficiencia energética de diferentes diseños de CS al realizar tareas similares.
- Puede evaluar los cambios de diseño durante el desarrollo de las CS.
- Puede determinar que la ICS diseñada se adecua al rendimiento proyectado durante el diseño.

Aunque que el WBT es una herramienta útil por las razones anteriores, es importante tener en cuenta sus limitaciones, ya que es una aproximación al proceso de cocción y se realiza bajo condiciones controladas por técnicos calificados. Los resultados de las pruebas de laboratorio pueden diferir de los resultados obtenidos al cocinar alimentos reales y con combustibles y cocineros locales, a pesar de que la eficiencia y las emisiones se midan exactamente de la misma forma para ambas pruebas. Para confirmar los impactos reales, ya sea ahorro de combustible, reducción de humo u otros impactos, las mediciones en las estufas deben hacerse en condiciones reales de uso, esta es la deficiencia de este método que, no obstante, lo utilizaremos para realizar aproximaciones [4.1, 4.14-4.15].

### 4.2.1.2 Proceso del WBT

El protocolo WBT 4.2.3 contiene tres pasos o fases, la primera fase es el arranque en frío a alta potencia "High Power Cold Start" (APAF). La segunda fase es el arranque en caliente a alta potencia "High Power Hot Start" (APAC) y finalmente, la tercera fase es de baja potencia "Low Power" (BP). El ciclo de un WBT 4.2.3 comienza con la primera fase que consiste en que el agua, a temperatura ambiente contenida en una olla, es llevada a la temperatura de ebullición por la estufa a ensayar. La segunda fase se realiza después de la primera mientras la estufa cocción aún está caliente. Durante la segunda fase, mientras la cámara de cocción aún retiene la inercia térmica de la primera fase, la olla se reemplaza por una olla nueva que contiene agua a temperatura ambiente y que se llevará al punto de ebullición. Finalmente, la tercera fase, de baja potencia, emula una cocción a fuego lento, se controla con precisión la potencia de fuego para mantener el agua caliente de la segunda fase entre dos temperaturas límites, la temperatura de ebullición y la temperatura de ebullición menos seis grados centígrados ( $T_{boil}^{\circ}C - 6^{\circ}C$ ) durante al menos 45 minutos [4.1,4.14, 4.15]. Durante esta fase de cocción a fuego lento, el objetivo principal es mantener la temperatura del agua lo más constante posible y cerca del punto de ebullición. Durante esta fase, la potencia de fuego

debe reducirse en comparación con la fase de alta potencia. Este paso a fuego lento simula el período de cocción de alimentos como las leguminosas, muy común en la gran mayoría de los hábitos de cocina. Realmente, en un proceso de cocción real, una estufa de cocina funciona la mayor parte de su tiempo de cocción a fuego lento. La evolución de la WBT se ilustra en figura 4.1

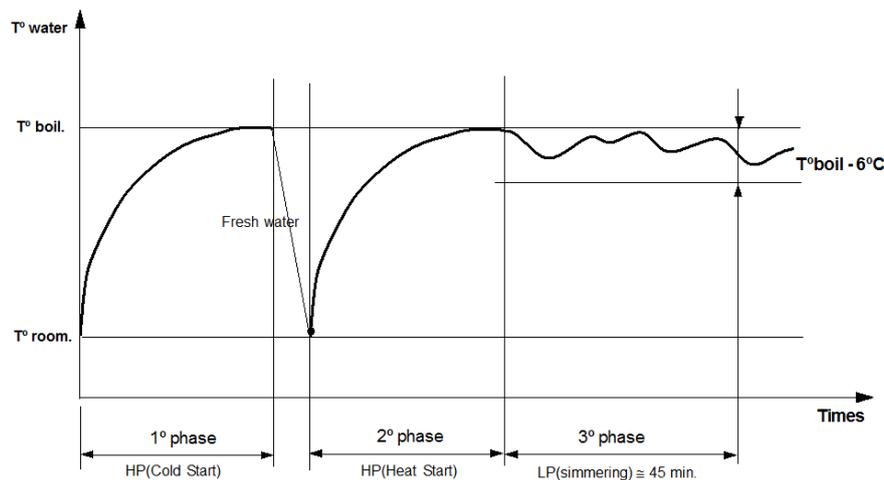


Fig.4. 1.Proceso de un WBT.

**Fuente:** Elaboración propia a partir de [4.1, 4.14].

En estufas de poca masa o baja inercia térmica, que se corresponden con estufas que tienen la cámara de combustión sin cerámica, se puede realizar la prueba WBT en dos fases. Para las estufas con paneles cerámicos que tienen elevada inercia térmica, es necesario realizar la fase de arranque en frío para ver la interacción de la energía almacenada en la cerámica en el funcionamiento de la estufa de cocción. De hecho, las pruebas anteriores de WBT han demostrado que las fases de arranque en frío y en caliente producen resultados similares para las estufas de reducida masa, por lo que para la evaluación de las cocinas de esta tipología, puede realizarse las pruebas solo en dos fases.

#### 4.2.1.3 Las disposiciones prácticas de la WBT y el desarrollo de la prueba.

- **Combustible**

El combustible utilizado debe ser bien caracterizado antes de la prueba WBT. El tipo, tamaño y contenido de humedad del combustible tienen un impacto significativo en los resultados de las pruebas de rendimiento de la estufa de cocina. Por esta razón, todas las pruebas de una sola estufa de cocción, o todas las pruebas de comparación de diseño de estufas de cocción, deben realizarse con un combustible del mismo tipo, con el mismo contenido de humedad, tamaño similar y disponible en la localidad en la que se va a introducir la estufa. Si el combustible es madera, el tamaño es de las piezas a quemar es de 1.5 x 1.5 x 30 cm o 3 x 3 x 50 cm. Para el carbón vegetal, se usa granulometría de 3 x 3 cm o 4 x 4 cm dependiendo del tamaño de la cámara de combustión de la estufa de cocción. No existe estandarización, pero elegido un tipo, un tamaño,

un contenido de humedad para un combustible, se debe mantener hasta el final de la prueba para todas las estufas a ensayar. Esto ayuda a minimizar la variabilidad de los resultados de las diferentes pruebas y permite comparar dos modelos diferentes de estufas en construcción.

- **La olla y la cantidad de agua.**

Se pueden utilizar ollas estándar de 7 litros o 5 litros para la prueba. Cuando se elige una olla de 7 litros para realizar la prueba, la cantidad de agua es de 5 litros. Por otro lado, la elección de la olla estándar de 5 litros requiere el uso de una cantidad de 2.5 litros de agua. Se debe utilizar la misma olla para las diferentes pruebas. Para determinar la temperatura del agua se dispone un termopar sobre un trozo de madera, como se puede ver en la figura 4.2. La punta del termopar se coloca en el centro de la olla y a 5 cm de la parte inferior. Las pruebas de ensayo se realizan con una olla sin tapa. Por lo tanto, el principio debe ser simple para una buena reproducibilidad de los resultados de la prueba de WBT: uso del mismo tipo de combustible y del mismo tamaño y tipo de la olla.

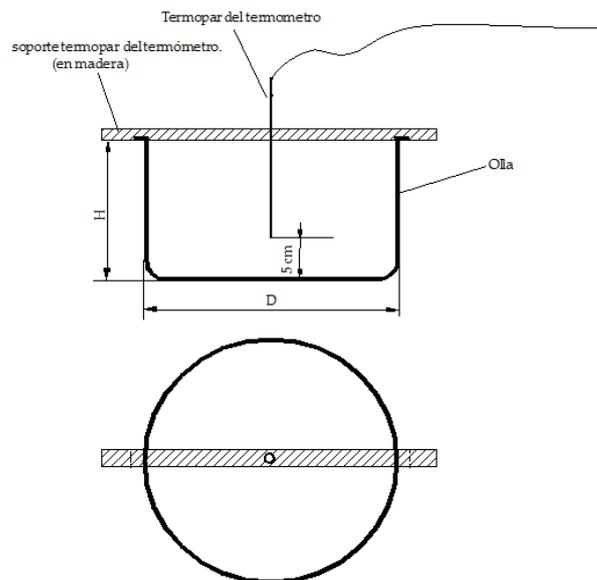


Fig.4. 2. Disposición del termopar en la olla.

Fuente: Elaboración propia a partir de [14]

#### 4.2.1.4 Estimación de los parámetros e indicadores de rendimiento.

- **Determinación del punto de ebullición local.**

El punto de ebullición local del agua es el punto a partir del cual la temperatura del agua permanece constante y ya no aumenta, independientemente de la cantidad de calor que se aplique a la olla. La temperatura de ebullición local depende y está influenciada por varios parámetros locales, como son altitud y condiciones

meteorológicas. Para estas razones, no se puede suponer que el punto de ebullición local sea de  $100^{\circ}\text{C}$ . El punto de ebullición del agua se puede estimar utilizando la fórmula (4.1).

$$T_{eb} = \left(100 - \frac{h}{300}\right)^{\circ}\text{C} \quad (4.1)$$

Con  $T_{eb}$  que es la temperatura de ebullición [ $^{\circ}\text{C}$ ] local y  $h$  es la altitud del lugar [m].

El punto de ebullición local se puede determinar empíricamente midiendo la temperatura del agua en ebullición según el procedimiento indicado en el punto anterior. Realizando diferente toma de temperatura y calculando la media.

- **Contenido de humedad de la madera.**

El contenido de humedad de la madera en base húmeda ( $Hh$ ) y en base seca ( $Hs$ ) se definen por las relaciones 4.2 y 4.3 respectivamente.

$$Hh = \frac{m_a}{m_a + m_s} \quad (4.2)$$

$$Hs = \frac{m_a}{m_s} \quad (4.3)$$

Con,  $m_a$  es la masa del agua absorbida ó retenida por en la madera,  $m_s$  es la masa de la madera seca en la que está contenida o retenida el agua.

Algunos medidores de humedad de la madera dan el valor  $Hs$  directamente, por lo que en este caso se puede obtener  $Hh$  usando la relación (4.4).

$$Hh = \frac{Hs}{1 + Hs} \quad (4.4)$$

- **Combustible consumido ( $CC_{AF}$ ):** es la diferencia entre el combustible al inicio de la prueba  $C_{AFi}$  y al final de esta,  $C_{AFf}$  todo ello medido en gramos. Se obtiene utilizando la expresión (4.5) siguiente.

$$CC_{AF} = C_{AFi} - C_{AFf} \quad (4.5)$$

- **Carbón vegetal total formado durante la prueba:** Usando madera para realizar la prueba de WBT, se genera carbón caliente. La cantidad de carbón vegetal generado viene dada por la expresión (4.6) siguiente.

$$\Delta M_{cv} = M_{cv} - m_r \quad (4.6)$$

Con  $M_{cv}$  es la masa de carbón vegetal caliente más el recipiente,  $m_r$  es la masa del recipiente y  $\Delta M_{cv}$  es la masa de carbón vegetal generada durante la prueba.

- **La masa de agua vaporizada ( $M_{av}$ ):** es una medida de la pérdida de agua por evaporación durante la prueba de WBT. Esta  $M_{av}$  se calcula restando el peso inicial de la olla y el agua menos el peso final de la olla y el agua, relación (4.7).

$$M_{av} = M1_{oai} - M1_{oaf} \quad (4.7)$$

Con  $M_{av}$  es la masa de agua vaporizada;  $M1_{oai}$  es la masa de la olla y la masa de agua inicial al comienzo de la prueba y  $M1_{oaf}$  es la masa de la olla y la masa de agua al final de la prueba

- **La masa efectiva de agua hervida ( $M_{ah}$ ):** es el agua que queda al final de la prueba. Es una medida de la cantidad de agua que ha llegado a hervir. La  $M_{ah}$  se calcula simplemente restando el peso final de la olla y el agua menos el peso de la olla usando la expresión (4.8) siguiente.

$$M_{ah} = M1_{oaf} - M1_o \quad (4.8)$$

Dónde,  $M_{ah}$  que es la masa de agua hervida durante la prueba;  $M1_{oaf}$  es el peso de la olla y la masa de agua al final de la prueba y  $M1_o$  es el peso de la olla.

- **El tiempo para hervir el agua ( $t_{ah}$ ):** Este tiempo es la diferencia entre los tiempos de inicio y fin. La  $t_{ah}$  se obtiene usando la relación (4.9) siguiente.

$$t_{ah} = t_{ah,f} - t_{ah,i} \quad (4.9)$$

Dónde,  $t_{ah}$  es el tiempo para hervir el agua,  $t_{ah,f}$  es la hora final y  $t_{ah,i}$  es la hora inicial.

- **Eficiencia térmica en alta potencia:** Esta es la relación entre la energía necesaria para el calentamiento y evaporación del agua y la energía consumida durante la combustión. Es una estimación de la energía total producida por el fuego que se utiliza para calentar el agua en la olla, relación (4.10). Se puede expresar algebricamente utilizando la relación (4.11):

$$ET = \frac{\text{Energía para llevar el agua a ebullición} + \text{energía de evaporación}}{\text{Energía del combustible}} \quad (4.10)$$

$$ET_{AP} = \frac{4186 \cdot (T1_{APf} - T1_{APi}) \cdot (M1_{APaoi} - M1_{APoi}) + 2260 \cdot M_{avAP}}{CC_{AP} \cdot LHV} \quad (4.11)$$

Con  $ET_{AP}$  que es la eficiencia térmica en la fase AP;  $T1_{APf}$  es la temperatura del agua al final de la fase AP [°C];  $T1_{APi}$  es la temperatura del agua al inicio de la fase AP [°C];  $M1_{APaoi}$  es masa inicial de olla con agua en la fase AP [g];  $M1_{APoi}$  es la masa de olla [g];  $M_{avAP}$  es la masa del agua vaporizada en la fase AP [g];  $CC_{AP}$  es la cantidad de combustible seco equivalente consumido [g];  $LHV$  es valor calorífico del combustible utilizado [kJ/kg].

### Eficiencia térmica de alta potencia global

En las estufas de gran inercia térmica, se realizan las dos fases de alta potencia que no son idénticas, así que conviene definir un coeficiente que englobe ambas fases. Así, eficiencia térmica en alta potencia global de la estufa es el promedio de la eficiencia de arranque a frío ( $ET_{APAF}$ ) y la eficiencia de arranque en caliente ( $ET_{APAC}$ ) para las dos fases de alta potencia. Se calcula por la relación (4.12).

$$\text{Eficiencia térmica de alta potencia global} = \frac{ET_{APAF} + ET_{APAC}}{2} \quad (4.12)$$

- **Eficiencia térmica en baja potencia ( $ET_{BP}$ ):** Esta es la relación entre la energía necesaria para el calentamiento y la evaporación del agua y la energía consumida durante la combustión del combustible. Es una estimación de la energía total producida por el fuego que se utiliza para calentar el agua en la olla. Se calcula utilizando la siguiente relación (4.13).

$$ET_{BP} = \frac{4186 \cdot (T_{1BPf} - T_{1BPI}) \cdot \left[ \frac{(M_{1BPI} - M_1) + (M_{1BPF} - M_1)}{2} \right] + 2260 \cdot M_{avBP}}{CC_{BP} \cdot LHV} \quad (4.13)$$

$ET_{BP}$  que es la eficiencia térmica en BP;  $T_{1BPf}$  es la temperatura del agua al final de la prueba [°C];  $T_{1BPI}$  es la temperatura del agua al inicio de la fase BP [°C];  $M_{1BPI}$  es masa inicial de la olla con agua [g]  $M_1$  es la masa de olla [g];  $M_{1BPF}$  es masa final de la olla con agua [g];  $M_{avBP}$  es la masa agua vaporizada [g];  $CC_{BP}$  es la masa del combustible consumido [g];  $LHV$  es el poder calorífico neto del combustible [kJ/kg].

Obsérvese, para evaluar la eficiencia térmica en BP, la masa efectiva de agua hervida a fuego lento que se tiene en cuenta, es el promedio de las masas de agua iniciales y finales en la olla dada por el factor  $\left[ \frac{(M_{1BPI} - M_1 + M_{1BPF} - M_1)}{2} \right]$  en la relación 4.12 anterior.

- **Tasa de combustión ( $\sigma_c$ ):** la **tasa de combustión** es una medida del consumo de combustible en la prueba de WBT. Esta tasa  $\sigma_c$  se calcula dividiendo el equivalente de combustible seco consumido por el tiempo de duración de la prueba, por la expresión (4.14).

$$\sigma_c = \frac{CC_{AP}}{\Delta t_{AP}} \quad (4.14)$$

Con  $\sigma_c$  es la tasa de combustión [g/min]  $\Delta t_{AP}$  es el tiempo de ebullición [min]  $CC_{AP}$  es equivalente combustible seco consumido [g]

- **Consumo específico de combustible ( $SFC_{APF}$ ):** es la relación entre el combustible utilizado por unidad de masa de agua, en el caso de WBT, o de alimentos en otros casos. En alta potencia con arranque en frío, el  $SFC_{APF}$  se define como la cantidad de combustible necesaria para llevar un litro de agua desde la temperatura ambiente hasta el punto de ebullición. Está determinado por la siguiente expresión: (4.15).



$$SFC_{APF} = \frac{CC_{AP}}{M_{av}} \quad (4.15)$$

$SFC_{APF}$  es el consumo específico de combustible en la fase APF [g de madera /litro de agua],  $CC_{AP}$  es el combustible seco consumido en APF [g] y  $M_{av}$  es la masa efectiva de agua evaporada en APF [g]

- **La potencia del fuego (PF):** la potencia de fuego, de forma general, es la relación expresada en (4.16). Se puede escribir algebráicamente utilizando la siguiente relación matemática (4.17).

$$\text{Potencia del fuego} = \frac{\text{energía del combustible para el proceso.}}{\text{tiempo necesario para el proceso}} \quad (4.16)$$

$$PF_{AP} = \frac{CC_{AP} * LHV}{\Delta t_{AP}} \quad (4.17)$$

$PF_{AP}$  es la potencia del fuego en AP [W];  $CC_{AP}$  es el combustible seco consumido en AP [kg] la  $\Delta t_{AP}$  es el tiempo considerado [seg];  $LHV$  es poder calorífico del combustible utilizado) [kJ/kg].

- **La flexibilidad “Turn down ratio” (FX)** » Es la relación entre la potencia de fuego de la fase de alta potencia y la de la fase de baja potencia (cocción a fuego lento). Identifica una estufa con la posibilidad de controlar el fuego según necesidades. Una flexibilidad elevada significa elevada posibilidad de manejo de la estufa. Así pues, una buena estufa de cocina debe tener un alto grado de flexibilidad para facilitar su manejo. Como la fase de cocción a fuego lento es la más larga, la gran flexibilidad significa que la estufa sólo requerirá una pequeña cantidad de potencia de fuego para mantener el agua en la olla a temperaturas cercanas al punto de ebullición. La flexibilidad viene dada por la expresión (4.18) siguiente.

$$FX = \frac{PF_{AP}}{PF_{BP}} \quad (4.18)$$

Con,  $FX$  es la flexibilidad,  $PF_{AP}$  que es la potencia del fuego en la fase de alta potencia arranque en frío [W] y  $PF_{BP}$  es la potencia del fuego en la fase de baja potencia BP [W].

#### \*Estimación de los indicadores de rendimiento IWA METRICO “IWA PERFORMANCE METRICS”

Los indicadores IWA METRICO permiten la comparación de dos estufas de cocción, para identificar las diversas mejoras en el diseño son los siguientes:

##### 1º. Eficiencia térmica de alta potencia global.

2º. Consumo de combustible específico de baja potencia (MJ/min/l): Es la energía consumida por litro de agua hervida a fuego lento por minuto. El  $SFC$  en BP se calcula según la relación (4.19).

$$SFC_{BP} = \frac{CC_{BP} * LHV}{M_{h, BP} * \Delta t_{BP} * 1000} \quad (4.19)$$



$CC_{BP}$  es el combustible seco consumido en BP [g] la  $\Delta t_{BP}$  es tiempo utilizado para hervir BP [min] ;  $Ma_{h BP}$  es Masa efectiva de agua hervida a fuego lento [g] ;  $LHV$  es poder calorífico neto (madera seca) [kJ/kg].

3°. **Emisiones CO de alta potencia** (g/MJ): esta medida de las emisiones de CO por unidad de energía suministrada a la olla de cocción. Se obtiene por la expresión (4.20).

$$AP CO \left[ \frac{g}{MJ} \right] = \frac{\text{Emisiones de CO [g]}}{\text{Energía suministrada a la olla [MJ]}} \quad (4.20)$$

La energía suministrada a la olla se puede expresar como

$$[MJ] = ET_{AP} * CC_{AP}[g] * LHV \left[ \frac{kJ}{kg} \right] * \frac{1}{1000} \left[ \frac{MJ}{kJ} \right] * \frac{1}{1000} \left[ \frac{kg}{g} \right] \quad (4.21)$$

Resultando la relación (4.22).

$$AP CO = \frac{M_{CO,AP} * 10^6}{ET_{AP} * CC_{AP} * LHV} \quad (4.22)$$

$M_{CO,AP}$  es la masa de CO producida en AP.

4°. **Emisiones CO de baja potencia** (g/min/l): Las emisiones de CO por litro de agua hervida a fuego lento por minuto. Es una forma más descriptiva de medir las emisiones de CO a baja potencia. Se obtiene utilizando la expresión (4.23) siguiente.

$$BP CO = \frac{M_{CO,BP}}{Ma_{h BP} * \Delta t_{BP}} * 1000 \quad (4.23)$$

Con  $M_{CO,BP}$  es la masa de CO producida en BP

5°. **Emisiones PM de alta potencia** (mg / MJ): esta medida es la emisión de PM por unidad de energía suministrada a la olla de cocción. Se obtiene utilizando la expresión (4.24).

$$AP PM \left[ \frac{mg}{MJ} \right] = \frac{\text{Emisiones de PM [mg]}}{\text{Energía suministrada a la olla [MJ]}} \quad (4.24)$$

Algebraicamente, se obtiene con la relación (4.25).

$$AP PM = \frac{M_{PM,AP} * 10^9}{ET_{AP} * CC_{AP} * LHV} \quad (4.25)$$

Con  $M_{PM,AP}$  es la masa de PM producida en AP

6°. **Emisiones PM de baja potencia** (mg/min/l): Las emisiones de PM por litro de agua hervida a fuego lento por minuto. Es una forma más descriptiva de medir estas emisiones. Se obtiene utilizando la expresión (4.26).



$$BP_{PM} = \frac{M_{PM,BP}}{Ma_{h,BP} * \Delta t_{BP}} * 10^6 \quad (4.26)$$

Con  $M_{PM,BP}$  es la masa de PM producida en BP.

#### 4.2.2 Prueba de cocina controlada “Controlled Cooking Test” (CCT).

##### 4.2.2.1. Preámbulo.

El CCT que se va a describir está destinado principalmente a comparar el rendimiento de una estufa mejorada con una estufa tradicional en una tarea de cocción estandarizada. El primer paso para realizar el CCT es consultar con las personas en el lugar donde se introducirán la estufa. Si la estufa está diseñada para uso en el hogar, entonces la tarea debe ser elegir una comida típica de la zona. Puede incluir uno o más platos, aunque los alimentos que requieren preparaciones complicadas deben evitarse para tener resultados más precisos. Además del tipo de comida, los evaluadores y los participantes de la comunidad también deben decidir la cantidad precisa de comida que sea la mejor representante de unos alimentos típicos de la familia. Esto es crítico para asegurar que las pruebas sean uniformes [4.22]. Después de decidir sobre una tarea de cocción, el procedimiento debe describirse con el mayor detalle posible y registrarse de manera que tanto los usuarios de la estufa como los probadores puedan comprender y seguir. Esto es importante para garantizar que la tarea de cocción se realice de manera idéntica en cada estufa. Se deben incluir medidas objetivas de cuando se finaliza el proceso de cocción. En otras palabras, es preferible definir el final de la tarea de cocción por un factor objetivo como "las pieles se desprenden de los frijoles" en lugar de una medida subjetiva como "la salsa sabe bien" [4.22]

##### 4.2.2.2. Proceso del CCT.

Cuando los pasos de la tarea de cocción hayan sido bien comprendidos, podrán comenzar las pruebas reales. La cocción en sí debe ser realizada por una persona local que esté familiarizada con los alimentos que se vayan a cocinar y el funcionamiento de la estufa que se va a probar. Si la estufa es un diseño nuevo que difiere significativamente de las prácticas de cocción tradicionales, probablemente se requerirá algún entrenamiento antes de realizar las pruebas reales. Además, para garantizar que los evaluadores tengan control sobre el entorno de prueba, las pruebas deben realizarse en un entorno controlable, como un laboratorio o taller, en lugar de en un hogar privado.

El proceso que debe seguirse es:

1. Pesar los ingredientes predeterminados y hacer todas las preparaciones. (lavado, pelado, corte, etc.).
2. Comenzar con una cantidad de combustible previamente pesado que sea aproximadamente el doble de la cantidad que la población local considera necesaria para completar la tarea de cocción.



3. Se inicia con la estufa fría, permitiendo que los cocineros enciendan el fuego de forma que refleje las prácticas locales. Se inicia a contar el tiempo.
4. Mientras el cocinero realiza la tarea de cocción, se debe registrar las observaciones y comentarios relevantes que haga (por ejemplo, las dificultades que encuentren, el calor excesivo, el humo, la inestabilidad de la estufa o la olla,...).
5. Cuando la tarea haya finalizado se registra la hora.
6. Retirar las ollas de comida de las estufas y pesar cada olla con su comida en la balanza para obtener el peso de los alimentos.
7. Retirar la madera sin quemar del fuego y apagarlo. Desprender el carbón de leña de los extremos de la madera sin quemar. Pesar la madera sin quemar de la estufa con la madera restante del paquete original. Pesar todo el carbón vegetal residual.

Con esto se completa la prueba.

Igual que en la WBT, hay una serie de variables que se miden directamente, como son las ambientales, velocidad del viento, temperatura del aire, etc., así como parámetros de pruebas físicas. Las variables ambientales pueden variar ligeramente de una prueba a otra, pero deben ser casi constantes. Los parámetros de la prueba física deben ser constantes para todas las pruebas.

#### 4.2.2.3. Obtención de parámetros de rendimiento de una CCT.

**El consumo específico del combustible:** Para una prueba de CCT, el consumo específico es un indicador muy importante, ya que juega el papel de la eficiencia. Se calcula como la cantidad de combustible (en gramos) sobre la cantidad de alimentos cocinados (en kilogramos).

#### Ahorro de combustible por método CCT.

Entre dos tipos de estufas, el ahorro de combustible se calcula por la relación (4.27) siguiente

$$A_f\% = \frac{W_{f,TCS} - W_{f,ICS}}{W_{f,TCS}} \times 100 \quad (4.27)$$

$A_f\%$  es el ahorro en combustible por método CCT;  $W_{f,TCS}$  y  $W_{f,ICS}$  son respectivamente, los consumos totales en combustible para cocinar los mismos alimentos por método CCT con una estufa tradicional TCS y con una estufa mejorada ICS.



### 4.2.3 Prueba de rendimiento de cocina “Kitchen Performance Test” (KPT).

#### 4.2.3.1 Preámbulo.

El KPT sirve para determinar, a través de encuestas, la cantidad de combustible que utilizan los hogares para cocinar durante unos días, siendo el resultado, la cantidad de combustible que la familia utilizó por día [4.23]. El KPT es el procedimiento basado en estudios de campo para demostrar el efecto de los cambios de estufas en el consumo de combustible de los hogares. El KPT tiene dos objetivos principales: (i) evaluar el rendimiento de la estufa a través de encuestas de hogares y (ii) comparar el impacto de las estufas mejoradas en el consumo de combustible en las cocinas de hogares reales [4.23]. Este tipo de prueba es la mejor forma de entender el impacto de la estufa en el uso de combustible y en las características y comportamientos generales del hogar porque se realiza directamente con los usuarios de estufas [4.23]. Igualmente se puede decir que es una forma particularmente difícil de probar las estufas porque se inmiscuye en las actividades diarias de las personas. Además, las mediciones tomadas durante el KPT son más inciertas y variables, ya que las posibles fuentes de error son difíciles de controlar en comparación con las pruebas CCT o WBT [4.23].

#### 4.2.3.2 Selección de hogares para participar en un KPT.

El KPT está diseñado para su implementación en comunidades donde se están llevando a cabo proyectos relacionados con la introducción de estufas mejoradas. La selección de las familias debe ser al azar para evitar sesgos y el tamaño de la muestra también es una consideración importante, ya que las muestras deben ser lo suficientemente grandes como para asegurar resultados estadísticamente válidos. En la tabla 4.2 se indica el tamaño que recomienda Gold Standard [4.23-4.24].

**Tabla 4. 1. Tamaño de muestra para un KPT.**

| Tamaño de la comunidad | Número de hogares a ser encuestados |
|------------------------|-------------------------------------|
| $n < 300$              | Al menos 30                         |
| $300 < n < 1000$       | 10%                                 |
| $n > 1000$             | 100                                 |

Fuente: [23]

Con el KPT se pueden realizar diversas evaluaciones como establecer, en condiciones reales de uso, las diferencias en el consumo de combustibles entre una TCS y una ICS, detectar las variaciones estacionales



en el consumo de combustible como resultado de los cambios en el clima o los ciclos agroeconómicos, establecer las diferencias en el consumo de combustible entre los hogares que utilizan estufas similares pero diferentes tipos de combustible.

#### **4.2.3.3 Implementación de un KPT.**

El KPT es una prueba prolongada realizada con la cooperación voluntaria de las familias individuales. Para cada estufa que se pruebe, la familia la utilizará durante 3 a 7 días y en ese tiempo se recomienda que se realicen mediciones diarias de los consumos con unas y otras estufas. Así, con el KPT, los evaluadores pueden comparar la tasa de consumo diario de combustible por persona de dos o más estufas en un entorno doméstico real durante un período prolongado [4.24].

#### **4.2.3.4 Selección de comunidades para el KPT.**

Una forma de minimizar las posibles fuentes de sesgo es seleccionar cuidadosamente las comunidades donde se deben realizar las pruebas. Sin embargo, para áreas pequeñas (menos comunidades), la selección es fácil. Para áreas grandes (varias comunidades), la elección es más compleja. La comunidad se elige teniendo en cuenta los siguientes parámetros [4.24]:

- ❖ El mismo estatus socioeconómico,
- ❖ Las mismas opciones de medios de vida y
- ❖ Las mismas condiciones climáticas o ambientales.

El objetivo es limitar los factores externos que pueden influir en el consumo de combustible. Una comunidad debe tener una forma de vida casi similar [4.24].

#### **4.2.4. Protocolo de seguridad para las estufas de biomasa (Biomass stove security protocol BSSP).**

El proceso de diseño de la estufa debe incluir la evaluación de seguridad. El protocolo de seguridad de la estufa es un conjunto de pautas y procedimientos para evaluar la seguridad de las estufas domésticas de cocción utilizadas en los países en desarrollo. El protocolo se compone de diez pautas individuales que los diseñadores deben seguir para probar una estufa de cocción segura. Cada guía incluye procedimientos simples para un uso fácil y resultados precisos. Además, se propone una calificación de seguridad general combinando los resultados de estas diez pruebas [4.25].

Las diez pruebas que se realizan en un protocolo de seguridad son las siguientes:

- Prueba 1: Controlar bordes y puntas afilados;
- Prueba 2: Estabilidad de la estufa de cocción;
- Prueba 3: Confinamiento del combustible en la cámara de combustión;



- Prueba 4: Obstrucciones cerca de la superficie de cocción;
- Prueba 5: Temperatura de superficie de la estufa de cocción;
- Prueba 6: Transmisión de calor a ambientes circundantes;
- Prueba 7: Temperatura de las muñecas de la ICS;
- Prueba 8: Blindando de la chimenea;
- Prueba 9: Las llamas que rodean la olla;
- Prueba 10: Llamas y combustible saliendo de la cámara de combustión.

Las comprobaciones de seguridad se pueden utilizar como criterio de selección, junto con la eficiencia y las emisiones de contaminantes, al comprar o financiar proyectos de introducción de ICS (como lo hacen muchas organizaciones gubernamentales y no gubernamentales). Al comprobar la seguridad general de las ICS, se valora cada una de las pruebas 1 a 10 y de esta forma se pueden comparar estufas

Este protocolo de prueba fue diseñado por Nathan Johnson [4.25] de la Iowa State University en 2005. En febrero de 2012, los niveles de rendimiento de este protocolo fueron aprobados por IWA (International Workshop Agreement).

### **4.3. Metodología de cálculo para reducción de las emisiones de dióxido de carbono CO<sub>2</sub>.**

#### **4.3.1. Preámbulo.**

La adopción por parte de los hogares del uso de un nuevo tipo de estufa de cocción energéticamente eficiente redundará directamente en el ahorro de combustible y, por tanto, en una reducción directa de las emisiones de CO<sub>2</sub>. Del mismo modo, el uso de un nuevo combustible procedente de un sistema de carbonización mejorado o de un biocombustible alternativo sostenible procedente, por ejemplo, de residuos sólidos agrícolas, tendrá un impacto directo en la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>. En los párrafos siguientes nos centraremos en las estimaciones de reducción de las emisiones para los dos casos mencionados.

#### **4.3.2. Estimación de la reducción de CO<sub>2</sub> para la adopción de una nueva estufa ICS.**

Una estufa de cocina mejorada puede contribuir eficazmente a la reducción del CO<sub>2</sub>. Los cálculos del ER-CO<sub>2</sub> que resultan del uso de madera no renovable en cocinas se realizan utilizando la metodología AMS-II [4.26] según la Convención de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC). La ecuación (4.28) para este cálculo es la siguiente:

$$ER(t\ CO_2) = B_{sav}(t) * f_{NRB} * LHV(TJ/ton) * EF_{project\ fossil}(t\ CO_2/TJ) \quad (4.28)$$

En esta relación (4.28) los diferentes parámetros son los siguientes:

$B_{sav}$  es la cantidad de biomasa leñosa que se ahorra en toneladas utilizando la ICS durante el año [tonelada].  $f_{NBR}$ , es la fracción de biomasa no renovable que se obtiene utilizando métodos de estudio o datos gubernamentales (el valor por defecto en DR Congo es,  $f_{NBR} = 90\%$ ).  $LHV_{biomass}$  es el poder calorífico inferior de la biomasa leñosa no renovable que se sustituye (de la madera, 0.015 TJ/tonelada, basado en el peso bruto de la madera que se seca al aire).  $EF_{Project fossil fuel}$  es el factor de emisión de los combustibles fósiles que se prevé utilizar para la sustitución de la biomasa leñosa no renovable por consumidores similares. Su valor es 73.2 t CO<sub>2</sub>/TJ. Cuando el carbón vegetal es utilizado como combustible por la estufa de referencia (antigua) o por nuevos proyectos (ICS), la cantidad de biomasa leñosa se determinará utilizando un factor de conversión de 5 kg de leña (húmeda) por 1 kg de carbón vegetal (base seca).

$B_{sav}$  puede determinarse mediante dos métodos:

- Con el método WBT, según la siguiente relación (4.29).

$$B_{sav} (kg) = B_{as} (kg) * (1 - \eta_{as} / \eta_{ns}) \quad (4.29)$$

$B_{as}$  es la cantidad de biomasa leñosa utilizada por la antigua TCS.  $\eta_{as}$  es la eficiencia térmica de la antigua TCS.  $\eta_{ns}$  es la eficiencia térmica de la nueva ICS del proyecto.

- Con el método CCT, puede calcularse por la diferencia entre el consumo absoluto de combustible (gr fuel) o el específico (g fuel/kg alimentos) entre la utilización de una estufa mejorada o la tradicional.
- Con el método KPT,  $B_{sav}$  puede calcularse según la siguiente relación (4.30).

$$B_{sav} = B_{as} - B_{ns KPT} \quad (4.30)$$

Donde, tenemos,  $B_{as}$  es la cantidad anual de biomasa leñosa utilizada en toneladas por la antigua TCS y  $B_{ns KPT}$  es cantidad anual de biomasa leñosa utilizada en toneladas por nueva estufa, medida según el protocolo de KPT.

#### 4.3.3. Estimación de reducción de CO<sub>2</sub> para la adopción de un nuevo combustible.

La adopción de un nuevo combustible mejorado en la cocción para una estufa de cocción en un hogar, puede contribuir eficazmente a la reducción del CO<sub>2</sub>. Los cálculos del ER-CO<sub>2</sub> que resultan del uso de un nuevo combustible en cocinas se realizan utilizando la metodología AMS-III.BG, según la Convención de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC) [4.27]. La ecuación (4.31) para este cálculo es la siguiente:

$$ER = Q_{CCP} * \left[ CF * f_{NBR wood} * LHV_{wood} * \frac{LHV_{new Briquetas}}{LHV_{olds charc}} * EF_{project fossil fuel} \right] - PE_{FF} - PE_{El} - PE_{BC} \quad (4.31)$$



Dónde,  $Q_{CCP}$  es la Cantidad del nuevo combustible alternativo producido y utilizado en el año par un hogar ,CF es el factor de conversión predeterminado de madera a carbón vegetal(5kg de leña para 1kg de carbón vegetal),  $LHV_{wood}$  es el poder calorífico neto de la madera (TJ/t),  $LHV_{new char}$  es el poder calorífico neto del nuevos briquetas (TJ/t),  $LHV_{olds charc}$  es el poder calorífico neto del antiguo carbón vegetal (TJ/t)  $PE_{FF}$  es las emisiones debidas al consumo de combustibles fósiles en las instalaciones de producción de carbón vegetal en el año(t CO<sub>2</sub> al año),  $PE_{El}$  es emisiones debidas al consumo de electricidad en las instalaciones de producción de carbón vegetal en el año(t CO<sub>2</sub> al año),  $PE_{BC}$  es emisiones del proyecto por el cultivo de biomasa en el año(t CO<sub>2</sub> al año)[27].Para la fabricación de briquetas BSW a partir de residuos agrícolas los términos  $PE_{FF}$ ,  $PE_{El}$  et  $PE_{BC}$  son nulos.

#### 4.4. Conclusión.

La introducción de estufas mejoradas en una sociedad que está utilizando un determinado tipo de estufa requiere de mediciones objetivas sobre las mejoras que la nueva estufa introducirá. Para ello se deben utilizar los procedimientos estandarizados por diferentes organismos.

De los numerosos procedimientos, se ha considerado como los más adecuados los métodos de prueba WBT y CCT, ya que el primero es un método bastante objetivo de comparar dos equipos de cocción a través de metodologías consistentes en la ebullición del agua en diferentes fases. La prueba CCT, aunque sujeta a más variabilidades, pues depende en gran medida de la forma en que los usuarios realizan sus labores de cocinar, es un método que se aproxima más a la realidad de la preparación de alimentos. A través de estos dos métodos se pueden obtener numerosos índices que se refieren a consumos de combustible, tiempos de cocción, eficiencia, etc.

Otro aspecto muy importante en la introducción de cocinas mejoradas es la contaminación que producen y su comparación con las actuales, por ello se ha realizado una búsqueda de los método propuestos por organismos internacionales sobre las mediciones de estos contaminante.

Tanto los aspectos de ahorro energético como los de reducción de contaminantes serán aplicados a los nuevos diseños que explican en el siguiente capítulo, comparándolos las actuales estufas.



#### Referencias bibliográficas del capítulo 4.

- [4.1] Lombardi F.;Riva F.;Bonamini G.;Jacopo Barbieri J.;Colombo E. 2017.Laboratory protocols for testing of Improved Cooking Stoves (ICSs): A review of state-of-the-art and further developments Biomass and Bioenergy 98 (2017) 321-335.
- [4.2] M. Johnson, R. Edwards, C. Alatorre Frenk, O. Masera, In-field greenhouse gas emissions from cookstoves in rural Mexican households, Atmos. Environ. 42 (2008) 1206-1222, <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.10.034>
- [4.3] J. Jetter, Y. Zhao, K.R. Smith, B. Khan, T. Yelverton, P. Decarlo, M.D. Hays, Pollutant emissions and energy efficiency under controlled conditions for household biomass cookstoves and implications for metrics useful in setting international test standards, Environ. Sci. Technol. 46 (2012) 10827-10834, <http://dx.doi.org/10.1021/es301693f>.
- [4.4] C. Gupta, K.R. Usha, Improved chimneyless fuelwood cookstoves (Pondicherry region), Proc. Indian Acad. Sci. (Engg. Sci.) 5 (1982) 395-408.
- [4.5] C. Roth, D. Andreatta, ETHOS Conference 2016: "Stoves 101," in: vol. 2016. <http://ethoscon.com/pdf/ETHOS/ETHOS2016/Roth.pdf>. (Última consulta 20/04/2020)
- [4.6] Yayasan Dian Desa, From Water Boiling Test to Water Heating Test Case Study of Indonesia, 2015. <https://collaboration.worldbank.org/docs/DOC-15092> (Última consulta 20/04/2020).
- [4.7] V.M. Berrueta, R.D. Edwards, O.R. Masera, Energy performance of woodburning cookstoves in Michoacan, Mexico, Renew. Energy 33 (2008) 859-870, <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2007.04.016>.
- [4.8] C.A. Roden, T.C. Bond, S. Conway, A. Benjamin, O. Pinel, N. Maccarty, D. Still, Laboratory and field investigations of particulate and carbon monoxide emissions from traditional and improved cookstoves, Atmos. Environ. 43 (2009) 1170-1181, <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.05.041>.
- [4.9] E.M. Carter, M. Shan, X. Yang, J. Li, J. Baumgartner, Pollutant emissions and energy efficiency of chinese gasifier cooking stoves and implications for future intervention studies, Environ. Sci. Technol. 48 (11) (2014) 6461-6467. [http:// dx.doi.org/10.1021/es405723w](http://dx.doi.org/10.1021/es405723w).
- [4.10]. S. Bhattacharya, D. Albina, A. Myint Khaing, Effects of selected parameters on performance and emission of biomass-fired cookstoves, Biomass Bioenergy 23 (2002) 387-395, [http://dx.doi.org/10.1016/S0961-9534\(02\)00062-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0961-9534(02)00062-4).
- [4.11]. Ruiz-Mercado I., Canuz E., J.L. Walker ,Smith K.R., Quantitative metrics of stove adoption using Stove Use Monitors (SUMs), Biomass Bioenergy 57 (2013) 136-148, <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.07.002>.
- [4.12] Bailis R., Ezzati M., Kammen D., Greenhouse gas implications of household energy technologies in Kenya, Environ. Sci. Technol. Sci. Technol. 37 (2003) 2051-2059, <http://dx.doi.org/10.1021/es026058q>
- [4.13] Roden C.A., Bond T.C., Conway S., Benjamin A., Pinel O., Maccarty N., Still D., Laboratory and field investigations of particulate and carbon monoxide emissions from traditional and improved cookstoves, Atmos. Environ. 43(2009) 1170-1181, <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.05.041>
- [4.14] The Water Boiling Test 4.2.3, 2014. <https://cleancookstoves.org/binary-data/DOCUMENT/file/000/000/399-1.pdf> (Última consulta 22/05/2020)
- [4.15] C.A. Roden, T.C. Bond, S. Conway, A. Benjamin, O. Pinel, N. Maccarty, D. Still, Laboratory and field investigations of particulate and carbon monoxide emissions from traditional and improved cookstoves, Atmos. Environ. 43 (2009) 1170-1181, <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.05.041>.
- [4.16] V.M. Berrueta, R.D. Edwards, O.R. Masera, Energy performance of woodburning cookstoves in Michoacan, Mexico, Renew. Energy 33 (2008) 859-870, <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2007.04.016>
- [4.17] C. Gupta, K.R. Usha, Improved chimneyless fuelwood cookstoves (Pondicherry region), Proc. Indian Acad. Sci. (Engg. Sci.) 5 (1982) 395-408.
- [4.18] C. Roth, D. Andreatta, ETHOS Conference 2016: "Stoves 101," in: vol. 2016. <http://ethoscon.com/pdf/ETHOS/ETHOS2016/Roth.pdf>. (Última consulta 22/04/2020)



- [4.19] Yayasan Dian Desa, From Water Boiling Test to Water Heating Test Case Study of Indonesia, 2015. <https://collaboration.worldbank.org/docs/DOC-15092>. (Última consulta 27/05/2020)
- [4.20] E.M. Carter, M. Shan, X. Yang, J. Li, J. Baumgartner, Pollutant emissions and energy efficiency of chinese gasifier cooking stoves and implications for future intervention studies, *Environ. Sci. Technol.* 48 (11) (2014) 6461-6467. [http:// dx.doi.org/10.1021/es405723w](http://dx.doi.org/10.1021/es405723w).
- [4.21] S. Bhattacharya, D. Albina, A. Myint Khaing, Effects of selected parameters on performance and emission of biomass-fired cookstoves, *Biomass Bioenergy* 23 (2002) 387-395, [http://dx.doi.org/10.1016/S0961-9534\(02\)00062-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0961-9534(02)00062-4).
- [4.22] Bailis R. Stove Performance Testing Protocols, Controlled Cooking Test (CCT) Version 2.0. Shell Foundation. University of California Berkeley; 2004. <https://www.cleancookingalliance.org/binarydata/DOCUMENT/file/000/000/80-1.pdf> (Última consulta 22/05/2020)
- [4.23] Bailis R., Smith K.R., Edwards R. at al 2018. Kitchen Performance Test v.4.0, 2018 (KPT v.4.0) <https://www.cleancookingalliance.org/binarydata/DOCUMENT/file/000/000/604-1.pdf> (Última consulta 26/05/2020).
- [4.24] The Gold Standard Foundation (2011). Technologies and Practices to Displace Decentralized Thermal Energy Consumption. Geneva, the Gold Standard Foundation: 66.
- [4.25] Biomass stove safety protocol <https://www.cleancookingalliance.org/binarydata/DOCUMENT/file/000/000/407-1.pdf>. (Última consulta 22/06/2020)
- [4.26] UNFCC 2019. AMS-II.G. Small-Scale Methodology: Energy Efficiency Measures in Thermal Applications of Non-Renewable Biomass Version 10.0 Sectoral Scope(s):03. [https://cdm.unfccc.int/filestorage/1/F/S/1FSPVQM7JWELKHB5U94DXR23TOC6AZ/EB100\\_repan12\\_AMS-II.G.pdf?t=QnJ8cHBmcHhxfDD4WnsRhxhp0I9t-xRRTpRM](https://cdm.unfccc.int/filestorage/1/F/S/1FSPVQM7JWELKHB5U94DXR23TOC6AZ/EB100_repan12_AMS-II.G.pdf?t=QnJ8cHBmcHhxfDD4WnsRhxhp0I9t-xRRTpRM) (Última consulta 22/09/2020)
- [4.27] UNFCC 2019. AMS-II.BG. Small-Scale Methodology: Emission reduction through sustainable charcoal production and consumption Version 02.0 Sectoral Scope(s):04. [https://cdm.unfccc.int/filestorage/A/R/O/AROBVWT4C8DM5H2EXUJ6L7N9ZPQI1G/EB79\\_repan16\\_AMS-III.BG\\_ver03.0.pdf?t=a0F8cTR4ZHRwfdBKwyg3ODbtdUQBnfEz9wVn](https://cdm.unfccc.int/filestorage/A/R/O/AROBVWT4C8DM5H2EXUJ6L7N9ZPQI1G/EB79_repan16_AMS-III.BG_ver03.0.pdf?t=a0F8cTR4ZHRwfdBKwyg3ODbtdUQBnfEz9wVn) . (Última consulta 22/05/2020)



## **Capítulo 5**

### **Diseño de las estufas de cocción**





## Capítulo 5. Diseño de las estufas de cocción.

### Preámbulo.

Para cada pueblo, cada zona climática y geográfica, hay diferentes tipos de estufas, cocinas, hábitos de cocina y de alimentación.

Para el diseño y la adopción de cocinas mejoradas, la perfección técnica es importante, pero también lo es la adaptación a los combustibles y a los hábitos culinarios, las tradiciones y la cultura. Así pues, el enfoque participativo de los usuarios primarios (comunidades locales) en el diseño de una estufa mejorada es un elemento importante que facilita su diseño progresivo y la aceptación de la estufa de cocción una vez finalizado el proceso de diseño.

Por lo tanto, un programa de estufas de cocción eficaz no consiste sólo en desarrollar la mejor o más económica estufa de cocción que cumpla requerimientos técnicos, también es necesario conocer e integrar el mayor número posible de factores económicos, socioculturales y ambientales, a fin de decidir qué tipo de estufas de cocción se adapta mejor a un contexto o entorno particular, o cómo mejorar las estufas de cocción locales o tradicionales. Esto requiere que la capacidad y la voluntad de observar, escuchar y hacer preguntas. Para adaptar los modelos de estufa de cocción a las condiciones locales es necesario un intercambio mutuo de experiencias. En estos casos son las mujeres las que se necesitan como “*expertos*”. Por consiguiente, la complejidad de los programas de estufa requiere un pensamiento multidisciplinario, creatividad y aptitudes sociales. Requiere conocimientos en los campos sociocultural, económico y técnico. El proyecto o programa de diseño debe entonces tener en cuenta los problemas de salud, la sequía, la desertificación, el medio ambiente, la promoción de la mujer, el fomento de la artesanía y la industria, las situaciones de crisis (hambrunas, desastres naturales, guerras, etc.), las emergencias humanitarias, etc. [5.1]. Los esfuerzos actuales están encaminados a liberalizar el diseño y la difusión de las estufas, adaptándolas a las particularidades locales inherentes a las regiones y países en desarrollo.

En las estufas de cocción, sólo una pequeña proporción, del 10 al 40%, de la energía liberada por el fuego [5.2] llega a la olla. Así, el resto de la energía térmica generada en la cámara de combustión se pierde a través del proceso de radiación, conducción y convección. Para reducir las emisiones y el consumo de combustible, el trabajo del diseñador de la estufa mejorada es mejorar la combustión y forzar para que la mayor cantidad de energía posible generada en cámara de combustión para llegar a la olla (mejorando la transferencia de calor). Ambas funciones (mejora la combustión y mejora de la transferencia de calor) se pueden realizar en una estufa bien diseñada [5.2]. Este es el objetivo de este capítulo, que nos permitirá analizar el comportamiento de la estufa con respecto a las emisiones contaminantes y a la eficiencia energética global, siempre que se modifiquen los diversos parámetros de construcción de la estufa de cocción. El análisis básico de la construcción del modelo mejorado parte del modelo de referencia que es el de la estufa de cocción tradicional utilizada por las comunidades locales, que son los principales usuarios.



## **5.1. Mejoras en la eficiencia energética de las estufas domésticas.**

### **5.1.1. Cómo mejorar las estufas tradicionales.**

Mejorar la eficiencia energética de las TCS implica tener en cuenta varios parámetros técnicos como se describe en el trabajo de Baldwin S.F [5.3]. Sin embargo, las consideraciones técnicas por sí solas no bastan para diseñar una estufa de cocina que pueda ser adoptada por una comunidad local. Hay que tener en cuenta los hábitos culinarios locales, el tipo de ollas utilizadas, el tipo de combustible y el tipo de comida que se suele cocinar.

Así pues, un verdadero diseño debe partir de las observaciones reales sobre la utilización de las TCS por las comunidades locales. La estufa diseñada debería estar más cerca en su uso de la TCS para permitir su fácil integración por parte de los primeros usuarios.

El principio de construcción es simple, a partir del tamaño del modelo de la olla de referencia, se construyen diferentes modelos de estufas, variando los parámetros de construcción. Cada modelo construido se prueba en el laboratorio en condiciones reales de uso, para identificar la estufa mejorada que mejor se adapte a la comunidad local.

Para identificar las mejoras, se realizan tres pruebas: la prueba de WBT usando sólo agua, la prueba de CCT cocinando una comida real y la prueba de seguridad (BSSP).

### **5.1.2. Principios para mejorar la eficiencia y reducir la contaminación.**

#### **5.1.2.1. Reducción de la contaminación.**

Los principios para reducir la contaminación en una estufa de fuego abierto podrían resumirse en los siguientes puntos [5.2-5.3].

- Asegura una buena circulación de aire en la cámara de combustión.
- Aislar la zona de combustión para aumentar su temperatura. Un fuego de mayor temperatura quema más gases combustibles y produce menos humo.
- Evitar el uso de materiales fríos y pesados como la tierra o la arena alrededor de la cámara de combustión.
- Conseguir una circulación del aire por debajo del fuego.
- Colocar una corta chimenea aislada sobre el fuego ayuda a aumentar la corriente de aire y a concentrar el fuego en la zona de combustión, reduciendo así las emisiones.
- Limitar la entrada de aire frío realizando un precalentamiento del aire.
- Introducir el exceso de aire necesario para una combustión completa.



### 5.1.2.2. Mejora de la eficiencia energética.

Mejorar la eficiencia energética significa dirigir el máximo flujo de calor producido en la combustión a la olla. Las medidas a tener en cuenta son:

- Aumentar la temperatura de la llama en contacto con la olla utilizando una falda especial para la olla.

-El fuego debe adaptarse al tamaño de la olla. Es más eficiente, desde el punto de vista energético, cocinar con un fuego adaptado al tamaño de la olla que con un exceso de fuego no adaptado al tamaño de la olla que provoca una elevada pérdida de calor.

A continuación figuran algunos principios de diseño técnico y las mejoras propuestas por Baldwin para las distancias de falda/olla basadas en la carga horaria de combustible, como se muestra en el siguiente tabla 5.1 [5.2-5.3].

**Tabla 5.1. Distancias entre la falda y la olla.**

| Nº | Carga de combustible por hora [kg/h] | Distancia entre la falda y la olla [mm] |
|----|--------------------------------------|---|
| 1  | <1                                   | 11                                      |
| 2  | 1.5                                  | 13                                      |
| 3  | 2                                    | 15                                      |

Fuente: Elaboración propia a partir de [5.2-5.3]

La mejora en el diseño de las estufas se ha realizado en tres niveles, el primer nivel, trata del confinamiento del fuego y del calor a partir de la estufa tradicional de fuego abierto. El nivel 2 trata de las dimensiones de la estufa para obtener mejor eficiencia energética. El nivel 3 introduce la posibilidad de una gasificación.

## 5.2. Mejora de los estufas de cocción de primera aproximación (mejora de nivel 1).

### 5.2.1. Mejoras basadas en el enfoque participativo de los usuarios primarios.

El nivel de mejora 1 es un nivel muy simple para conseguir una mejora en la eficiencia térmica de la estufa de cocción tradicional. El objetivo de este nivel de mejora forma parte del marco de fortalecimiento del nivel de adopción de las estufas mediante un enfoque de mejora participativa de los primeros usuarios del proyecto. A través de sencillas técnicas de ingenio, se puede conseguir que los usuarios mejoren sus herramientas de cocina diaria.



### 5.2.2. Modelos de diseño propuesta

Las dos técnicas propuestas no cambian el diseño de los antiguos modelos de TCS utilizados, pero se proponen la adición sencillos elementos cerámicos en la zona de combustión de la estufa TCS:

- Base cerámica (CB): para la TCS-3P con 3 piedras utilizada en los pueblos y zona semiurbana.
- Placas cerámicas (CP): para la TCS de carbón vegetal utilizados en Kinshasa.

### 5.2.3. Estufa tradicional de leña con 3 piedras (TCS-3P).

#### 5.2.3.1. Posición del problema.

Prácticamente, en una TCS-3P, la leña que proporciona la combustión y la energía térmica para cocinar se suele colocar directamente en el suelo. La consecuencia directa es un aumento excesivo de la pérdida de calor por conducción directa al suelo. Por otro lado, esta disposición restringe la circulación del aire a través del combustible e interfiere en gran medida con la mezcla adecuada del combustible y el medio de combustión (que en este caso es el aire).

Todas estas pérdidas reducen drásticamente la eficiencia térmica del TCS-3P. Como resultado, la actividad de cocinar requiere una enorme cantidad de combustible. Además, la combustión ineficiente aumenta la cantidad de partículas finas (PM) y de monóxido de carbono (CO) emitidas al aire [5.12-5.13].

La estufa tradicional a fuego abierto tiene varias desventajas: la dispersión de las llamas y el calor cuando hay viento, la falta de un control adecuado del fuego, la exposición al calor y al humo, los riesgos de incendio (Sharma 1993) [5.14]. La combustión es incontrolada e incompleta en la mayoría de los casos. La eficiencia energética de esta estufa es pobre, ya que la energía producida por la combustión de la biomasa no se dirige en su totalidad a la olla, sino que se dispersa en todas las direcciones. La eficiencia térmica es por lo tanto baja, entre un 10-15%.

Al insertar una base cerámica (CB) en un TCS-3P (Figura 5.1 y 5.2) se levanta la leña del suelo reduciendo la pérdida de calor por conducción hacia el suelo asegurando, de este modo, un suministro de aire constante en la parte inferior de la zona de combustión. En particular, el inserto CB evita el problema de las tradicionales TCS-3P, en las que la eficiencia térmica disminuye en el encendido debido a la falta de oxigenación causada por la asfixia del fuego por las cenizas y brasas acumulados que se producen durante la combustión. Además, la introducción de la CB facilita la entrada de aire a la zona de combustión durante el proceso de cocción. La CB, que está hecho de material refractario (arcilla), se lleva a elevada temperatura, y acumula una gran cantidad de calor. El aire ascendente pasa a través de los agujeros de la CB y se precalienta antes de entrar en la zona de combustión. El precalentamiento mejora la calidad de la combustión al reducir las emisiones contaminantes de PM y CO. Una ventaja de la CB es el hecho de que su uso sólo modifica ligeramente el sistema y proceso de cocción tradicional, lo que aumenta la probabilidad de que se acepte con éxito limitando en la medida de lo posible su impacto en el entorno social y cultural local [5.15-5.16]. Otro punto es que el inserto de la CB puede construirse fácilmente a nivel local

utilizando herramientas comunes y materiales locales, proporcionando capacitación básica a los artesanos locales y a los primeros usuarios (los hogares).

### 5.2.3.2. Técnica de construcción del TCS-3P.

Disposición de las 3 piedras en un triángulo equilátero y en ocasiones se rodea de una chapa metálica o cerámica para proteger el fuego del viento. Dependiendo de la disponibilidad de materiales, las tres piedras pueden ser sustituidas por ladrillos, trozos de arcilla, latas, trípodes de hierro [Figura 5.1].



Figure 5.1. Estufa TCS-3P (a) y TCS-3P +CB (b) [Fuente: Elaboración propia].

### 5.2.3.3 Estufa tradicional de 3 piedras con Base cerámica (TCS-3P+CB).

La arquitectura es la misma que la del TCS-3P pero con una base de cerámica colocada en el centro de la zona de combustión. El combustible para cocinar se coloca sobre la CB como se muestra en la figura 5.2.

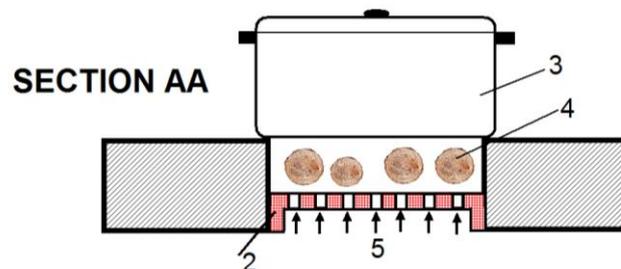


Fig.5. 2. Estufa tradicional con CB (1: piedras 2: CB 3: olla 4: Leña 5: movimiento de aire hacia la zona de combustión) [Fuente: Elaboración propia].

#### 5.2.3.4. Diseño de la Base cerámica (CB).

La CB se construye según las dimensiones de la figura 5.3. La CB está realizada con una mezcla de tres elementos en las siguientes proporciones: 80% de arcilla, 10% serrín y 10% de polvo fino de arcilla cocido. El serrín juega el papel de hacer la CB porosa. Esto facilita la acumulación y la restitución de la energía térmica acumulada para la orientación hacia la olla. El polvo fino de la arcilla cocida previene los choques térmicos y por lo tanto el agrietamiento de la CB. La CB así formado se seca al aire libre durante tres días para disipar toda la masa de agua de la estructura. Después de secarse al aire libre, la CB se cuece en un horno de alta temperatura (900-1000°C), lo que hace de la CB una estructura con buena resistencia mecánica y térmica. El peso de una CB después de secarse en el horno térmico es de unos 2.3 kg, para una olla de 275 mm de diámetro.

El diámetro  $D_{CB}$  de la CB se determina teniendo en cuenta el diámetro medio ( $D_O$ ) de la olla más utilizada. Suponiendo que la olla se coloca sobre la piedra a una distancia “e” a cada lado [como a la figura 5.3(a)], el diámetro  $D_{CB}$  de la CB en función del diámetro de la olla  $D_O$  vendrá dado por la relación 5.1.

$$D_{CB} = D_O - 2e \quad (5.1)$$

Con  $D_{CB}$  que es el diámetro de la CB,  $D_O$  es el diámetro de la olla y “e” es la distancia desde donde la olla se coloca sobre la piedra (para apoyar la olla puede variar de 1 a 2 cm). Si la distancia “e” es demasiado grande, puede impedir que una gran parte de la olla esté en contacto directo con el fuego, lo que afectará a la transmisión de calor. Si “e” es pequeña puede contribuir al desequilibrio estático de la olla. Esto se ilustra en la figura 5.3 (a) siguiente. La altura de la CB  $H_{CB}$  se toma a 4 cm, lo suficiente para permitir el paso del aire a través de la parte inferior y para recoger las cenizas que se están creando. Para esto, se hacen agujeros  $d_A$  de 1 a 2 cm de diámetro en toda la parte superior. También debe dejar espacio suficiente para poner la leña por encima.

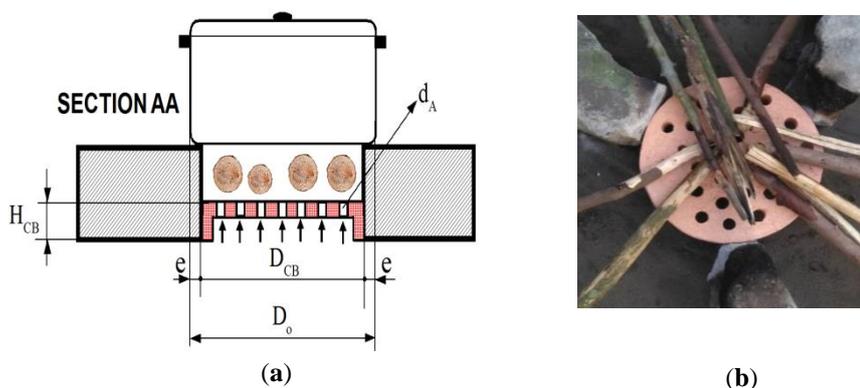


Fig. 5. 3. Disposición de CB entre las tres piedras [Fuente: Elaboración propia].

En cuanto a la seguridad, la TCS-3P no tiene ninguna mejora sustancial. Esta es una debilidad en este nivel de mejora.

#### 5.2.4. Estufa tradicional de carbón vegetal con combustión natural (TCS-C).

##### 5.2.4.1. Descripción de la TCS-C.

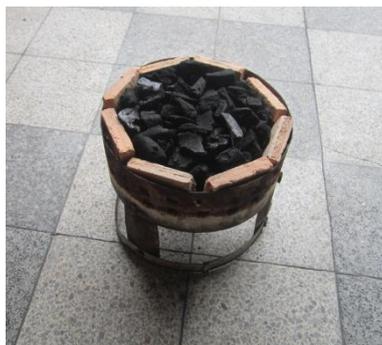
La estufa tradicional utilizada en la ciudad de Kinshasa es la que se muestra en la figura 5.4 (a). Como se puede observar es de fuego abierto. El aire de combustión entra en la cámara desde todas las direcciones. Esta estufa se caracteriza por las elevadas pérdidas de energía por los laterales donde hay varios agujeros. Las dimensiones habituales de la cámara de combustión varían entre 230-290 mm de diámetro. La profundidad media de la cámara de combustión es de 90mm.



(a)



(b)



(c)



(d)

Fig.5. 4. TCS y TCS-C+CPs [TCS vacío (a); TCS-C+CPs vacío (b); TCS-C+CPs cargada de carbón vegetal; TCS-C+CPs en operación (d)].

Fuente: Elaboración propia.

### 5.2.4.2 Posición del problema.

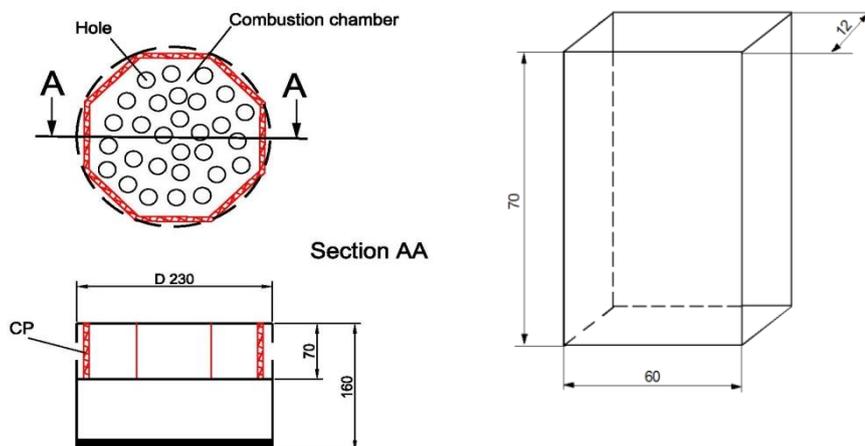
Uno de los puntos débiles del TCS-C es que la combustión de la biomasa es prácticamente al aire libre. El aire de combustión no está dirigido y entra en la zona de combustión de forma aleatoria y descontrolada. Para asegurar una buena combustión, el aire debería dirigirse a la zona de combustión, que es el centro de la cámara. Las caras laterales perforadas causan muchas pérdidas de calor y contribuyen a una mala calidad de la combustión.

### 5.2.4.3. Mejora de la estufa tradicional de carbón vegetal mediante placas de cerámica “Ceramic plate” (CPs).

Para soslayar estos problemas se disponen unas placas cerámicas (CPs) en los laterales del TCS-C. Con lo que se evita que el aire de combustión entre en la cámara por esta zona. La cámara está así confinada, creando una zona muy caliente en el centro que promueve una buena combustión. De esta forma el aire entra en la cámara por la parte inferior desplazándose hacia arriba una vez caliente, a causa de la convección natural. Este movimiento permite que una buena parte del flujo de calor se dirija directamente a la olla, lo que aumenta la eficiencia térmica de la estufa de cocción (Figura 5.4 b, c, d).

### 5.2.4.4. Diseño de los CPs.

Las placas de cerámica (CP) se construyen con materiales locales, con la misma mezcla y composición que la CB descrita anteriormente. Las CPs tienen la forma y las medidas mostradas en la Figura 5.5.



(a)

(b)



(c)

Fig.5.5.Diseño y disposición de los CP en la TCS-C [(a) disposición de los CPs en TCS-C;(b) Diseño de los CPs;(c) fotografía de 10 CPs.]

Fuente: Elaboración propia.

### 5.2.5. Críticas a las mejoras.

- *Problemas de seguridad de uso*

El uso de estas placas cerámicas no tiene en cuenta las condiciones de seguridad. El fuego siempre permanece abierto durante el proceso de cocción con los TCS-3P. Las superficies laterales del TCS-C permanecen a temperaturas muy elevadas y pueden causar quemaduras.

### 5.3. Mejora de nivel 2

Las estufas TCS-C están construidas manualmente y no tienen dimensiones estándar. Por eso se quiere comprobar la influencia del tamaño del diámetro de las estufas en la eficiencia térmica de ellas.

#### 5.3.1. Influencia del diámetro de la cámara de combustión.

En primer lugar analizaremos la influencia del diámetro de la cámara de combustión en la eficiencia energética, utilizando el mismo tamaño de la olla.

Estableciendo la hipótesis de partida de que para el mismo tamaño de olla, el diámetro de la cámara de combustión tendría un impacto real en el consumo de combustible, se realizó una prueba de cocción

controlada (CCT) en el mismo modelo TCS-C con dos cámaras de combustión de diferentes diámetros que cocinaban la misma comida, con el mismo tipo de combustión y en las mismas condiciones al aire libre. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 5.2 siguiente.

**Tabla 5.2 Influencia del tamaño del diámetro de la cámara de combustión en el SFC de una estufa**

|           | TCS-C D27 |      |      |             | TCS-C D23 |      |      |               | [%]TCS-C D27 vs TCS-C D23 |
|-----------|-----------|------|------|-------------|-----------|------|------|---------------|---------------------------|
|           | Means     | SD   | Ue95 | C.I 95      | Means     | SD   | Ue95 | C.I 95        |                           |
| CC [g]*   | 1250      | 45.8 | 51.9 | [1198;1302] | 980       | 55.7 | 63.0 | [917;1043]    | 21.6                      |
| SFC[g/kg] | 317.8     | 0.15 | 0.17 | [317.6;318] | 246.0     | 0.13 | 0.14 | [245.8;246.1] | 22.6                      |

\*Carbón vegetal, SD: desviación estándar, Ue95 error a 95% ,C.I 95: Intervalo de confianza a 95%, Means: Valor media

**Fuente: Elaboración propia**

En la tabla 5.2 se muestra que una TCS-C D27 con un diámetro de cámara de 27 cm consume más carbón vegetal que una TCS-C D23 con un diámetro de cámara más pequeño de 23 cm, para el mismo tamaño de la olla. El consumo específico medio (SFC) es de 317g/kg de alimentos cocinados para la TCS-C D27 y de 246 g/kg para la TCS-C D23. Estos resultados muestran que, es necesario optimizar el diámetro de la cámara de combustión en función del diámetro de la olla.

### 5.3.2. Determinación del diámetro medio de la olla ( $D_o$ ) en la zona de estudio.

A partir de 400 muestras aleatorias tomadas de hogares en Kinshasa, obtuvimos valores del diámetro de la olla  $D_o$  en el rango de 246 a 292 mm, con un valor medio ponderado de 275 mm. Este será el valor utilizado para la optimización de la estufa. El tamaño de la olla que se toma aquí es la olla grande que cada hogar tiene para preparar la comida principal (la harina de maíz o de mandioca, comúnmente llamada "FuFu" en Kinshasa).

### 5.3.3. Selección del diámetro óptimo de la cámara de combustión.

La figura 5.6 muestra la disposición de la olla sobre la estufa de cocción. La base de la olla es plana y circular. Esto permite construir una cámara de combustión cilíndrica.  $D_o$  indica el diámetro de la olla y  $D_c$  el diámetro de la cámara de combustión.

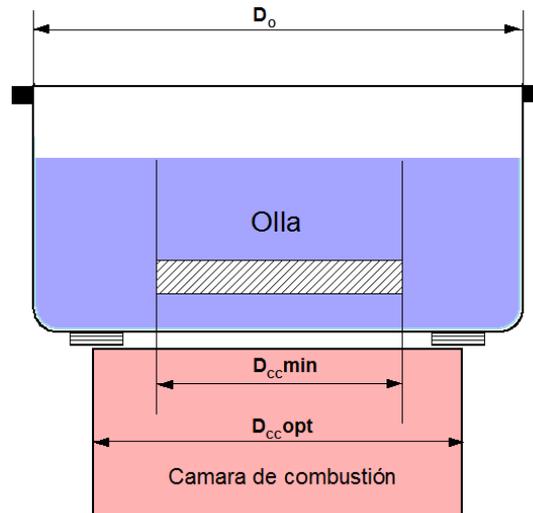


Fig.5.6. Diámetro  $D_{cc}$  en función del diámetro  $D_o$ .

Fuente: Elaboración propia

La búsqueda del diámetro óptimo para la cámara de combustión, nos permitió establecer las siguientes tres hipótesis simplificadoras:

**5.3.3.1. Hipótesis 1:** el diámetro de la cámara de combustión  $D_{cc}$  debe ser menor que el diámetro de la olla  $D_o$ .

La elección del diámetro óptimo de la cámara de combustión de la estufa de cocción se hace sabiendo que debe ser más pequeño que el de la olla y de acuerdo con los límites de la siguiente relación 5.2.

$$D_{cc} < D_o \quad (5.2)$$

En efecto, un diámetro demasiado pequeño de  $D_{cc}$  implica una baja potencia de fuego, lo que aumenta enormemente el tiempo de cocción con implicaciones directas en el consumo.

**5.3.3.2. Hipótesis 2:** El diámetro óptimo de la cámara de combustión ( $D_{cc\ opt}$ ) debe estar dentro de los límites establecidos por la relación 5.3.

$$D_o/2 < D_{cc\ opt} < D_o \quad (5.3)$$

De estas dos hipótesis de partida, los diferentes tamaños de diámetro  $D_{cc}$  que se han propuesto y experimentado son:  $D_{cc1}= 130\text{mm}$ ,  $D_{cc2}= 1400\text{mm}$ ,  $D_{cc3}=140\text{mm}$ ,  $D_{cc4} =150\text{mm}$ ,  $D_{cc5}=160\text{mm}$ ,  $D_{cc6}=170\text{mm}$ ,  $D_{cc7}=180\text{mm}$  y  $D_{cc7} = 190\text{mm}$ .

### 5.3.4. Elección de la profundidad de la cámara de combustión.

El tiempo de utilización o tiempo de funcionamiento de la estufa de cocción dependen de la profundidad de la cámara de combustión, cuanto mayor sea esta profundidad, se puede poner más combustible y estar funcionando durante mayor tiempo. Los experimentos se llevaron a cabo en una cámara de combustión con una profundidad de entre 60 mm y 120 mm.

### 5.3.5. La elección de la altura de los soportes-olla (Hso)

La altura de los soportes-olla (Hso) debe ser optimizada para una óptima transmisión del flujo de calor útil ( $\Phi_U$ ) que llega a la olla (Figura 5.7). Sabiendo que para una altura de soporte demasiado elevada, la transmisión de calor tiende a ser cero. En este caso, todo el flujo de calor generado ( $\Phi_G$ ) en la cámara de combustión se pierde. Y para una altura cero, se supone que no hay corriente de aire (no hay efecto chimenea), el fuego tiende a apagarse. En definitiva, cuanto más altos sean los apoyos mayores pérdidas habrán, pero si son muy pequeños no hay flujo de aire, por lo que hay que buscar la solución de compromiso, que viene a ser de alturas entre 10 a 50 mm según pruebas realizadas.

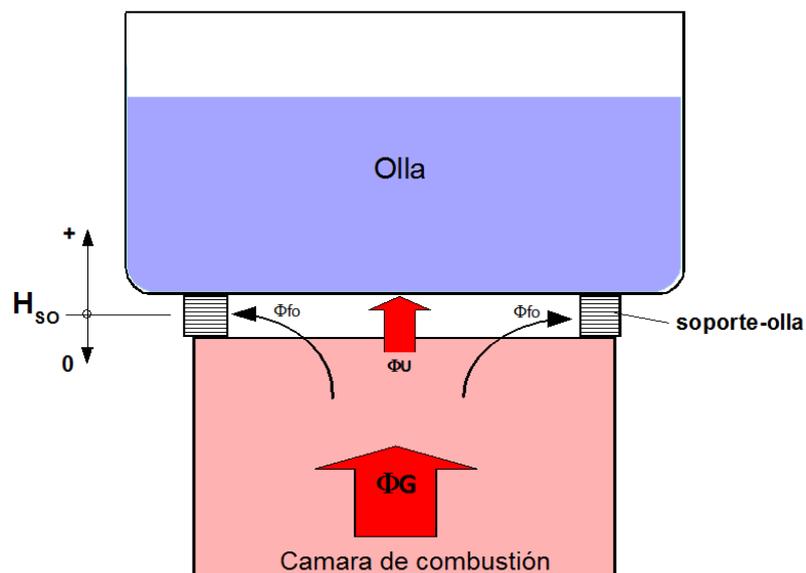


Fig. 5.7. Altura de los soportes-olla (Hso).

Fuente: Elaboración propia

Las diferentes altura de los soportes-olla (Hso) que se experimentaron y cuyos resultados se muestran en el capítulo 6, son: Hso1=10mm, Hso2=15mm, Hso3=20mm, Hso4=35mm. Hso5=40mm, Hso6=45mm y Hso7=50mm.

### 5.3.6. Minimización de las pérdidas laterales: aislamiento de la cámara de combustión.

#### 5.3.6.1 La pared de aislamiento térmico.

Las pérdidas por las paredes laterales  $\Phi_{avl}$  (Figura 5.8) se deben a la transferencia de calor a través del aislamiento térmico, que es de forma cilíndrica, y puede ser evaluado como en la relación 5.4.

$$\Phi_{avl} = \frac{2\pi l \lambda \Delta T}{\ln \frac{R}{r}} \quad (5.4)$$

Con:  $\Delta T = T_c - T_{amb}$ . ( $T_{amb}$  es la temperatura ambiente,  $T_c$  es la temperatura de la cámara de combustión [°C],  $R$  es el radio exterior de la cámara de combustión [m],  $r$  es el radio interno de la cámara de combustión [m],  $l$  es la profundidad de la cámara de combustión [m],  $\lambda$  = Coeficiente de Conductividad Térmica [W/m.K].

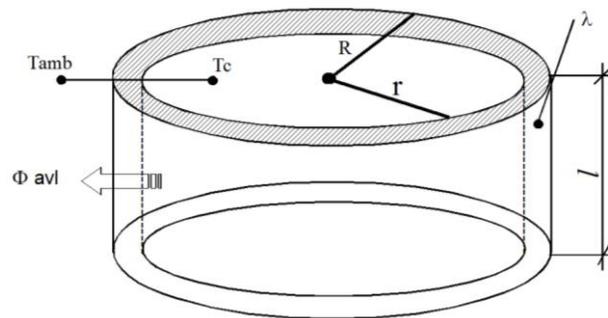


Fig.5.8. Factores que influyen en las pérdidas laterales en la cámara de combustión.

Se buscará un espesor de aislamiento que evite esta fuga de calor al exterior sin que su precio sea excesivamente elevado, buscando una solución óptima.

## 5.4. Mejora del nivel 3 de las estufas de cocción

### 5.4.1 Estufa de gasificación de la biomasa

#### 5.4.1.1. Concepto

En una estufa de gasificación, la biomasa sólida se convierte en combustible gaseoso por oxidación parcial. Este combustible gaseoso se transporta fuera del lecho de combustible sólido, se mezcla con aire adicional y se quema para calentar la superficie de cocción. Las estufas de gasificación de tiro ascendente son diseñadas para minimizar las emisiones, la producción de alquitrán y mejorar la mezcla de aire y combustible [5.17-5.19]. La cámara de combustión se carga con biomasa sólida y se enciende en la parte superior (Figura 5.9). El aire primario fluye hacia arriba a través de la base de la cámara de combustión y

proporciona el oxidante necesario para gasificar la biomasa. La zona de oxidación (también llamada zona de combustión primaria o zona de pirolisis en llamas) progresa hacia abajo a través del lecho de combustible. Los gases de pirolisis que se liberan de la biomasa sólida se oxidan parcialmente en la zona de pirolisis en llamas y luego pasan a través del lecho de carbón vegetal caliente donde pueden seguir reaccionando. El calor liberado durante la oxidación parcial de los gases de pirolisis impulsa la pirolisis continua de la biomasa. El gas de producción que sale del lecho de carbón vegetal caliente se mezcla con aire secundario (precalentado en el túnel) cerca de la parte superior de la estufa y se forma la llama que calienta la superficie de la olla cocción [5.20]. La llama en la zona de combustión secundaria es una llama inversa no premezclada en la que se inyecta el oxidante en el combustible que fluye hacia arriba. En una estufa de "tiro natural", tanto el flujo de aire primario como el secundario son impulsados totalmente por convección natural. En una estufa de "aire forzado", el flujo de aire es impulsado externamente por un ventilador o soplador.

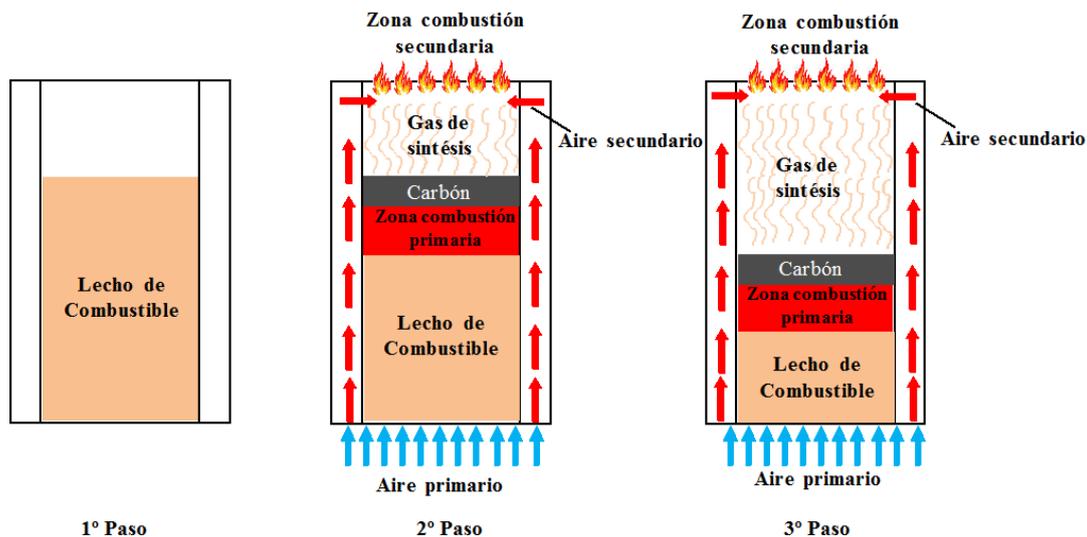


Fig.5.9. Proceso de una estufa de gasificación.

Fuente: Elaboración propia.

#### 5.4.1.2 Principio de funcionamiento de una estufa de gasificación ICS-G1.

La ICS-G1 se ilustra en la Figura 5.10. En la estufa de gasificación de biomasa, la combustión se realiza en dos etapas. La primera etapa es la combustión parcial de la biomasa. La proporción estequiometría de aire para asegurar la combustión total de la biomasa es de 6 kg de aire por 1 kg de biomasa. El 30-40% del aire total necesario, llamado aire primario, se introduce en la parte inferior del reactor, que tiene como objetivo gasificar la biomasa sólida en un elemento gaseoso (singas). El resto del aire necesario, llamado aire

secundario, se introduce en la parte superior del reactor, y tiene la función es asegurar la completa combustión de la biomasa. El número de orificios para la entrada del aire primario y el secundario se distribuye teniendo en cuenta esta proporción. Las secciones de entrada del aire primario y secundario son tales que aseguran estas proporciones de aire. La entrada del aire se realiza mediante un ventilador y el suministro en energía para él, se realiza mediante un pequeño panel solar, asegurando la autonomía mediante una pequeña batería de litio-ion. La figura 5.10 describen esta estufa ICS-G1.

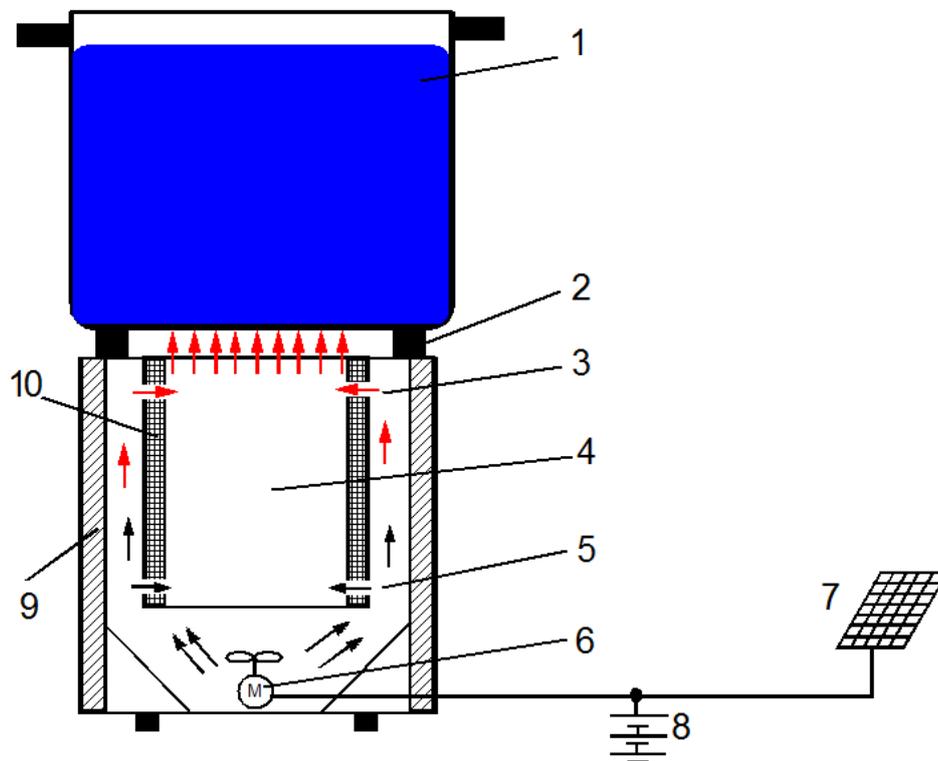


Fig.5.10. Descripción de la ICS-G1 [1: Olla, 2: Soportes-olla, 3: Entrada de aire secundario, 4: Cámara de combustión, 5: Entrada de aire primario, 6: soplador(motor) 7 panel solar 8.batería de litio 9. 8: Aislamiento de lana de roca 10.Aislamiento en ceramcade la camara de combustion ].

#### 5.4.1.3. La importancia de la gasificación de la biomasa.

La combustión del gas puede alcanzar temperaturas mucho más altas que las del combustible sólido. La mezcla con el aire es mucho más íntima y homogénea que con el combustible sólido. Por lo tanto, la calidad de la combustión del gas es mucho mejor que con el combustible sólido en las mismas condiciones.

#### 5.4.1.4. Dimensionamiento de los diferentes elementos de un ICS-G1.

**1ºEnergía necesaria (Q):** Según el rendimiento previsto de las estufas de gasificación, se debería reducir en un 60% la energía consumida para cocinar los alimentos en una estufa de cocina tradicional TCS-C, utilizada en la ciudad de Kinshasa. Utilizando el TCS el consumo diario por persona varía entre 240g y 180g de carbón por día, con un promedio de 210g por persona. Con lo que se tendría que llegar a 84 g/persona para la estufa de gasificación. Esto da un equivalente de energía de 15,1 MJ para un hogar de 6 personas, otros autores establecen un consumo energético de 15,8 MJ [5.21-5.23]. En general, esta cantidad de energía para cocinar alimentos puede obtenerse con un reactor de 3kW de potencia mínima con un tiempo de operación o uso de alrededor de 1.0 a 1.5 h [5.24]. Así pues, todo el proceso vuelve al dimensionamiento de un reactor de gasificación de 3kW de potencia y cuyos otros parámetros de partido se fijan en la siguiente tabla 5.3.

**Tabla 5.3 Parámetros iniciales para la construcción de la ICS-G1.**

| Nº | Parámetro                                     | Símbolo     | Valor                                    |
|----|---|-------------|--|
| 1  | Potencia                                      | P           | 3kW                                      |
| 2  | Aire estequimétrico                           | SA          | 6kg air/kg biomasa                       |
| 3  | Relación de equivalencia                      | $\epsilon$  | 0.33                                     |
| 4  | Densidad de aire                              | $\rho_a$    | 1.25kg.m <sup>-3</sup>                   |
| 5  | Eficiencia térmica                            | $\eta_{th}$ | 60%                                      |
| 6  | Tiempo de funcionamiento                      | t           | 1h                                       |
| 7  | La densidad aparente de la biomasa            | $\rho_b$    | 560 kg.m <sup>-3</sup>                   |
| 8  | Diámetro entra aire en reactor                | de          | 2mm                                      |
| 9  | Tasa de gasificación específica de la biomasa | SGR         | 110kg.m <sup>-2</sup> .h <sup>-1</sup> ) |

Fuente : Elaboración propia

**2ºTasa de consumo de combustible “Fuel Consumption Rate” (FCR):** Esta es la cantidad de combustible de biomasa que debe utilizar la estufa para proporcionar la energía necesaria. Se puede deducir utilizando la relación (5.5).

$$FCR = \frac{P \cdot 3600}{LCV \cdot \eta_{th}} \quad (5.5)$$



Con:

FCR es la tasa de consumo de combustible;  $LCV$  representa el poder calorífico específico inferior del combustible y  $\eta_{th}$  representa la eficiencia térmica del gasificador.  $P$  es la potencia del reactor (kW). Para este tipo de gasificador, la eficiencia térmica se asume como 60-70% [5.21, 5.23, 5.25].

### 3º Diámetro del reactor de gasificación [5.21-5.22, 5.25-5.28].

El diámetro del reactor es una función de la tasa de consumo de combustible y de la tasa específica de gasificación (SGR), definida como la cantidad de combustible utilizada por unidad de tiempo y por unidad de superficie en el reactor. ( $110-210 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ) [5.23-5.28]. El diámetro puede determinarse mediante la expresión (5.6). La potencia de un reactor será una función del diámetro. Por lo tanto, un reactor potente tendrá un gran diámetro constructivo.

$$D = \left( \frac{4 * FCR}{SGR * \pi} \right)^{0.5} \quad (5.6)$$

**4º Altura del reactor:** La altura del reactor que determina el tiempo durante el cual la cámara de combustión debe funcionar después de cargar el combustible. Se deduce usando la ecuación (5.7) siguiente [22-28].

$$H = \frac{SGR * t}{\rho_f} \quad (5.7)$$

Con:

SGR es la tasa de gasificación específica;  $t$  es la estimación del tiempo de funcionamiento del reactor y  $\rho_f$  es la densidad del combustible. La densidad aparente de los combustibles utilizados estén está en el rango de  $560 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  con un poder calorífico inferior de  $18.34 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$

**5º Cantidad de aire necesario para la gasificación ( $Q_{PA}$ ):** Esta es la tasa de flujo de aire necesaria para gasificar la biomasa. Esto se puede obtener usando la ecuación (5.8).

$$Q_{PA} = \frac{\varepsilon * FCR * SA}{\rho_a} \quad (5.8)$$

Donde:

$Q_{PA}$  es la tasa de flujo de aire;  $\varepsilon$  es la relación de equivalencia de gasificación (0.3 a 0.4) [5.23-5.28],  $FCR$  es la tasa de consumo de combustible;  $SA$  es la cantidad estequiométrica de aire requerida por unidad de biomasa [6 kg aire por kg biomasa] [5.27];  $\rho_a$  es la densidad del aire.

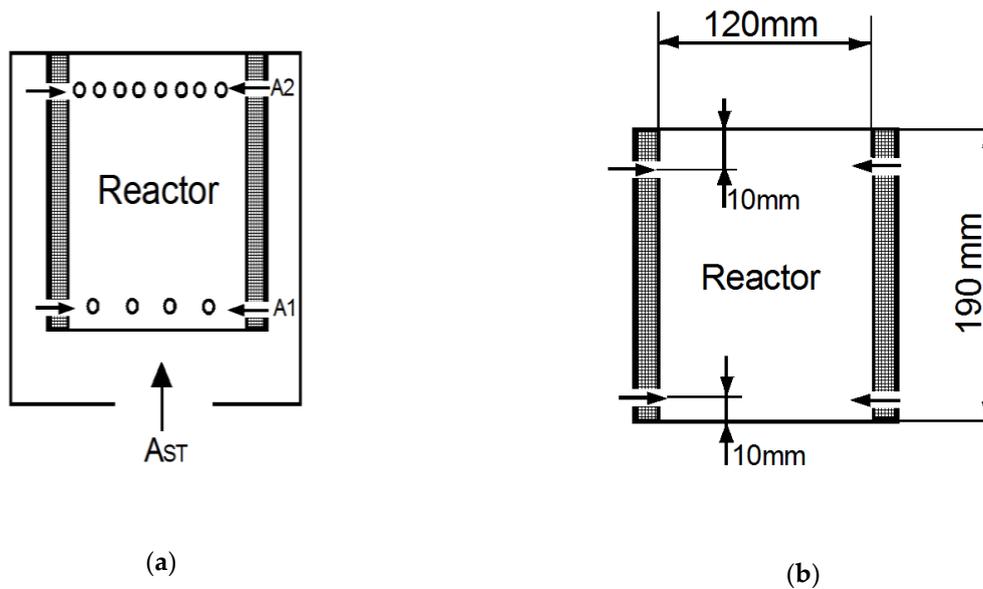
Después del cálculo, los parámetros de un reactor de 3 kW se representan en la siguiente Tabla 5.4.

**Tabla 5.4. Parámetros del reactor de potencia 3 kW.**

| D [cm] | H [cm] | FCR [kg·h <sup>-1</sup> ]* | Q <sub>PA</sub> [m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> ] | Q <sub>AS</sub> [m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> ] |
|--------|--------|----------------------------|--|--|
| 12     | 19     | 0.906                      | 1.304  | 4,34   |

Fuente: Elaboración propia

El aire primario (A1) y secundario (A2) están suministrados por un pequeño ventilador de 1 W alimentado a 12 V. Un variador de velocidad permite la variar el caudal de aire en el reactor. Una batería ion-litio (12V; 9Ah) y un panel solar (5W) proporcionan de forma limpia la energía eléctrica que necesita el ICS-G1. El aire primario entra a través de 10 pequeños orificios de 2 mm de diámetro ubicados a 10mm del fondo del reactor. El aire secundario entra en el reactor por 20 pequeños orificios de 2 mm de diámetro en la parte superior como se muestra en la figura 5.11.

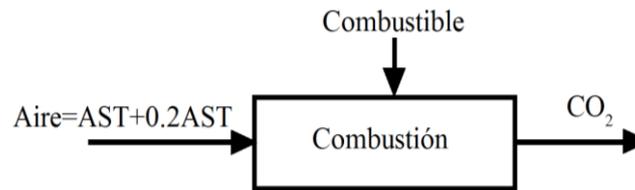


**Figure 5.11. Distribución del aire en el reactor (a) Mediciones del reactor (b).**

Fuente: Elaboración propia

6°La cantidad de aire necesaria para la combustión completa de la biomasa (AST).

Sabiendo que la tasa de consumo de combustible es de 0.906kg/h de biomasa y la cantidad estequiométrica de aire (SA) es de 6kg de aire/kg de biomasa y una densidad de aire de 1.25kg/m<sup>3</sup>, tenemos un caudal igual a 4.34 m<sup>3</sup>/h. En la práctica, a la cantidad teórica de aire se le añadirá un exceso para obtener la cantidad total de aire para asegurar la eficacia de la combustión total de la biomasa, como se ilustra en la siguiente figura 5.12.



**Fig.5.12. Sistema de combustión con exceso de aire**

Para un combustible determinado, se requiere una cantidad específica de aire de combustión para proporcionar el oxígeno necesario para la combustión completa del carbono e hidrógeno de ese combustible. La cantidad precisa de aire se denomina "aire teórico" o "aire estequiométrico" para ese combustible en particular [5.29]. El suministro de aire para el proceso de combustión debe ser suficiente para la combustión teórica y también proporcionar "exceso de aire" para asegurar una combustión completa. Como se muestra en el gráfico de la figura 5.12, cuanto más aire se suministra, mejor es la combustión. Por lo tanto, la cantidad total de aire que se suministrará al reactor será:

$$AST=SA+20\%SA=SA+0.2*SA=1.2*SA =5.21m^3/h$$

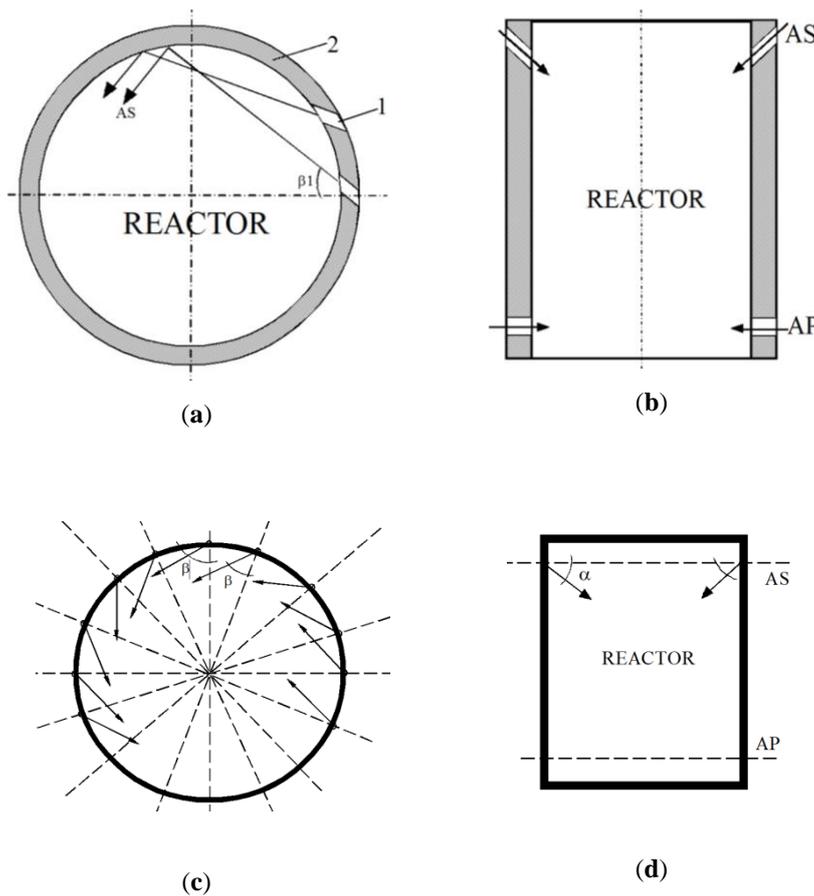
Esta cantidad de aire  $A_{ST}$  es aire teórico más el 20%.  $A_{ST}$  se divide en dos partes: A1 (aire primario) y A2 (aire secundario). A1 sirve para la gasificación de la biomasa (combustión parcial) y A2 para la combustión total.

#### **5.4.1.5. Pre calentamiento del aire secundario.**

La combustión requiere una temperatura de unos 250 a 300°C. De hecho, cuando el aire suministrado para la combustión no se precalienta antes de entrar en la cámara de combustión, puede enfriar los gases generados, impidiendo que se quemen adecuadamente. El aire secundario se precalienta por contacto con el reactor por el movimiento ascendente de abajo a arriba antes de entrar por los orificios secundarios de la parte superior como se puede ver a la figura 5.11.

#### **5.4.1.6 La orientación de los agujeros de entrada de aire secundarios y El aspecto arremolinado.**

Constructivamente, los agujeros de entrada de aire secundarios están orientados como se muestra en la figura 5.13. Se disponen formando ángulos  $\alpha$  y  $\beta$  de  $45^\circ$ . Con esta inclinación de los agujeros se crea un movimiento de vórtice circular en el reactor que promueve la mezcla de aire y, por lo tanto, una buena combustión.



**Fig.5.13. Reactor (cámara de combustión) y la orientación de las entradas de aire primarias (AP) y secundarias (AS) [vista superior (a) y (c) y vista lateral (b) y (d)].**

#### 5.4.1.7. El suministro de energía de la estufa ICS-G1.

El suministro de energía se realiza desde un panel solar de 5W. El nivel de radiación solar es casi permanente en la RDC. Sin embargo, se planea un pequeño sistema de almacenamiento de energía por medio de una batería de iones de litio para cuando se utilice la estufa en la noche.

#### 5.4.1.8. La autonomía de la estufa ICS-G1.

La autonomía del suministro de energía para el soplador (1W/12V) aire está garantizada por una batería de litio-ion de 9Ah. Esto asegura una autonomía de 27 días de cocción garantizada de 4h/día.

#### 5.4.1.9. Suministro multi-combustible de las ICS-G1.

En una ICS-G1 se pueden utilizar diferentes tipos de combustibles sólidos: carbón vegetal, madera, pellets y briquetas de biocombustible (Figura 5.14).



(a)



(b)



(c)



(d)

**Fig.5.14. Diferentes tipos de combustibles sólidos probados en la estufa de gasificación [carbón vegetal(a), Pellet (b), Leña(c), BSW (d)].**

En la figura 5.15a se muestra la fotografía de la estufa de cocción ICS-G1, y en la figura 5.15b vemos el mismo ICS-G1 en pleno funcionamiento.



(a)



(b)

Fig.5.15. Estufa ICS-G1(a) ICS-G1+panel solar (b) ICS-G1 en funcionamiento.

#### 5.4.2 Estufas de gasificación de doble cámara de combustión (ICS-G2).

##### 5.4.2.1 Importancia de la ICS-G2 con doble reactor.

Una ICS-G2 con dos reactores responde a la necesidad de ahorrar tiempo al realizar las diversas tareas de cocción de alimentos en el hogar. El tiempo de cocción de una comida puede durar hasta 4 a 5 horas para un hogar medio, dependiendo de los alimentos que se preparen (por ejemplo, hojas de yuca o frijoles). La cocción simultánea con una estufa de dos ollas puede reducir drásticamente el tiempo total dedicado a la cocción. El espacio de la cocina sería más reducido si se cocina con una estufa de dos reactores ICS-G2 que con dos estufas diferente de tipo ICS-G1 de un solo reactor.

##### 5.4.2.2 Diseño de la ICS-G2.

La siguiente figura 5.16 muestra el diseño de un ICS-G2. Dos reactores están dispuestos en la misma caja metálica. La ICS-G2 cuenta con dos reactores idénticos de 2.5kW. En la tabla 5.5 se muestran las diferentes combinaciones posibles de potencia de los reactores que pueden utilizarse según el tamaño del hogar. En la figura 5.17 tenemos la fotografía de la estufa de cocción ICS-G2.

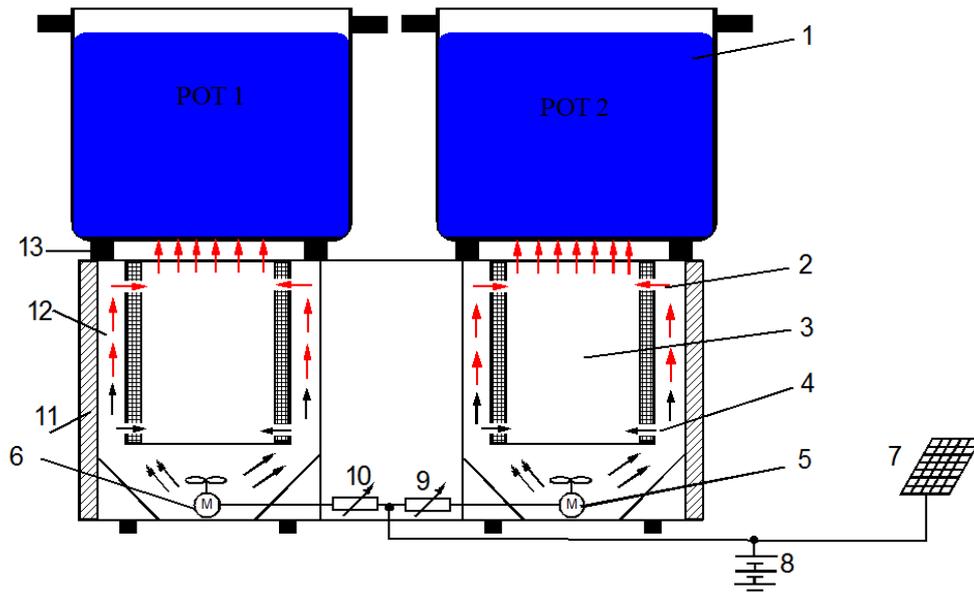


Figura 5.16. Plano descriptivo de una estufa de gasificación de doble reactores ICS-G2.



Fig.5.17. Estufa de gasificación de doble reactores ICS-G2.

### 5.4.2.3 Las diferentes potencias de los reactores y sus dimensiones constructivas.

Las diferentes potencias de los reactores y sus dimensiones constructivas se indican en la siguiente tabla 5.5.

Tabla 5.5. Parámetros de diseños de reactores de las estufas

| P[kW] | D[cm] | H[cm] | FCR[m <sup>3</sup> ,h-1] | AFR[m <sup>3</sup> ,h-1] | t[h] |
|-------|-------|-------|--------------------------|--------------------------|------|
| 2     | 10    | 19    | 0.64                     | 0.92                     | 1    |
|       | 10    | 29    | 0.64                     | 0.92                     | 1.5  |
| 2,5   | 11    | 19    | 0.80                     | 1.16                     | 1    |
|       | 11    | 29    | 0.80                     | 1.16                     | 1.5  |
| 3     | 12    | 19    | 0.96                     | 1.39                     | 1    |
|       | 12    | 29    | 0.96                     | 1.39                     | 1.5  |
| 3,5   | 13    | 19    | 1.13                     | 1.62                     | 1    |
|       | 13    | 29    | 1.13                     | 1.62                     | 1.5  |
| 4     | 14    | 19    | 1.28                     | 1.85                     | 1    |
|       | 14    | 29    | 1.28                     | 1.85                     | 1.5  |
| 4,5   | 15    | 19    | 1.45                     | 2.08                     | 1    |
|       | 15    | 29    | 1.45                     | 2.08                     | 1.5  |
| 5     | 16    | 19    | 1.61                     | 2.31                     | 1    |
|       | 16    | 29    | 1.61                     | 2.31                     | 1.5  |

Fuente: Elaboración propia

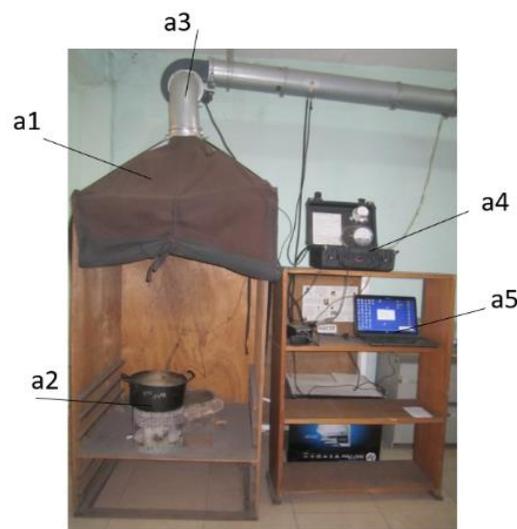
### 5.5. Equipos de Medición.

Para las diferentes pruebas de WBT, CCT y seguridad, se han utilizado los equipos de medición siguiente:

- Balanza OHAUS corporation, mod. V11P6 Capacidad 6 kg precisión 0. 1g.
- Balanza OHAUS corporation mod. NVL 20000/2 Capacidad 20 kg, precisión 1g.
- Balanza mettler mod. AB304-S/FACT. Capacidad 320 gr, precisión 0.1mg.
- Horno de mufla selecta SELECT- HORN, Capacidad 9 litros. Potencia 3000 W. Temperatura máxima 1100 °C
- Calorímetro de combustión CAL2K/1 Resolución 0.001 Mj/kg y 0.000001 °C.
- Termómetro de infrarrojo VWR1620-2203 S/N :13028 Traceable D :S=12 :1
- Termómetro termopar FLUKE CO. Series 51 II
- Secador VWR DRY-line t°nom. 220°C/428°F, U 230V/1N, F 50/60Hz, P 0.8kW.

- Olla estándar de 7l En Aluminio  $\Phi 270\text{mm}$  h 140mm e 1mm para las pruebas de WBT.
- Criba de separación de tamaño de partícula, Malla 30x30 mm, superficie 1m<sup>2</sup>
- Cronómetro, VWR Digital timer clock EU 609-0136 NA82023-858 S/N F131131.

Equipo de adquisición de datos Portable Emission Monitoring System (PEMS) (by Aprovecho® Cottage Grove, OR, USA) con el que se determina las emisiones contaminantes de CO y PM durante la prueba de Water Boiling Test, WBT (Figura 5.18). Este equipo se compone de una campana (a1), en cuyo interior se coloca la estufa a ensayar (a2). El extractor (a3) absorbe todas las emisiones contaminantes y toma una muestra de los gases de emisión para llevarlos a la caja sensores (a4). Interfaz con sistema de adquisición de datos, conectado a un ordenador (a5).



**Fig. 5.18. El Portable Emission Monitoring System (PEMS).**

**Fuente:** Elaboración propia

## 5.6. Conclusión.

A partir de los actuales equipos de preparación de alimentos se ha comprobado que, en algunos casos, con ligeras mejoras se pueden conseguir ventajas importantes en cuanto a eficiencia y a tiempo de preparación de comidas. En otras ocasiones, con mejoras más significativas se van a obtener mayores ventajas, incluso conseguir también diseños más seguros para las personas que los utilizan.

Así pues, se ha partido de soluciones muy sencillas, que se pueden fabricar en cualquier zona de un país en desarrollo, como RDC, pasando por otros diseños que requieren algo más de trabajo en su concepción, llegando a equipos de gasificación con uno o dos gasificadores que ya requieren de una tecnología algo



más avanzada y que será utilizable en zonas poco aisladas al necesitar equipos como pequeños paneles solares o baterías.

En este capítulo se ha mostrado el proceso del diseño de diferentes modelos de estufas que posteriormente se ensayaron para optimizar dimensiones y comprobar, por último, los resultados de las diferentes magnitudes de consumos, de eficiencias y de gases contaminantes.

### Referencias bibliográficas del capítulo 5.

- [5.1] Foyers en Images, 1995: une documentation sur les foyers améliorés et traditionnels en Afrique, Asie et Amérique Latine Frankfurt am Main 1995, ISBN 3-86099-135-3.
- [5.2] Bryden M., Still D., Scott P., Hoffa G., Ogle D., Bailis R., Goyer K. Design Principles for Wood Burning Cook Stoves. <http://aprovecho.org/publications-3/> (Última consulta 24/05/2020).
- [5.3] Baldwin S.F. 1987. Biomass stoves: engineering design, development, and dissemination. VITA 1600 Wilson Boulevard, Suite 500 Arlington, Virginia 22209 USA. ISBN-13: 978-0866192743
- [5.4] Global Report on displacement (GRID) 2018. <http://www.internal-displacement.org/global-report/grid2018/downloads/misc/2018-GRID-Highlights-EN.pdf> (Última consulta 22/05/2020).
- [5.5] Barbieri, J.; Riva, F.; Colombo, E. Cooking in refugee camps and informal settlements: A review of available technologies and impacts on the socio-economic and environmental perspective. *Sustain. Energy Technol. Assess.* 2017, 22, 194–207. doi.org/10.1016/j.seta.2017.02.007.
- [5.6] UNHCR, 2017. <https://www.unhcr.org/fr/news/briefing/2017/10/59ef2dada/hcr-crise-deplacements-populations-saggrave-rdc.html>. (Última consulta 22/06/2020)
- [5.7] Dresen, E., DeVries, B., Herold, M., Verchot, L. and Muller, R. 2014. Fuelwood Savings and Carbon Emission Reductions by the Use of Improved Cooking Stoves in an Afromontane Forest, Ethiopia. *Land*, 3, 1137-1157. <https://doi.org/10.3390/land3031137>.
- [5.8] Cooke, P.; Kohlin, G.; Hyde, W.F. Fuelwood, forests and community management-Evidence from household studies. *Environ. Dev. Econ.* 2008, 13, 103–135.
- [5.9] Confino, J.; Paddison, L. Cookstove designs are failing the poorest communities. *The Guardian*, 7 February 2014. <https://www.theguardian.com/sustainable-business/cookstoves-design-poor-communities-refugees-unhcr-ikea> (Última consulta 21/10/2020)
- [5.10] Lehne, J.; Blyth, W.; Lahn, G.; Bazilian, M.; Grafham, O. Energy services for refugees and displaced people. *Energy Strateg. Rev.* 2016, 13–14, 134–146. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2016.08.008>.
- [5.11] IMF. Country Report No. 15/280 DEMOCRATIC REPUBLIC OF THE CONGO <https://www.imf.org/external/pubs/ft/scr/2015/cr15280.pdf>. (Última consulta 22/05/2020)
- [5.12] Jetter, J.J.; Kariher, P. Solid-fuel household cook stoves: Characterization of performance and emissions. *Biomass Bioenergy* 2009, 33, 294–305. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.05.014>.
- [5.13] Shen, G.; Gaddam, C.K.; Ebersviller, S.M.; VanderWal, R.L.; Williams, C.; Faircloth, J.W.; Jetter, J.J.; Hays, M.D. A Laboratory Comparison of Emission Factors, Number Size Distributions, and



- Morphology of Ultrafine Particles from 11 Different Household Cookstove-Fuel Systems. *Environ. Sci. Technol.* 2017, 51, 6522–6532. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b05928>.
- [5.14] Sharma, S. K. (1993). *Improved Solid Biomass Burning Cookstoves: A Development Manual* FAO, ARECOP and Energy Research Centre of Panjab University. Bangkok. 1993. <http://wgbis.ces.iisc.ernet.in/energy/HC270799/RWEDP/acrobat/fd44.pdf> (Última consulta 21/10/2020)
- [5.15] Udaykumar, H.S.; Kindig, A.; Rao, S.; Del Viscio, M.; Kukillaya, V.; Panwar, N.L.; Sharma, D. How a simple inexpensive device makes a three-stone hearth as efficient as an improved cook-stove. *Solut. J.* 2015, 6, 53–60.
- [5.16] Parigi, F.; Del Viscio, M.; Amicabile, S.; Testi, M.; Rao, S.; Udaykumar, H.S. High efficient Mewar Angithi stove testing in rural Kenya. In *Proceedings of the 2016 7th International Renewable Energy Congress (IREC), Hammamet, Tunisia, 22–24 March 2016*; pp. 1–6. DOI: 10.1109/IREC.2016.7478891.
- [5.17] Reed, T. B.; Larson, R. A wood-gas stove for developing countries. *Energy Sustainable Dev.* 1996, 3, 34–37, DOI: 10.1016/S0973-0826(08)60589-X.
- [5.18] Reed, T. B.; Das, A. *Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine Systems*; SERI/SP-271-3022; Solar Energy Research Institute, U.S. Government Printing Office: Washington DC, 1988; pp 21–47. 138
- [5.19] Anderson, P. S.; Reed, T. B.; Wever, P. W. *Micro-Gasification: What it is and why it works*. *Boiling Point* 2007, 53, 35–37.
- [5.20] Reed, T. B.; Larson, R. A wood-gas stove for developing countries. *Energy Sustainable Dev.* 1996, 3, 34–37, DOI: 10.1016/S0973-0826(08)60589-X.
- [5.21] Panwar, N.L., Rathore, N.S.: Design and performance evaluation of a 5 kW producer gas stove. *Biomass Bioenergy* 33, 1349–1352 (2008).
- [5.22] Kumar, S.S., K. Pitchandi and E. Natarajan, 2008. Modeling and simulation of down draft wood gasifier. *J. Applied Sci.*, 8: 271-279. DOI: 10.3923/jas.2008.271.279.
- [5.23] Belonio A.T., 2005. *Rice husk Gas stove Handbook*. Appropriate Technology Center. Department of Agricultural Engineering and Environmental Management College of Agriculture Central Philippine University Iloilo City, Philippines. Online [http://bioenergylists.org/stovesdoc/Belonio/Belonio\\_gasifier.pdf](http://bioenergylists.org/stovesdoc/Belonio/Belonio_gasifier.pdf).
- [5.24] Ojolo S.J., Abolarin S.M. and Adegbenro O., 2012. Development of a Laboratory Scale Updraft Gasifier. *International Journal of Manufacturing Systems*, 2: 21-42. DOI: 10.3923/ijmsaj.2012.21.42. (Última consulta 22/07/2020)
- [5.25] Panwar N.L., 2009. Design and performance evaluation of energy efficient biomass gasifier based cookstove on multi fuels. *Mitig Adapt Strateg Glob Change* (2009) 14:627–633. DOI 10.1007/s11027-009-9187-4.
- [5.26] N. L. Panwar. Performance Evaluation of Developed Domestic Cook Stove with Jatropha Shell. *Waste Biomass Valor* (2010) 1:309–314. DOI 10.1007/s12649-010-9040-8.
- [5.27] Mukunda HS (1989) *Understanding combustion*. Universities Press (India) Private Limited Publication, Hyderabad. ISBN: 978-8173716850.



[5.28] H. Kumar, N. L. Panwar. Experimental investigation on energy-efficient twin-mode biomass improved cookstove. SN Applied Sciences (2019) 1:760.<https://doi.org/10.1007/s42452-019-0804-x>.

[5.29] Combustion fundamentals.2020. Online:  
<https://www.myodesie.com/wiki/index/returnentry/id/3054> (Última consulta 22/05/2020).



## **Capítulo 6**

### **Resultados y discusiones**



## Capítulo 6: Resultados y discusiones.

### 6.1 Introducción

En este capítulo se presentan los resultados de diferentes pruebas realizadas en las estufas tradicionales y en las mejoradas que se diseñaron. También se comparan los combustibles utilizados habitualmente en RDC (el carbón vegetal) con el combustible alternativo a base de briquetas obtenidas de residuos agrícolas.

En primer lugar se establece una comparación entre la estufa tradicional (TCS-3P) de tres piedras con la del mismo tipo incluyendo una base cerámica (TCS-3P +CB)

Posteriormente se procede al estudio de las dimensiones óptimas de la estufa mejorada con la finalidad de ahorrar combustible. Para ello se fijan unos parámetros constructivos y se estudia la variación del consumo de combustible al modificar otro de los parámetros constructivos.

Ya conocida las dimensiones de la estufa mejorada se analiza la estufa de gasificación, obteniendo, asimismo las dimensiones óptimas de esta.

A partir de aquí se realizan las pruebas de eficiencia energética y de emisiones de las diferentes estufas utilizando combustibles tradicionales. Comparando la tradicional con la mejorada, la tradicional con la de gasificación, y por último la mejorada con la de gasificación.

Finalmente se realizan pruebas comparativas del mismo tipo de estufa de las indicadas anteriormente con un combustible alternativo a base de briquetas obtenidas de residuos agrícolas.

Con estos resultados se hace una estimación del ahorro de combustible y de las reducciones de emisiones de CO<sub>2</sub> en poblaciones como Kinshasa y Bandundu.

### 6.2 Resultados de las mejoras de las estufas TCS-3P y TCS-C.

#### 6.2.1 Comparación de la estufa tradicional (TCS-3P) frente a la tradicional con base cerámica (TCS-3P +CB).

El combustible utilizado en la prueba de WBT y CCT para la estufa TCS-3P, es leña de la especie *Auriculiformis* con un LVH de 19.05MJ/kg y un contenido de humedad del 7%. En la tabla 6.1 se muestran los resultados obtenidos por método WBT.

**Tabla 6.1. Mejora TCS-3P vs TCS-3P+CB por WBT n=3**

| IWA METRICA | Unidades   | TCS-3P       |      |      | TCS-3P+CB    |       |      | % Mejora     |
|-------------|------------|--------------|------|------|--------------|-------|------|--------------|
|             |            | Medio        | SD   | Ue95 | Medio        | SD    | Ue95 |              |
| ET AP       | %          | <b>16.8</b>  | 0.9  | 1.02 | <b>22.7</b>  | 0.25  | 0.28 | <b>35.1</b>  |
| SFC BP      | MJ/(min·L) | <b>0.124</b> | 0    | 0    | <b>0.095</b> | 0.003 | 0    | <b>-23.4</b> |
| AP CO       | g/MJ       | <b>13.9</b>  | 1.5  | 1.7  | <b>12.4</b>  | 0.61  | 0.69 | <b>-10.8</b> |
| BP CO       | g/(min·L)  | <b>0.312</b> | 0.02 | 0.02 | <b>0.269</b> | 0.027 | 0.03 | <b>-13.8</b> |
| AP PM       | mg/MJ      | <b>173.7</b> | 4.5  | 5.09 | <b>120.8</b> | 1.7   | 1.92 | <b>-30.5</b> |
| BP PM       | mg/(min·L) | <b>4.38</b>  | 0.15 | 0.17 | <b>2.49</b>  | 0.19  | 0.22 | <b>-43.2</b> |

SD: desviación estándar , Ue95: Incertidumbre a 95%, SD , ET AP: eficiencia térmica en alta potencia , SFC BP: consumo específico en baja potencia , AP CO: monóxido de carbono en alta potencia BP CO: monóxido de carbono en baja potencia, AP PM: partículas finas en alta potencia, BP PM: partículas finas en baja potencia

Se observa un aumento significativo de la eficiencia energética de los TCS-3P+CB, frente a la que carece de la base CB. Al colocar esta base en el centro de la zona de combustión, se forma una zona muy caliente que facilita la combustión, provocando así un movimiento ascendente de aire caliente hacia la olla. El resultado en una mejora de la eficiencia energética del 35.1% en comparación con el TCS-3P. Asimismo se consigue que las reducción en el consumo de leña sea del 23.4%. Las estufas de cocina de leña se caracterizan por sus altas emisiones de PM, mientras que las emisiones de CO son algo moderadas. Sin embargo, la instalación de CB en el TCS-3P reduce las emisiones de CO en un 10.8% y 13.8% en AP y BP respectivamente. Las reducciones más significativas son de PM resultando del 30.5% y 43.2% respectivamente en AP y BP. La CB presenta una técnica fácil de aplicar por las poblaciones locales en condiciones socioeconómicas muy críticas.

En los estudios de Barbieri J et al [6.1] analizan el impacto energético (rendimiento y emisiones contaminantes) de una placa de acero inoxidable que se coloca en el centro de la estufa TCS-3P. Como resultado de estos estudios se observaron mejoras del 34% y el 15%, respectivamente, en la eficiencia energética y el consumo específico de BP. La reducción de las emisiones fue del 37% y 48% para PM en AP y BP respectivamente y del 9% y 17% para CO en AP y BP. Sin embargo, cabe señalar que una placa de estas características sería una solución más costosa para las poblaciones de los países del África subsahariana que una placa de arcilla CB hecho con material local que es totalmente gratuito y disponible.

En la tabla 6.2 se muestran los resultados por el método CCT de ambas estufas para la preparación de una comida popular de la RDC, que consiste en 1200 g de alubias secas y 1200 g de arroz seco y 650 g de especias y 0.3 litros de aceite, cocinados según las costumbres culinarias locales de Kinshasa.

**Tabla 6.2. Mejora TCS-3P vs TCS-3P+CB por método CCT n=3**

| Indicador         | Unidades           | TCS-3P        |      |      | TCS-3P+CB     |      |      | % Mejora     | p-valor |
|-------------------|--------------------|---------------|------|------|---------------|------|------|--------------|---------|
|                   |                    | Medio         | SD   | Ue95 | Medio         | SD   | Ue95 |              |         |
| Combustible[leña] | [g]                | <b>7361.3</b> | 6.4  | 7.2  | <b>6038.3</b> | 35.1 | 39.7 | <b>-18.0</b> | 0.00015 |
| Comida cocinada   | [kg]               | <b>13.0</b>   | 0.0  | 0.0  | <b>13.0</b>   | 0.1  | 0.1  | <b>0.0</b>   | 1       |
| Tiempo de cocción | [min]              | <b>308.0</b>  | 10.0 | 11.3 | <b>274.0</b>  | 10.0 | 11,3 | <b>-11.0</b> | 0.014   |
| SFC               | [g leña/kg comida] | <b>566.3</b>  | 0.5  | 0.6  | <b>464.5</b>  | 5.3  | 6.0  | <b>-18</b>   | 0.00082 |
| SEC               | [MJ/kg comida]     | <b>10.7</b>   | 0.0  | 0.0  | <b>8.8</b>    | 0.1  | 0.1  | <b>-18</b>   | 0.00082 |

Fuente : Elaboración propia

Por lo tanto, la CB es una técnica simple, pero afecta significativamente a la eficiencia energética de la TCS-3P y al consumo de leña, disminuyendo en un 18%. Según el comentario de los cocineros, la impresión es que el fuego es más potente con la CB que sin ella. La llama es más firme y está más orientada cuando se inserta la placa de arcilla, al crearse una zona muy caliente en el centro de la cámara de combustión que favorece un movimiento ascendente del flujo de aire hacia la olla, por lo tanto, una mejor transmisión de calor. Se trata de prácticas sencillas que pueden ser realizadas por las comunidades locales a bajo costo (incluso gratuita) pero que tienen un importante impacto en el ahorro de combustible y la reducción de las emisiones contaminantes.

### 6.2.2 Mejora sobre la TCS-C basada en CP.

Otra mejora significativa en el ahorro de combustible es la disposición de placas cerámicas alrededor de la estufa tradicional, según se indicó en el epígrafe 5.2.4. En las tablas 6.3 y 6.4 se recogen los resultados comparativos de la estufa tradicional TCS-C y de la misma con las placas cerámicas TCS-C+CP. Como en el caso anterior se han realizado las pruebas por el método WBT (en la tabla 6.3) y por el CCT (en la tabla 6.4) preparando el mismo tipo de alimento que el indicado en el apartado 6.2.1.

**Tabla 6.3 Mejora TCS-C vs TCS-C+CP por WBT n=3**

| IWA METRICA | Unidades   | TCS-C       |       |      | TCS-C +CP   |       |      | % Mejora     |
|-------------|------------|-------------|-------|------|-------------|-------|------|--------------|
|             |            | Medio       | SD    | Ue95 | Medio       | SD    | Ue95 |              |
| ET AP       | %          | <b>22.5</b> | 0.86  | 0.97 | <b>29.8</b> | 2     | 2.39 | <b>32.4</b>  |
| SFC BP      | MJ/(min·L) | <b>34.1</b> | 0.012 | 0.01 | <b>27.7</b> | 1.05  | 1.19 | <b>-18.7</b> |
| AP CO       | g/MJ       | <b>11.7</b> | 0.045 | 0.05 | <b>9.92</b> | 1.34  | 1.52 | <b>-15.2</b> |
| BP CO       | g/(min·L)  | <b>0.28</b> | 0.017 | 0.02 | <b>0.24</b> | 0.098 | 0.11 | <b>-14.2</b> |
| AP PM       | mg/MJ      | <b>88</b>   | 3     | 3.25 | <b>80.4</b> | 3     | 3.51 | <b>-8.5</b>  |
| BP PM       | mg/(min·L) | <b>1.38</b> | 0.18  | 0.20 | <b>1.21</b> | 0.14  | 0.16 | <b>-12.3</b> |

SD: desviación estándar, Ue95: Incertidumbre a 95%, ET AP :eficiencia térmica en alta potencia, BP SFC BP: consumo específico en baja potencia, AP CO: monóxido de carbono en alta potencia BP CO: monóxido de carbono en baja potencia, AP PM: partículas finas en alta potencia, BP PM: partículas finas en baja potencia

**Tabla 6.4. Mejora entre TCS-C y TCS-C+CP por método CCT n=3**

| Medida                  | TCS-C |      | TCS-C + CPs |       | p-valor  | Mejora[%] |
|-------------------------|-------|------|-------------|-------|----------|-----------|
|                         | Medio | SD   | Medio       | SD    |          |           |
| Combustible [g]         | 2030  | 144  | 1482        | 151.7 | <0.001** | -27       |
| Tiempo de cocción [min] | 291.6 | 18   | 257.9       | 13.4  | <0.001** | -11.6     |
| Comida cocinada [Kg]    | 9.6   | 0.4  | 9.5         | 0.3   | 0.026*   | -0.96     |
| SFC[g/Kg]               | 210   | 21.3 | 156         | 12.5  | <0.001** | -25.7     |

[%] SD: desviación estándar , p:p-value(índice probabilidad ),\*significativo a 95% \*\* significativo a 99%

Se constata que la utilización de CP en las paredes laterales de un TCS-C consigue aumentar la eficiencia energética en un 32 %, obtenido por el método WBT y la reducción en el consumo de combustibles es del 27%, obtenido por el método CCT. Asimismo, las emisiones se reducen de forma significativa. Todo ello es debido a que las CP crean una zona muy caliente alrededor de la cámara de combustión de la estufa y así canalizan el flujo de calor a la olla. En el caso de una estufa tradicional este flujo de calor no se dispersa por los laterales.

### 6.3 Resultados de la optimización de la estufa mejorada ICS-C.

Las dimensiones que se deben obtener de la estufa son: altura (Hcc) y diámetro (Dcc) de la cámara de combustión, altura de los soportes de la olla (Hso) y espesor del aislamiento térmico (Eis). La metodología empleada ha sido fijar tres de los parámetros e ir modificando el cuarto para determinar la dimensión con la que se tiene el máximo rendimiento energético por los procedimientos WBT y CCT. Los diferentes parámetros analizados durante las pruebas WBT fueron la eficiencia térmica (ET) y el consumo específico de combustible (SFC) de la estufa en las tres fases, arranque en frío, arranque en caliente y baja potencia. Combinando los parámetros y las fases+ quedan las siguientes mediciones:

- ET APF. Eficiencia térmica en arranque en frío de alta potencia
- ET APC. Eficiencia térmica en arranque en caliente de alta potencia
- ET BP. Eficiencia térmica en baja potencia
- SFC APF. Consumo específico de combustible en arranque en frío de alta potencia
- SFC APC. Consumo específico de combustible en arranque en caliente de alta potencia
- SFC BP. Consumo específico de combustible a baja potencia.

El parámetro analizado para la prueba CCT fue el consumo de combustible necesario para la preparación de los alimentos locales PO y MA, que son comidas populares de la ciudad de Kinshasa cuyos ingredientes se describen en la tabla 6.5.

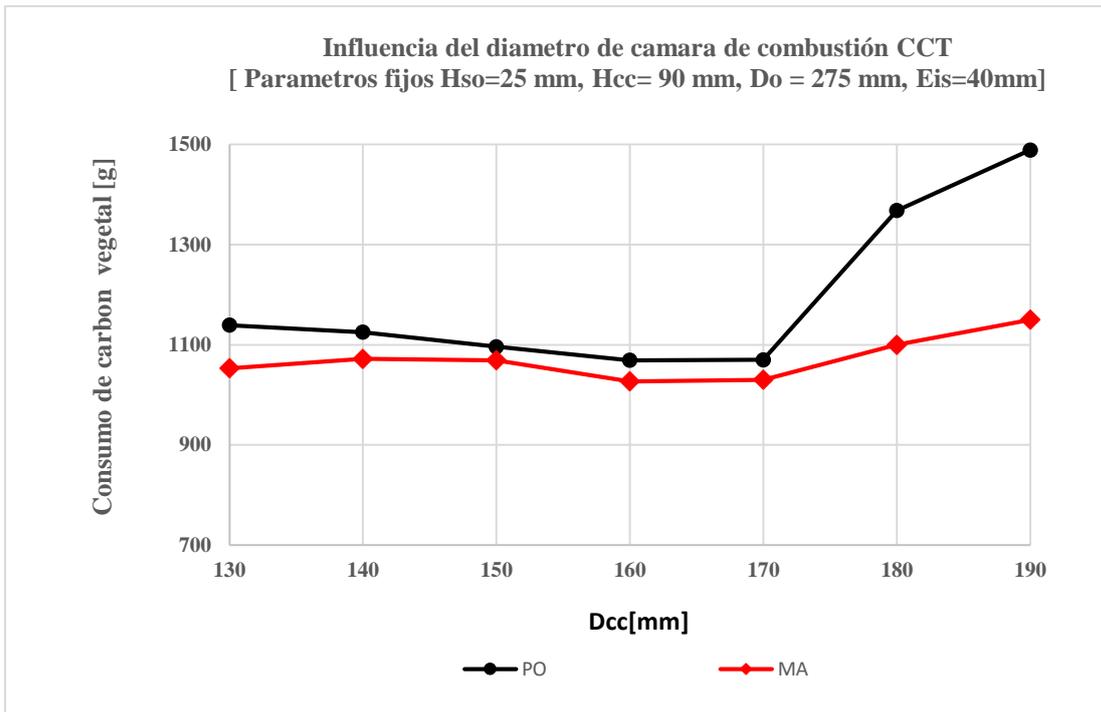
**Tabla 6.5 Descripción de la comida seca de las pruebas de CCT.**

| MA  |              | PO                        |              |
|---|--------------|---------------------------|--------------|
| Comida seca                               | Cantidad [g] | Comida seca               | Cantidad [g] |
| Alubia                                    | 1200         | Hojas de yuca             | 2000         |
| Arroz                                     | 1150         | Pasta de cacahuete        | 300          |
| Ingredientes: sal, moscada, ajo, pimiento | 650          | berenjenas                | 300          |
| Aceite de oliva                           | 0,3litro     | Pescados                  | 1300         |
|   |              | Harina de maíz y mandioca | 1700         |
|   |              | Ingredientes              | 300          |
|   |              | Aceite de palma           | 0,4 litro    |

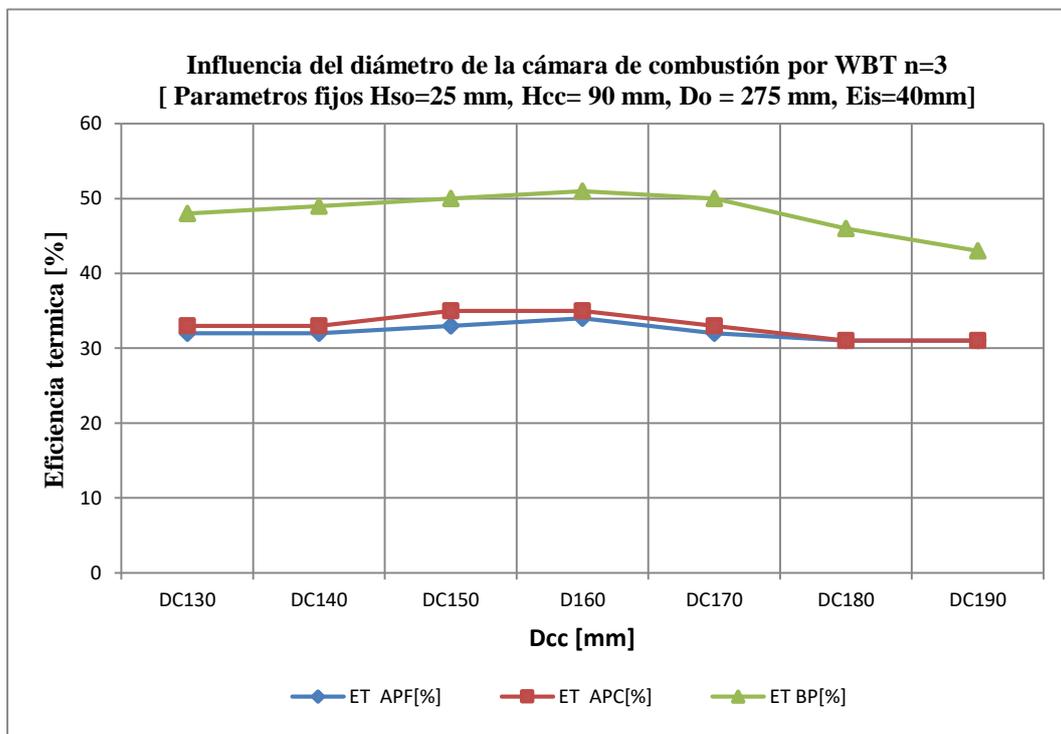
### 6.3.1. Optimización del diámetro de la cámara de combustión.

El diámetro de la cámara de combustión está ligado al de las ollas que se utilizan en la preparación de alimentos. Por tanto, lo primero que se debe de hacer es conocer el tamaño de las ollas utilizadas en la población de estudio (Kinshasa). A través de un estudio estadístico se llegó a que el diámetro medio de la olla es de 275 mm.

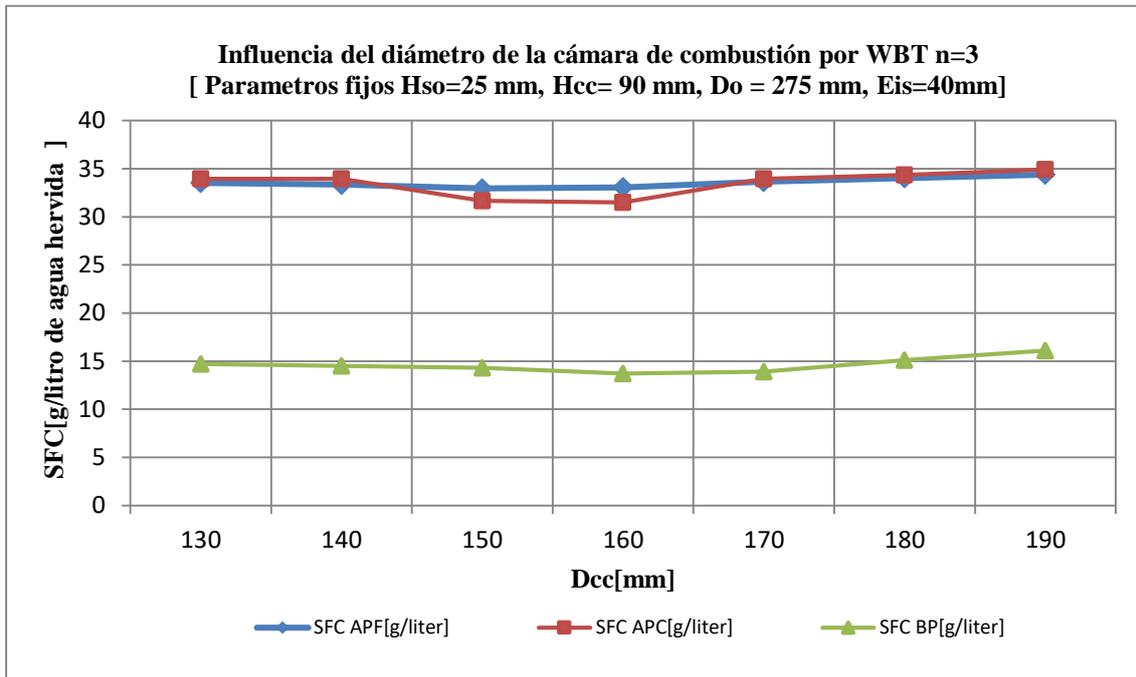
Si el diámetro de la cámara de combustión es mucho más reducido que de la olla, el volumen de la cámara es pequeño, la potencia del fuego es baja, lo que requerirá mucho tiempo para cocinar y se necesitará una cantidad muy elevada de combustible. En cambio, si la cámara de combustión es de diámetro elevado, hay muchas pérdidas de calor entre la cámara y la olla lo que conduce a la disminución del rendimiento. Se realizaron pruebas con diámetros comprendidos entre 130 y 190 mm variando de 10 en 10 mm, los resultados se reflejan en las figuras 6.1, 6.2 y 6.3.



**Fig. 6.1** Dependencia de la eficiencia térmica con el diámetro de la cámara de combustión por el método CCT.



**Fig.6.2** Dependencia de la eficiencia térmica con el diámetro de la cámara de combustión por el método WBT.



**Fig.6.3. Dependencia del consumo específico de combustible con el diámetro de la cámara de combustión por el método WBT.**

Los resultados de las figuras 6.1, 6.2 y 6.3 muestran que, aunque las variaciones son leves, se observa que para el mismo tamaño de la olla, el consumo específico de combustible es elevado para diámetros de 180 – 190 mm y se reduce para 160 - 170. A medida que el diámetro disminuye más, la potencia de fuego disminuye para el mismo tamaño de la olla, lo que aumenta aún más el consumo. La eficiencia térmica por WBT resulta más elevada con las medidas indicadas y el consumo de carbón por el método CCT también se observa que aumenta de forma importante a partir del diámetro de 170 mm, así pues, consideramos que el valor óptimo sería de 160 mm.

### 6.3.2. Optimización de la altura de los soportes-olla.

La altura Hso de soporte de la olla influye de forma muy importante en el rendimiento de la estufa. Si esta altura es pequeña, dará lugar a la extinción del fuego, y si es muy elevada determinará unas pérdidas por flujo lateral que serán importantes. El estudio experimental se ha realizado con valores comprendidos entre 1 y 5 cm, que se muestran en las figuras 6.4, 6.5 y 6.6.

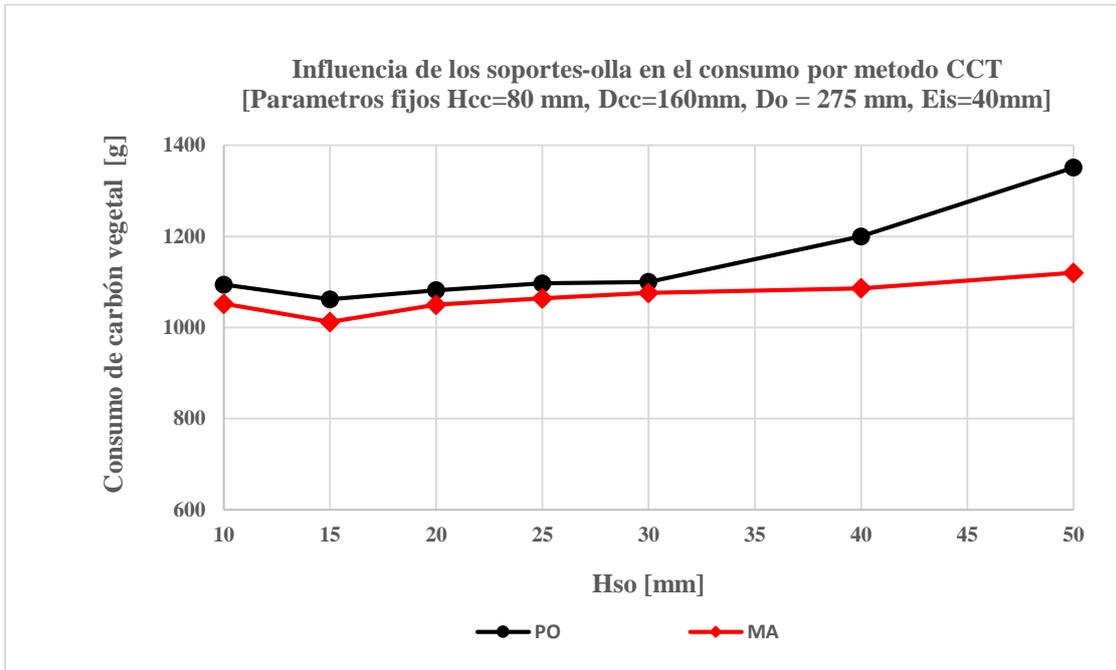


Fig.6.4. Dependencia de la eficiencia térmica con la altura de los soportes de la olla por el método CCT.

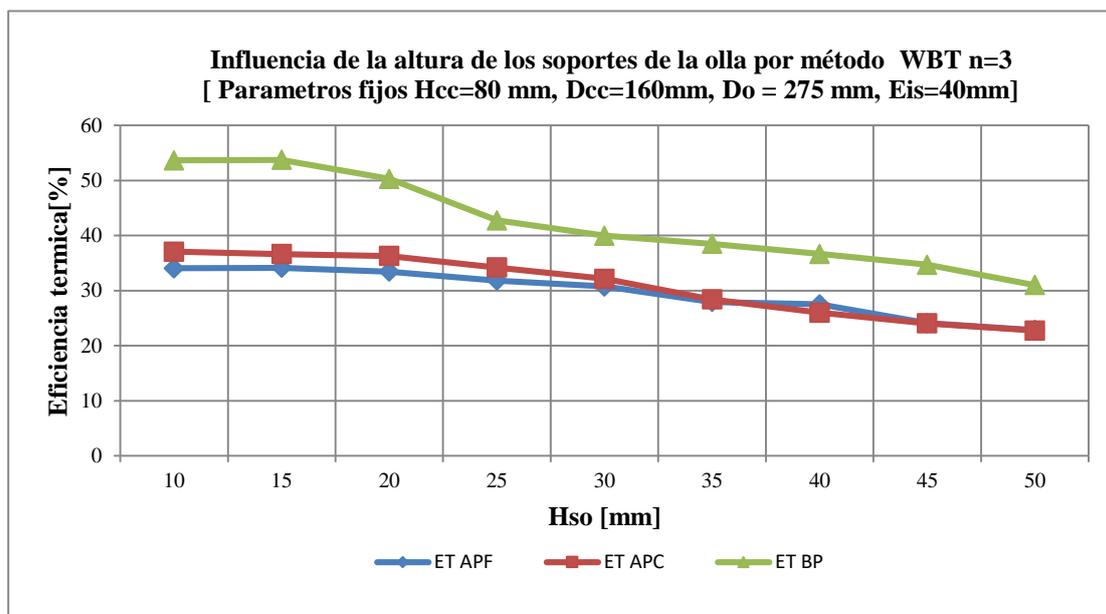
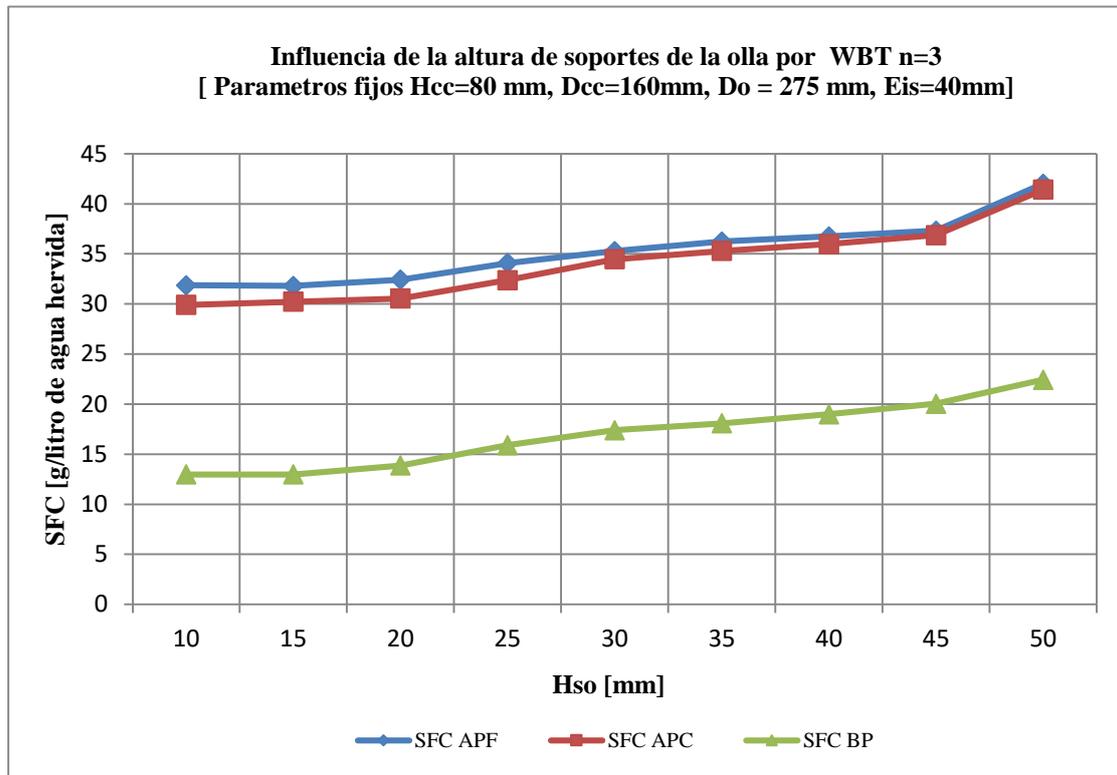


Fig.6.5. Dependencia de la eficiencia térmica con la altura de los soportes de la olla por el método WBT.

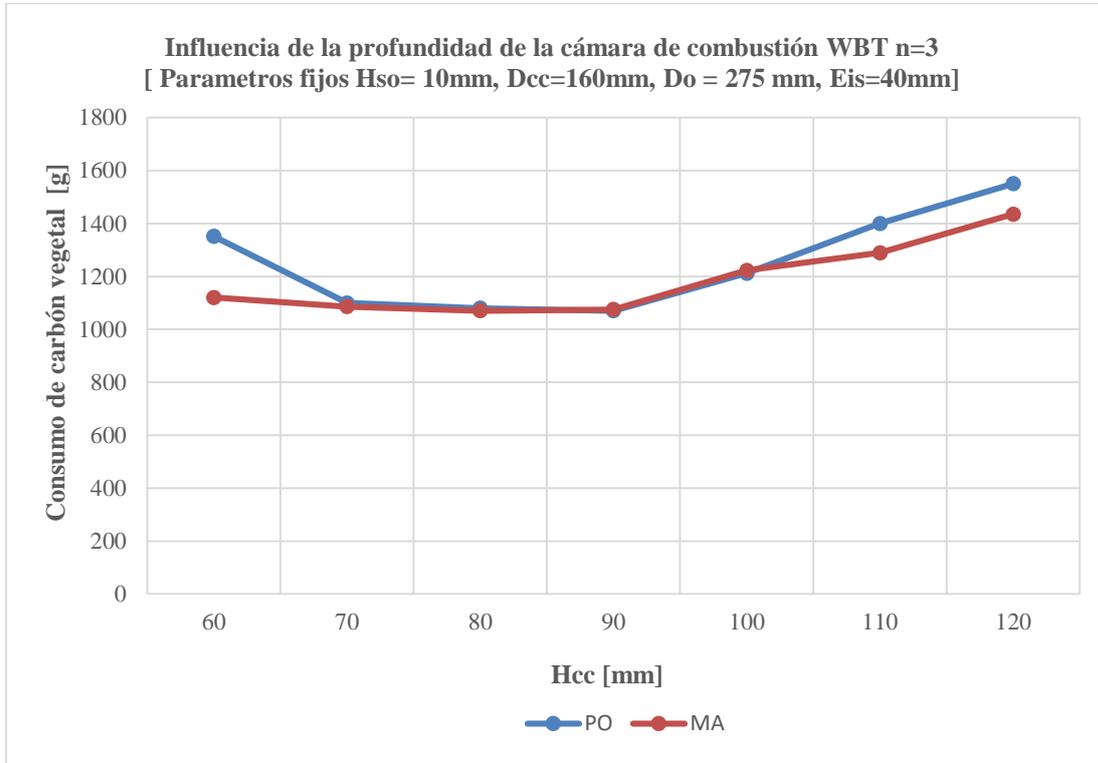


**Fig.6.6. Dependencia del consumo específico de combustible con la altura de los soportes de la olla por el método WBT.**

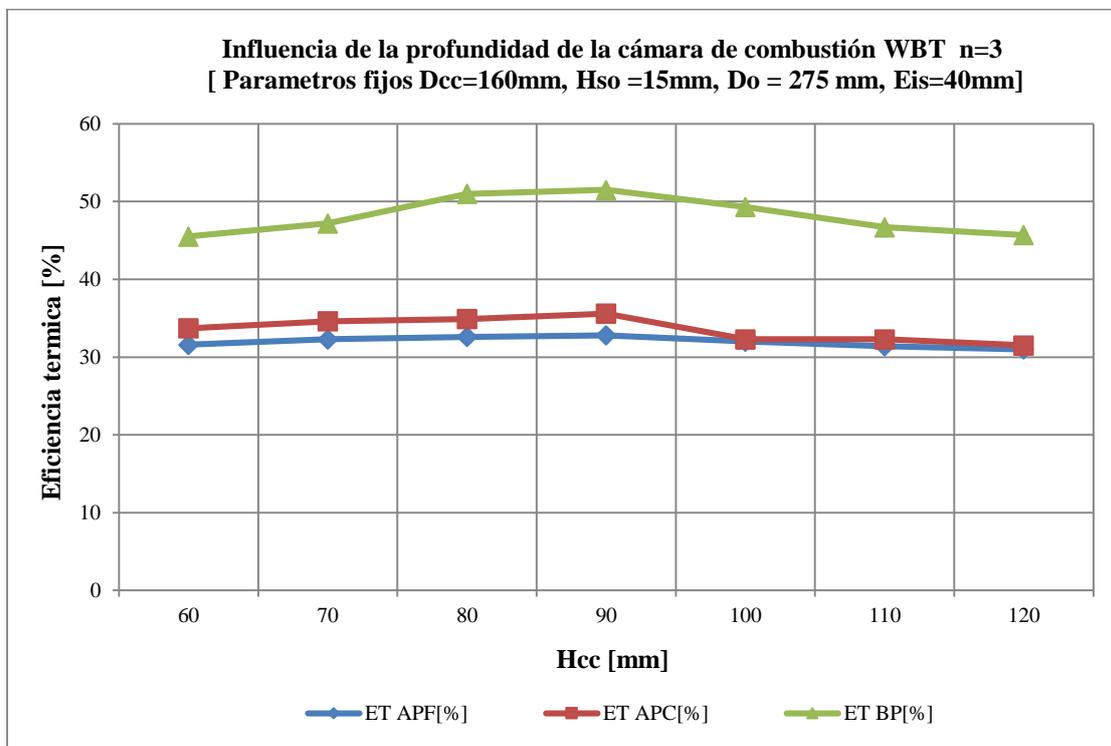
Los resultados de las figuras 6.4, 6.5 y 6.6 muestran que, cuanto más elevados sean los soportes de la olla, hay menor transmisión de calor por cualquiera de los métodos empleados. La mejor transmisión se obtiene para un Hso muy reducido (10 y 15 mm), por lo que la elección de la Hso se basa en estos valores límites. Se adopta el valor de Hso de 10mm.

### 6.3.3. Profundidad de la cámara de combustión.

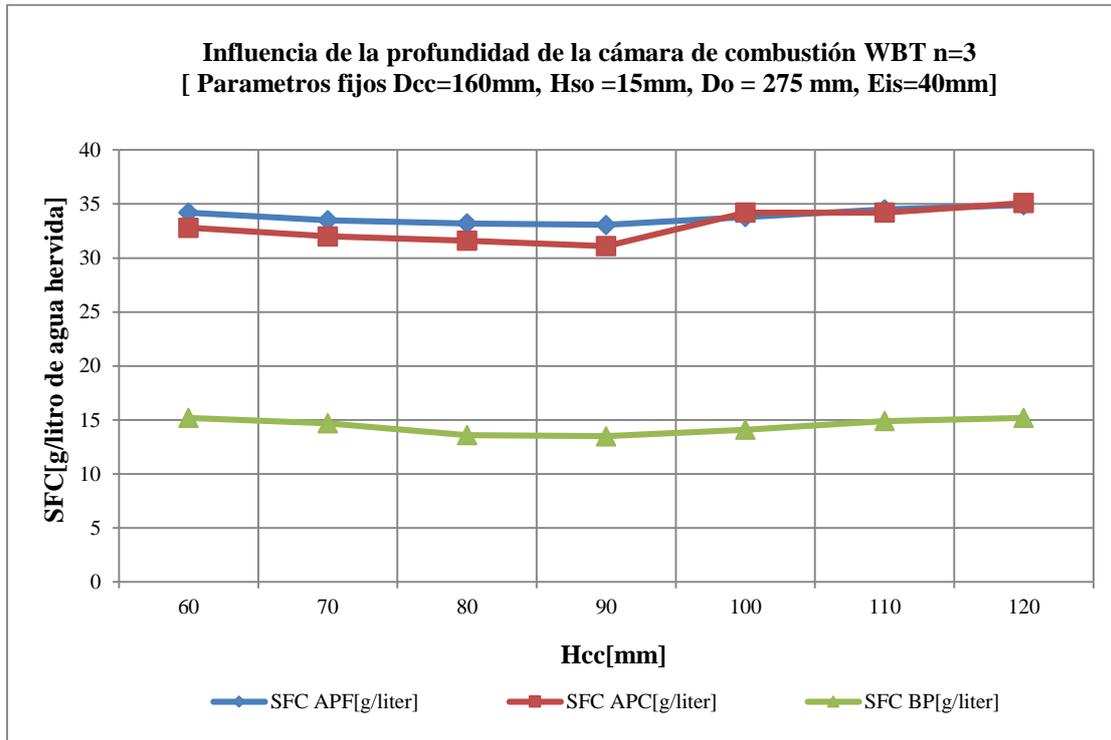
La profundidad de la cámara de combustión afecta en gran medida a la potencia del fuego, por lo tanto a la eficiencia de la estufa y al tiempo de cocción. Un primer análisis lleva a la conclusión de que, una profundidad elevada de la cámara de combustión tendrá como efecto directo el aumento significativo de la potencia del fuego, un gran volumen de llenado de combustión y un tiempo de cocción reducido. Por tanto, puede afectar en gran medida el rendimiento de la estufa y por lo tanto el consumo de combustible. Si la profundidad es reducida, puede significar una pequeña potencia del fuego, por lo tanto, un aumento en el tiempo de cocción. Se debe buscar la profundidad óptima de esta cámara de combustión, que optimiza el rendimiento de la estufa, y minimiza el tiempo de cocción para que el consumo de combustible sea lo más bajo posible.



**Fig.6.7 Dependencia de la eficiencia térmica con la profundidad de la cámara de combustión por el método CCT.**



**Fig.6.8 Dependencia de la eficiencia térmica con la profundidad de la cámara de combustión por el método WBT.**



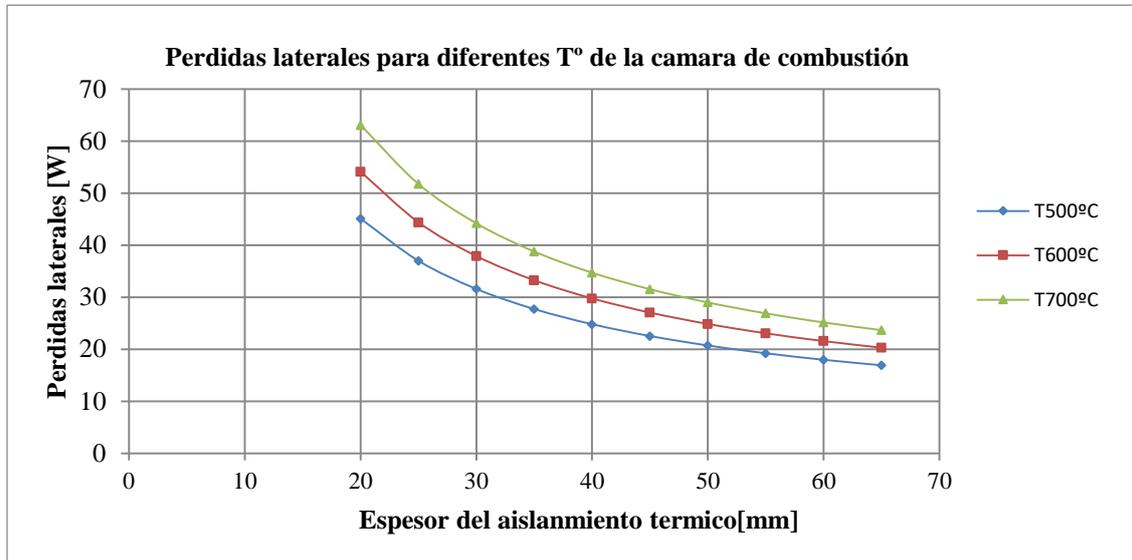
**Fig.6.9. Dependencia del consumo específico de combustible con la profundidad de la cámara de combustión por el método WBT.**

Los resultados de la variación de la profundidad de la cámara se muestran en las figuras 6.7, 6.8 y 6.9 por los métodos CCT y WBT. El consumo específico de combustible se mantiene en valores casi constantes para las diferentes pruebas. Con un muy ligero aumento para valores de 100, 110 y 120. De hecho, Hcc tendría un impacto en el aspecto funcional de la estufa, cuanto más elevada sea esta altura más tiempo de uso o funcionamiento hasta la próxima recarga de combustible. Los valores 80 y 90 mm son los óptimos para mantener los mismos hábitos de funcionamiento entre los usuarios, a la vez que se observa que la eficiencia térmica es algo más elevada para esta altura. Se adopta, por tanto, el valor de 80 mm para la construcción final de la estufa.

#### 6.3.4. Minimización de las pérdidas laterales.

Se ha realizado un análisis analítico de las pérdidas laterales considerando que son por transmisión de calor a través del aislamiento térmico, que tiene forma cilíndrica y se evalúan por la ecuación 6.1.

$$P_{lateral} = \frac{2\pi l \lambda \Delta T}{\ln \frac{R}{r}} \quad (W) \quad (6.1)$$



**Fig.6.10. Pérdidas laterales en función del espesor del aislamiento térmico.**

La figura 6.10 muestra que a medida que el espesor del aislamiento térmico aumenta, las pérdidas disminuyen. Sin embargo, un alto espesor de aislamiento significa un precio muy alto para la estufa. Se observa que un aumento de espesor entre 20 mm y 40 mm reduce las pérdidas en un 45%, mientras que de 40 a 60 mm, la reducción es de un 25%. Se toma una solución de compromiso con un grosor del aislamiento térmico de 40 mm espesor.

Las dimensiones finales importantes del ICS-C desarrollado son, por tanto, las siguientes: Dcc = 160 mm, Hcc = 80 mm, Hso = 10 mm y Eis = 40 mm espesor.

#### 6.4. Comparación de las diferentes estufas de cocción en respecto con la referencia tradicional.

##### 6.4.1 Resultados de las mejoras entre TCS-C y ICS-C.

Una vez diseñada la nueva estufa ICS-C se procede a realizar pruebas con ella, comparándola con la tradicional y analizando los resultados de eficiencia energética y ahorro de combustibles. Los combustibles utilizados son el carbón vegetal y las briquetas BSW3, y los ensayos se han realizado tanto por el método WBT como por el CCT.

6.4.1.1. Resultados de Comparación entre TCS-C y ICS-C por método WBT.

Tabla 6.6. Resultados de las pruebas por el método WBT utilizando como combustible carbón vegetal.

| IWA METRICAS | Unidad     | TCS-C    |       | ICS-C    |       | TCS-C vs ICS-C |
|--------------|------------|----------|-------|----------|-------|----------------|
|              |            | Promedio | SD    | Promedio | SD    | %              |
| ET AP        | %          | 22,5     | 0,6   | 34,1     | 2,14  | 51,6           |
| SFC BP       | kJ/(min·L) | 38,1     | 0,003 | 26,2     | 0,003 | -31,2          |
| AP CO        | g/MJ       | 11,7     | 0,076 | 8,1      | 0,4   | -30,8          |
| BP CO        | g/(min·L)  | 0,28     | 0,012 | 0,2      | 0,009 | -28,6          |
| AP PM        | mg/MJ      | 88       | 3,4   | 63,1     | 2,3   | -28,3          |
| BP PM        | mg/(min·L) | 1,38     | 0,16  | 1,13     | 0,1   | -18,1          |

SD: Desviación estándar, ET AP :eficiencia térmica en alta potencia, SFC BP: consumo específico en baja potencia, AP CO: monóxido de carbono en alta potencia BP CO: monóxido de carbono en baja potencia, AP PM: partículas finas en alta potencia, BP PM: partículas finas en baja potencia

Tabla 6.7. Resultados de las pruebas por el método WBT utilizando como combustible BSW3.

| IWA METRICAS | Unidad     | TCS-C    |       | ICS-C    |       | TCS-C vs ICS-C |
|--------------|------------|----------|-------|----------|-------|----------------|
|              |            | Promedio | SD    | Promedio | SD    | %              |
| ET AP        | %          | 22       | 0,6   | 34       | 2,14  | 54,5           |
| SFC BP       | kJ/(min·L) | 34       | 0,003 | 26,2     | 0,003 | -22,9          |
| AP CO        | g/MJ       | 12       | 0,076 | 8,1      | 0,4   | -32,5          |
| BP CO        | g/(min·L)  | 0,29     | 0,012 | 0,2      | 0,009 | -31,0          |
| AP PM        | mg/MJ      | 84       | 3,4   | 61       | 2,3   | -27,4          |
| BP PM        | mg/(min·L) | 1,24     | 0,16  | 0,98     | 0,1   | -21,0          |

SD: Desviación estándar, ET AP :eficiencia térmica en alta potencia, SFC BP: consumo específico en baja potencia, AP CO: monóxido de carbono en alta potencia BP CO: monóxido de carbono en baja potencia, AP PM: partículas finas en alta potencia, BP PM: partículas finas en baja potencia

**6.4.1.2. Resultados de Comparación entre TCS-C y ICS-C por método CCT.**

**Tabla 6.8. Resultados de las pruebas por método CCT utilizando como combustible carbón vegetal.**

| Indicador                                   | TCS-C    |       | ICS-C    |     | TCS-C vs ICS-C |
|---|----------|-------|----------|-----|----------------|
|   | Promedio | SD    | Promedio | SD  | [%]            |
| combustible [g]                             | 2063,5   | 118.9 | 1235,0   | 82  | -40,2          |
| Tiempo de cocción [min]                     | 251,7    | 16.   | 234,0    | 11  | -7,0           |
| Comida cocinada [kg]                        | 6,6      | 0.06  | 6,6      | 0,9 | 0,0            |
| SFC [g carbón vegetal / kg comida cocinada] | 312,8    | 16.5  | 187,1    | 13  | -40,2          |
| SEC[MJ/kg comida cocinada]                  | 9,3      | 0.5   | 5,6      | 0,4 | -40,2          |

SFC: Consumo específico de combustible, SEC: Consumo específico de energía, SD: Desviación estándar.

**Tabla 6.9. Resultados de las pruebas por método CCT utilizando como combustible BSW3.**

| Indicador                       | TCS-C    |       | ICS-C    |      | TCS-C vs ICS-C |
|---------------------------------|----------|-------|----------|------|----------------|
|                                 | Promedio | SD    | Promedio | SD   | [%]            |
| combustible [g]                 | 3327     | 210.2 | 1978,0   | 85,7 | -40,6          |
| Tiempo de cocción [min]         | 266      | 7.2   | 246,0    | 12,4 | 7,5            |
| Comida cocinada [kg]            | 6,6      | 0.1   | 6,5      | 0.1  | 1,0            |
| SFC [g BWS3/kg comida cocinada] | 506,6    | 27    | 304,3    | 12,7 | -39,9          |
| SEC[MJ/kg comida cocinada]      | 9,3      | 0.5   | 5,6      | 0,3  | -39,9          |

SFC: Consumo específico de combustible, SEC: Consumo específico de energía, SD: Desviación estándar.

En las tablas 6.6 y 6.7 se observan aumentos importantes en la eficiencia térmica lo que determina una reducción en el consumo específico de combustible. Las emisiones contaminantes también se reducen de forma importante

Las tablas 6.8 y 6.9 muestran los resultados de las pruebas de CCT realizadas en la preparación de la comida típica congoleñas. La tabla 6.8 hace la comparación entre las estufas ICS-C y TCS-C usando carbón vegetal como combustible. Se observa ahorros de combustible que corroboran las mediciones obtenidas por el método BWT, así como reducciones importantes en el tiempo de cocción.

### 6.4.2 Resultados de las mejoras entre TCS-C y ICS-G1.

Se realizaron pruebas comparativas con la estufa tradicional y la de gasificación. Como en los casos anteriores, estas pruebas se realizaron por los dos métodos WBT y CCT utilizando como combustible el carbón vegetal y las briquetas.

#### 6.4.2.1. Resultados de comparación entre TCS y ICS-G1 por método WBT.

**Tabla 6.10 Resultados de las pruebas por el método WBT utilizando como combustible carbón vegetal.**

| IWA METRICAS | Unidad     | TCS-C    |       | ICS-G1   |      | TCS vs ICS-G |
|--------------|------------|----------|-------|----------|------|--------------|
|              |            | Promedio | SD    | Promedio | SD   |              |
| ET AP        | %          | 22,5     | 0,6   | 51,6     | 1,5  | 129,3        |
| SFC BP       | kJ/(min·L) | 38,1     | 0,003 | 19,4     | 4    | -49,1        |
| AP CO        | g/MJ       | 11,7     | 0,076 | 5,1      | 0,2  | -56,4        |
| BP CO        | g/(min·L)  | 0,28     | 0,012 | 0,08     | 0,05 | -71,4        |
| AP PM        | mg/MJ      | 88       | 3,4   | 38,1     | 2,4  | -56,7        |
| BP PM        | mg/(min·L) | 1,38     | 0,16  | 1,02     | 0,2  | -26,1        |

SD: Desviación estándar , ET AP :eficiencia térmica en alta potencia , SFC BP: consumo específico en baja potencia , AP CO: monóxido de carbono en alta potencia BP CO: monóxido de carbono en baja potencia. AP PM: partículas finas en alta potencia, BP PM: partículas finas en baja potencia

**Tabla 6.11. Resultados de las pruebas por el método WBT utilizando como combustible BSW3.**

| IWA METRICAS | Unidad     | TCS-C    |       | ICS-G1   |      | % ICS-G vs TCS |
|--------------|------------|----------|-------|----------|------|----------------|
|              |            | Promedio | SD    | Promedio | SD   |                |
| ET AP        | %          | 22       | 0,6   | 55,1     | 0.03 | 150,5          |
| SFC BP       | kJ/(min·L) | 34       | 0,003 | 11,4     | 1.4  | -66,5          |
| AP CO        | g/MJ       | 12       | 0,076 | 6,9      | 0.4  | -42,5          |
| BP CO        | g/(min·L)  | 0,29     | 0,012 | 0,09     | 0.01 | -69,0          |
| AP PM        | mg/MJ      | 84       | 3,4   | 13,5     | 3.1  | -83,9          |
| BP PM        | mg/(min·L) | 1,24     | 0,16  | 0,09     | 0.02 | -92,7          |

SD: Desviación estándar , ET AP :eficiencia térmica en alta potencia , SFC BP: consumo específico en baja potencia , AP CO: monóxido de carbono en alta potencia BP CO: monóxido de carbono en baja potencia. AP PM: partículas finas en alta potencia, BP PM: partículas finas en baja potencia

#### 6.4.2.2. Resultados de Comparación entre TCS-C y ICS-G1 por método CCT.

**Tabla 6.12. Resultados de las pruebas por el método CCT utilizando como combustible carbón vegetal.**

| Indicador                                   | TCS-C  |       | ICS-G1 |      | TCS vs ICS-G[%] |
|---|--------|-------|--------|------|-----------------|
|   | Medio  | SD    | Medio  | SD   |                 |
| combustible [g]                             | 2063.5 | 118.9 | 805.5  | 79.6 | -61             |
| Tiempo de cocción [min]                     | 251.7  | 16.   | 220.7  | 10.2 | -12.3           |
| Comida cocinada [kg]                        | 6.6    | 0.06  | 6.6    | 0.9  | 0.0             |
| SFC [g carbón vegetal / kg comida cocinada] | 312.8  | 16.5  | 122.8  | 11.2 | -60.8           |
| SEC[MJ/kg comida cocinada]                  | 9.3    | 0.5   | 3.7    | 0.3  | -60.8           |

SFC: Consumo específico de combustible, SEC: Consumo específico de energía, SD: Desviación estándar.

**Tabla 6.13. Resultados de las pruebas por el método CCT utilizando como combustible briquetas BSW3.**

| Indicador                       | TCS-C    |       | ICS-G1   |      | TCS vs ICS-G1[%] |
|---------------------------------|----------|-------|----------|------|------------------|
|                                 | Promedio | SD    | Promedio | SD   |                  |
| Combustible [g]                 | 3327     | 210.2 | 1270,3   | 95.2 | -61,8            |
| Tiempo de cocción [min]         | 266      | 7.2   | 217,8    | 10.9 | -18,1            |
| Comida cocinada [kg]            | 6,6      | 0.1   | 6,5      | 0.1  | -1,5             |
| SFC [g BWS3/kg comida cocinada] | 506,6    | 27    | 194      | 13.0 | -61,7            |
| SEC[MJ/kg comida cocinada]      | 9,3      | 0.5   | 3,5      | 0.2  | -61,7            |

SFC: Consumo específico de combustible, SEC: Consumo específico de energía, SD: Desviación estándar.

Las tablas 6.10 y 6.11 demuestran una clara mejora en la eficiencia térmica de la estufa de gasificación ICS-G1 en comparación con el tradicional TCS-C. También se reducen las emisiones nocivas para la salud. Al cocinar una comida real, como se observa en las tablas 6.12 y 6.13, el consumo específico es claramente menor para un ICS-G1 que para el modelo tradicional.

### 6.4.3. Resultados de las mejoras entre ICS-C y ICS-G1.

#### 6.4.3.1. Resultados de Comparación entre ICS-C y ICS-G1 por método WBT.

Tabla 6.14. Resultados de las pruebas por el método WBT utilizando como combustible carbón vegetal.

| IWA METRICAS | Unidad     | ICS-C    |       | ICS-G1   |      | TCS vs ICS-G |
|--------------|------------|----------|-------|----------|------|--------------|
|              |            | Promedio | SD    | Promedio | SD   |              |
| ET AP        | %          | 34,1     | 2,14  | 51,6     | 1,5  | 51,3         |
| SFC BP       | kJ/(min·L) | 26,2     | 0,003 | 19,4     | 4    | -26,0        |
| AP CO        | g/MJ       | 8,1      | 0,4   | 5,1      | 0,2  | -37,0        |
| BP CO        | g/(min·L)  | 0,2      | 0,009 | 0,08     | 0,05 | -60,0        |
| AP PM        | mg/MJ      | 63,1     | 2,3   | 38,1     | 2,4  | -39,6        |
| BP PM        | mg/(min·L) | 1,13     | 0,1   | 1,02     | 0,2  | -9,7         |

SD: Desviación estándar , ET AP :eficiencia térmica en alta potencia , SFC BP: consumo específico en baja potencia , AP CO: monóxido de carbono en alta potencia BP CO: monóxido de carbono en baja potencia, AP PM: partículas finas en alta potencia, BP PM: partículas finas en baja potencia

Tabla 6.15. Resultados de las pruebas por el método WBT utilizando como combustible briquetas BSW3.

| IWA METRICAS | Unidad     | ICS-C    |       | ICS-G1   |      | % ICS-C vs ICS-G1 |
|--------------|------------|----------|-------|----------|------|-------------------|
|              |            | Promedio | SD    | Promedio | SD   |                   |
| ET AP        | %          | 34       | 2,14  | 55,1     | 0,03 | 62,1              |
| SFC BP       | kJ/(min·L) | 26,2     | 0,003 | 11,4     | 1,4  | -56,5             |
| AP CO        | g/MJ       | 8,1      | 0,4   | 6,9      | 0,4  | -14,8             |
| BP CO        | g/(min·L)  | 0,2      | 0,009 | 0,09     | 0,01 | -55,0             |
| AP PM        | mg/MJ      | 61       | 2,3   | 13,5     | 3,1  | -77,9             |
| BP PM        | mg/(min·L) | 0,98     | 0,1   | 0,09     | 0,02 | -90,8             |

SD: Desviación estándar , ET AP :eficiencia térmica en alta potencia , SFC BP: consumo específico en baja potencia , AP CO: monóxido de carbono en alta potencia BP CO: monóxido de carbono en baja potencia, AP PM: partículas finas en alta potencia, BP PM: partículas finas en baja potencia

6.4.3.2. Resultados de Comparación entre ICS-C y ICS-G1 por método CCT.

Tabla 6.16. Resultados de las pruebas por el método CCT utilizando como combustible carbón vegetal.

| Indicador                                   | ICS-C |     | ICS-G1 |      | ICS-C vs ICS-G1 [%] |
|---|-------|-----|--------|------|---------------------|
|   | Medio | SD  | Medio  | SD   |                     |
| combustible [g]                             | 1235  | 82  | 805,5  | 79.6 | -34,8               |
| Tiempo de cocción [min]                     | 234   | 11  | 220,7  | 10.2 | -6                  |
| Comida cocinada [kg]                        | 6,6   | 0,9 | 6,6    | 0.9  | 0,0                 |
| SFC [g carbón vegetal / kg comida cocinada] | 187,1 | 13  | 122,8  | 11.2 | -34,4               |
| SEC[MJ/kg comida cocinada]                  | 5,6   | 0,4 | 3,7    | 0.3  | -33,9               |

SFC: Consumo específico de combustible, SEC: Consumo específico de energía, SD: Desviación estándar.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6.17. Resultados de las pruebas por el método CCT utilizando como combustible briquetas BSW3.

| Indicador                       | ICS-C    |      | ICS-G1   |      | ICS-C vs ICS-G1 [%] |
|---------------------------------|----------|------|----------|------|---------------------|
|                                 | Promedio | SD   | Promedio | SD   |                     |
| combustible [g]                 | 1978     | 85,7 | 1270,3   | 95.2 | -35,7               |
| Tiempo de cocción [min]         | 246      | 12,4 | 217,8    | 10.9 | -11,4               |
| Comida cocinada [kg]            | 6,5      | 0.1  | 6,5      | 0.1  | 0                   |
| SFC [g BWS3/kg comida cocinada] | 304,3    | 12,7 | 194      | 13.0 | -36,2               |
| SEC[MJ/kg comida cocinada]      | 5,6      | 0,3  | 3,5      | 0.2  | -37,5               |

SFC: Consumo específico de combustible, SEC: Consumo específico de energía, SD: Desviación estándar.

Fuente: Elaboración propia

Se observa de los resultados obtenidos que los aumentos de eficiencia térmica son más elevados con este tipo de estufa (ICS-G1) así como resultan más significativas las reducciones de contaminantes.

#### 6.4.4. Síntesis de las mejoras de las estufas por método WBT.

En la figura 6.11 se ha realizado una síntesis de todas las pruebas realizadas por el método WBT y en la tabla 6.18 las correspondientes a las pruebas CCT.

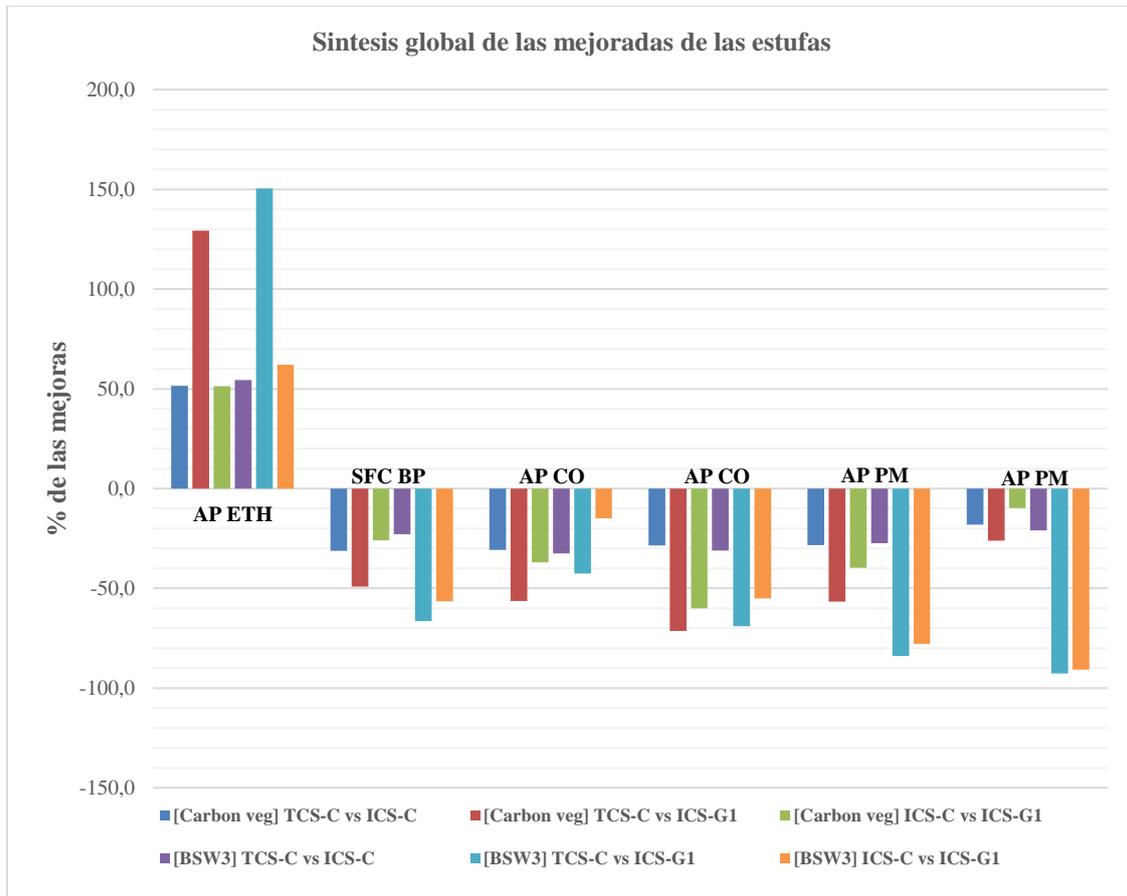


Fig. 6.11. Síntesis de las mejoras de las estufas por método WBT.

#### 6.4.5. Síntesis de las mejoras de las estufas por método CCT

Tabla 6.18 Síntesis de las mejoras de las estufas por método CCT [%].

| Tipos de combustible | Comparación       | Consumo | Tiempo de cocción | SFC   | SEC   |
|----------------------|-------------------|---------|-------------------|-------|-------|
| Carbon veg.          | TCS-C vs ICS-C[%] | -40,2   | -7                | -40,2 | -40,2 |
|                      | TCS vs ICS-G1[%]  | -61     | -12,3             | -60,8 | -60,8 |
|                      | ICS vs ICS-G1[%]  | -34,6   | -6                | -34,4 | -34,4 |
| BSW3                 | TCS-C vs ICS-C[%] | -40,6   | -7,5              | -39,9 | -39,9 |
|                      | TCS vs ICS-G1[%]  | -61,8   | -18,1             | -61,7 | -61,7 |
|                      | ICS vs ICS-G1[%]  | -35,7   | -11,4             | -36,2 | -37,5 |

De las pruebas de WBT en la figura 6.11 y de CCT en la tabla 6.18, con las distintas estufas de cocción, se desprende que la combinación de la estufa de cocción de gasificación ICS-G1 con las briquetas de biocombustible BW3 muestra mejores indicadores de rendimiento. Esto representa varias ventajas importantes: i) Las BSW3 se producen a partir de residuos agrícolas. Por lo que su precio de compra es inferior al del carbón vegetal tradicional, lo que beneficia a los hogares en la reducción de los gastos dedicados a la compra de combustible. ii) El uso de BWS3 tendrá como consecuencia directa la disminución de la tala de árboles para obtener la madera necesaria para la producción de carbón vegetal. iii) La utilización de estos residuos agrícolas evita su quema con los problemas que se derivan de ello, principalmente incendios forestales por ser quemadas no controladas.

#### **6.4.4. Análisis ambientales.**

##### **6.4.4.1. Escenario estimativo del consumo de carbón vegetal en Kinshasa con adopción de ICS-C.**

Según se ha mostrado anteriormente, utilizando el método CCT los consumos de carbón vegetal para cada una de las estufas son de 2063 g para la TCS-C, 1235 g para la ICS-C y 805 g para la ICS-G1. A partir de estos valores se puede obtener la reducción del consumo de carbón vegetal y de la leña necesaria para fabricarlo.

Teniendo en cuenta que aproximadamente un 80% de la población en la ciudad de Kinshasa, estimada en 15 millones de habitantes en el 2020, utiliza este método de cocción, que se prepara el alimento una vez al día para una familia media de 8 personas y que para la obtención de 1 kg de carbón se requieren 5 kg de leña se obtiene un ahorro de 1,51 t leña / año y familia utilizando la ICS-C y 2,29 t leña / año y familia para la ICS-G1.

De estos valores se obtiene que el consumo de carbón vegetal es de 112566 t / año utilizando TCS en todos los hogares que dependen de la biomasa para cocinar, este consumo cae a 67452 t / año de carbón vegetal si en estos hogares cambiaran las TCS-C por la ICS-C y a 43800 t/año para el cambio a la ICS-G1. Dado que los hogares no pueden separarse repentinamente de sus viejas estufas tradicionales TCS-C, se han estudiado diferentes escenarios que se presentan en las tablas 6.19, 6.20, 6.21, 6.22, 6.23 y 6.24 para ver cómo variará la demanda de carbón vegetal en la ciudad de Kinshasa con diferentes porcentajes de introducción de las estufas mejoradas. Para confeccionar estas tablas se ha estimado un crecimiento poblacional del 4.34%.

**Tabla 6.19. Estimación del consumo en biomasa[ 100% TCS-C y 0% ICS-C].**

| Año  | 100% TCS-C         |             | 0% ICS-C           |             | Total              |             |
|------|--------------------|-------------|--------------------|-------------|--------------------|-------------|
|      | Carbón veg.[t/año] | Leña[t/año] | Carbón veg.[t/año] | Leña[t/año] | Carbón veg.[t/año] | Leña[t/año] |
| 2020 | 112566             | 562830      | 0                  | 0           | 112566             | 562830      |
| 2025 | 139207             | 696036      | 0                  | 0           | 139207             | 696036      |
| 2030 | 172153             | 860767      | 0                  | 0           | 172153             | 860767      |
| 2035 | 212897             | 1064485     | 0                  | 0           | 212897             | 1064485     |
| 2040 | 263284             | 1316418     | 0                  | 0           | 263284             | 1316418     |
| 2045 | 325595             | 1627976     | 0                  | 0           | 325595             | 1627976     |
| 2050 | 402654             | 2013271     | 0                  | 0           | 402654             | 2013271     |

**Tabla 6.20. Estimación del consumo en biomasa[ 80% TCS-C y 20% ICS-C].**

| Año  | 80% TCS-C          |             | 20% ICS-C          |             | Total              |             |
|------|--------------------|-------------|--------------------|-------------|--------------------|-------------|
|      | Carbón veg.[t/año] | Leña[t/año] | Carbón veg.[t/año] | Leña[t/año] | Carbón veg.[t/año] | Leña[t/año] |
| 2020 | 90053              | 450264      | 13490              | 67452       | 103543             | 517716      |
| 2025 | 111366             | 556828      | 16683              | 83416       | 128049             | 640244      |
| 2030 | 137723             | 688614      | 20632              | 103158      | 158354             | 791772      |
| 2035 | 170318             | 851588      | 25515              | 127573      | 195832             | 979161      |
| 2040 | 210627             | 1053135     | 31553              | 157765      | 242180             | 1210900     |
| 2045 | 260476             | 1302381     | 39021              | 195104      | 299497             | 1497485     |
| 2050 | 322123             | 1610617     | 48256              | 241279      | 370379             | 1851896     |

**Tabla 6.21 Estimación del consumo en biomasa [ 60% TCS-C y 40% ICS-C].**

| Año  | 60% TCS-C          |             | 40% ICS-C          |             | Total              |             |
|------|--------------------|-------------|--------------------|-------------|--------------------|-------------|
|      | Carbón veg.[t/año] | Leña[t/año] | Carbón veg.[t/año] | Leña[t/año] | Carbón veg.[t/año] | Leña[t/año] |
| 2020 | 67540              | 337698      | 26981              | 134904      | 94520              | 472602      |
| 2025 | 83524              | 417621      | 33366              | 166832      | 116891             | 584453      |
| 2030 | 103292             | 516460      | 41263              | 206316      | 144555             | 722776      |
| 2035 | 127738             | 638691      | 51029              | 255145      | 178767             | 893836      |
| 2040 | 157970             | 789851      | 63106              | 315531      | 221076             | 1105382     |
| 2045 | 195357             | 976786      | 78042              | 390208      | 273399             | 1366993     |
| 2050 | 241593             | 1207963     | 96512              | 482558      | 338104             | 1690521     |

**Tabla 6.22 Estimación del consumo en biomasa.**

| Año  | 40% TCS-C          |             | 60% ICS-C          |             | Total              |             |
|------|--------------------|-------------|--------------------|-------------|--------------------|-------------|
|      | Carbón veg.[t/año] | Leña[t/año] | Carbón veg.[t/año] | Leña[t/año] | Carbón veg.[t/año] | Leña[t/año] |
| 2020 | 45026              | 225132      | 40471              | 202356      | 85498              | 427488      |
| 2025 | 55683              | 278414      | 50050              | 250248      | 105732             | 528662      |
| 2030 | 68861              | 344307      | 61895              | 309474      | 130756             | 653781      |
| 2035 | 85159              | 425794      | 76544              | 382718      | 161702             | 808512      |
| 2040 | 105313             | 526567      | 94659              | 473296      | 199973             | 999863      |
| 2045 | 130238             | 651190      | 117062             | 585311      | 247300             | 1236502     |
| 2050 | 161062             | 805308      | 144767             | 723837      | 305829             | 1529146     |

**Tabla 6.23. Estimación del consumo en biomasa.**

| Año  | 20% TCS-C          |             | 80% ICS-C          |             | Total              |             |
|------|--------------------|-------------|--------------------|-------------|--------------------|-------------|
|      | carbón veg.[t/año] | Leña[t/año] | carbón veg.[t/año] | Leña[t/año] | carbón veg.[t/año] | Leña[t/año] |
| 2020 | 22513              | 112566      | 53962              | 269808      | 76475              | 382374      |
| 2025 | 27841              | 139207      | 66733              | 333664      | 94574              | 472871      |
| 2030 | 34431              | 172153      | 82526              | 412632      | 116957             | 584786      |
| 2035 | 42579              | 212897      | 102058             | 510290      | 144637             | 723187      |
| 2040 | 52657              | 263284      | 126212             | 631061      | 178869             | 894345      |
| 2045 | 65119              | 325595      | 156083             | 780415      | 221202             | 1106010     |
| 2050 | 80531              | 402654      | 193023             | 965117      | 273554             | 1367771     |

**Tabla 6.24. Estimación del consumo en biomasa**

| Año  | 0% TCS-C           |             | 100% ICS-C         |             | Total              |             |
|------|--------------------|-------------|--------------------|-------------|--------------------|-------------|
|      | Carbón veg.[t/año] | Leña[t/año] | Carbón veg.[t/año] | Leña[t/año] | Carbón veg.[t/año] | Leña[t/año] |
| 2020 | 0                  | 0           | 67452              | 337260      | 67452              | 337260      |
| 2025 | 0                  | 0           | 83416              | 417080      | 83416              | 417080      |
| 2030 | 0                  | 0           | 103158             | 515790      | 103158             | 515790      |
| 2035 | 0                  | 0           | 127573             | 637863      | 127573             | 637863      |
| 2040 | 0                  | 0           | 157765             | 788826      | 157765             | 788826      |
| 2045 | 0                  | 0           | 195104             | 975519      | 195104             | 975519      |
| 2050 | 0                  | 0           | 241279             | 1206396     | 241279             | 1206396     |

#### 6.4.4.2. Escenario estimativo del consumo de carbón vegetal en Kinshasa con adopción de ICS-G1.

Las siguientes tablas 6.25, 6.26, 6.27, 6.28, 6.29 y 6.30 muestran la evolución del consumo de carbón vegetal y de la leña equivalente para varios niveles de penetración de las estufas de gasificación ICS-G1 en los diferentes hogares de la ciudad de Kinshasa.

**Tabla 6.25. Estimación del consumo en biomasa [100% TCS-C y 0% ICS-G1]**

| Año  | 100% TCS-C         |             | 0% ICS-G1          |             | Total              |             |
|------|--------------------|-------------|--------------------|-------------|--------------------|-------------|
|      | Carbón veg.[t/año] | Leña[t/año] | Carbón veg.[t/año] | Leña[t/año] | Carbón veg.[t/año] | Leña[t/año] |
| 2020 | 112566             | 562830      | 0                  | 0           | 112566             | 562830      |
| 2025 | 139207             | 696036      | 0                  | 0           | 139207             | 696036      |
| 2030 | 172153             | 860767      | 0                  | 0           | 172153             | 860767      |
| 2035 | 212897             | 1064485     | 0                  | 0           | 212897             | 1064485     |
| 2040 | 263284             | 1316418     | 0                  | 0           | 263284             | 1316418     |
| 2045 | 325595             | 1627976     | 0                  | 0           | 325595             | 1627976     |
| 2050 | 402654             | 2013271     | 0                  | 0           | 402654             | 2013271     |

**Tabla 6.26. Estimación del consumo en biomasa.**

| Año  | 80% TCS-C          |             | 20% ICS-G1         |             | Total              |             |
|------|--------------------|-------------|--------------------|-------------|--------------------|-------------|
|      | Carbón veg.[t/año] | Leña[t/año] | Carbón veg.[t/año] | Leña[t/año] | Carbón veg.[t/año] | Leña[t/año] |
| 2020 | 90053              | 450264      | 8760               | 43800       | 98813              | 494064      |
| 2025 | 111366             | 556828      | 10833              | 54166       | 122199             | 610995      |
| 2030 | 137723             | 688614      | 13397              | 66986       | 151120             | 755599      |
| 2035 | 170318             | 851588      | 16568              | 82839       | 186886             | 934428      |
| 2040 | 210627             | 1053135     | 20489              | 102445      | 231116             | 1155580     |
| 2045 | 260476             | 1302381     | 25338              | 126691      | 285814             | 1429072     |
| 2050 | 322123             | 1610617     | 31335              | 156675      | 353458             | 1767291     |

**Tabla 6.27. Estimación del consumo en biomasa.**

| Año  | 60% TCS-C          |             | 40% ICS-G1         |             | Total              |             |
|------|--------------------|-------------|--------------------|-------------|--------------------|-------------|
|      | Carbón veg.[t/año] | Leña[t/año] | Carbón veg.[t/año] | Leña[t/año] | Carbón veg.[t/año] | Leña[t/año] |
| 2020 | 67540              | 337698      | 17520              | 87600       | 85060              | 425298      |
| 2025 | 83524              | 417621      | 21666              | 108332      | 105191             | 525954      |
| 2030 | 103292             | 516460      | 26794              | 133972      | 130086             | 650432      |
| 2035 | 127738             | 638691      | 33136              | 165679      | 160874             | 804370      |
| 2040 | 157970             | 789851      | 40978              | 204890      | 198948             | 994741      |
| 2045 | 195357             | 976786      | 50676              | 253382      | 246033             | 1230167     |
| 2050 | 241593             | 1207963     | 62670              | 313350      | 304262             | 1521312     |

**Tabla 6.28. Estimación del consumo en biomasa.**

| Año  | 40% TCS-C          |             | 60% ICS-G1         |             | Total              |             |
|------|--------------------|-------------|--------------------|-------------|--------------------|-------------|
|      | Carbón veg.[t/año] | Leña[t/año] | Carbón veg.[t/año] | Leña[t/año] | Carbón veg.[t/año] | Leña[t/año] |
| 2020 | 45026              | 225132      | 26280              | 131400      | 71306              | 356532      |
| 2025 | 55683              | 278414      | 32500              | 162499      | 88183              | 440913      |
| 2030 | 68861              | 344307      | 40191              | 200957      | 109053             | 545264      |
| 2035 | 85159              | 425794      | 49704              | 248518      | 134862             | 674312      |
| 2040 | 105313             | 526567      | 61467              | 307335      | 166780             | 833902      |
| 2045 | 130238             | 651190      | 76014              | 380072      | 206253             | 1031263     |
| 2050 | 161062             | 805308      | 94005              | 470024      | 255067             | 1275333     |

**Tabla 6.29. Estimación del consumo en biomasa.**

| Año  | 20% TCS-C          |             | 80% ICS-G1         |             | Total              |             |
|------|--------------------|-------------|--------------------|-------------|--------------------|-------------|
|      | Carbón veg.[t/año] | Leña[t/año] | Carbón veg.[t/año] | Leña[t/año] | Carbón veg.[t/año] | Leña[t/año] |
| 2020 | 22513              | 112566      | 35040              | 175200      | 57553              | 287766      |
| 2025 | 27841              | 139207      | 43333              | 216665      | 71174              | 355872      |
| 2030 | 34431              | 172153      | 53589              | 267943      | 88019              | 440096      |
| 2035 | 42579              | 212897      | 66271              | 331357      | 108851             | 544254      |
| 2040 | 52657              | 263284      | 81956              | 409780      | 134613             | 673064      |
| 2045 | 65119              | 325595      | 101353             | 506763      | 166472             | 832358      |
| 2050 | 80531              | 402654      | 125340             | 626699      | 205871             | 1029353     |

**Tabla 6.30. Estimación del consumo en biomasa.**

| Año  | 0% TCS-C           |             | 100% ICS-G1        |             | Total              |             |
|------|--------------------|-------------|--------------------|-------------|--------------------|-------------|
|      | Carbón veg.[t/año] | Leña[t/año] | Carbón veg.[t/año] | Leña[t/año] | Carbón veg.[t/año] | Leña[t/año] |
| 2020 | 0                  | 0           | 43800              | 219000      | 43800              | 219000      |
| 2025 | 0                  | 0           | 54166              | 270831      | 54166              | 270831      |
| 2030 | 0                  | 0           | 66986              | 334929      | 66986              | 334929      |
| 2035 | 0                  | 0           | 82839              | 414197      | 82839              | 414197      |
| 2040 | 0                  | 0           | 102445             | 512225      | 102445             | 512225      |
| 2045 | 0                  | 0           | 126691             | 633454      | 126691             | 633454      |
| 2050 | 0                  | 0           | 156675             | 783374      | 156675             | 783374      |

#### 6.4.4.3 Análisis de la ER-CO<sub>2</sub> en la adopción de las estufas ICS-C y ICS-G1 en la ciudad de Kinshasa.

A partir de los ahorros de biomasa obtenidos en el epígrafe anterior se puede calcular la reducción de emisiones aplicando la relación 4.28 descrita en el capítulo 4 [6.8], Los resultados se incluyen en la tabla 6.31. Se ha considerado que el ahorro de biomasa cuando se utilizan las briquetas BSW3 es total, ya que son productos de desecho así como la reducción de emisiones por tratarse de este tipo de combustible.

**Tabla 6.31 Biomasa ahorrada (Bsav.) y reducciones de CO<sub>2</sub> (ER-CO<sub>2</sub>) para las estufas de cocción.**

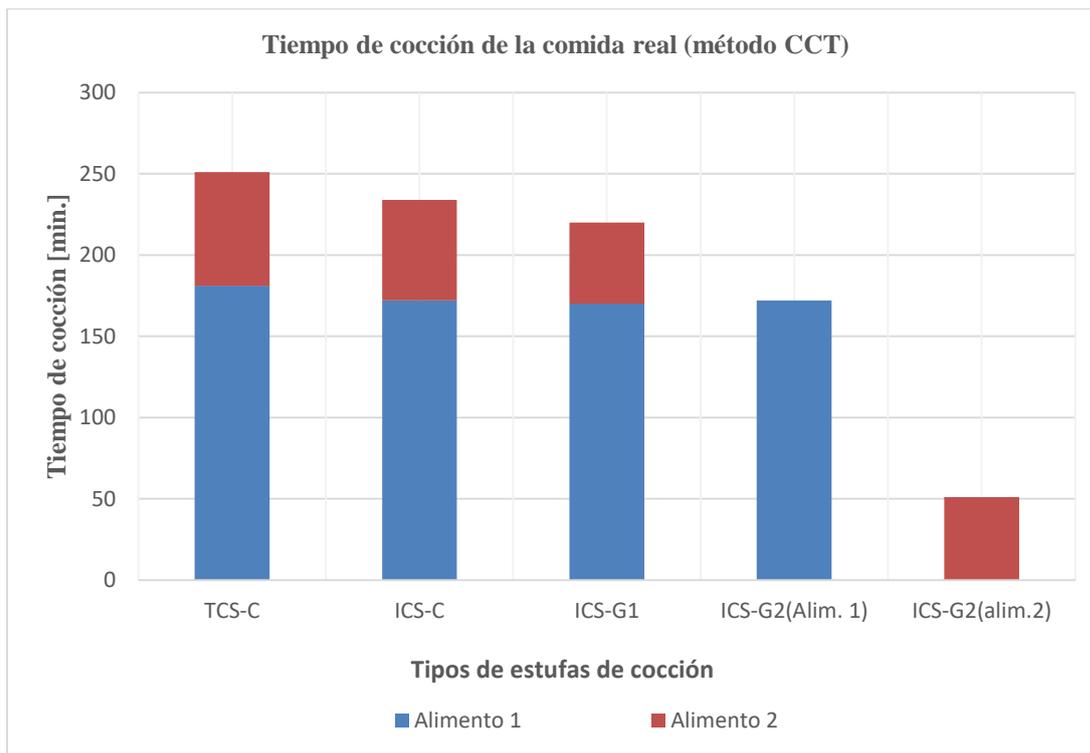
|                      | Bsav.[t leña/año] Hogar | Bsav.[t leña/año] Kinshasa | ER-CO <sub>2</sub> [t CO <sub>2</sub> /año] Hogar | ER-CO <sub>2</sub> [tCO <sub>2</sub> /año]Kinshasa |
|----------------------|-------------------------|----------------------------|---|--|
| ICS-C(Carbón veg.)   | 1.51                    | 2 265 000                  | 1.49  | 2 235 000  |
| ICS-G1 (carbón veg.) | 2.29                    | 3 435 000                  | 2.27  | 3 405 000  |
| ICS-C (BSW3)         | 3.76                    | 5 647 462                  | 3.72  | 5 580 822  |
| ICS-G1 (BSW3)        | 3.76                    | 5 647 462                  | 3.72  | 5 580 822  |

#### 6.4.5 Análisis de impactos socioeconómicos.

##### 6.4.5.1 Aspectos sociales.

En el África subsahariana en general, como en el caso de Kinshasa en particular, las concepciones etnos-tribales heredadas de la tradición antigua exigen que las actividades de cocina se confíen exclusivamente a las mujeres [6.4-6.5]. Los hombres raramente se dedican a actividades de

cocina. La realización de diferentes tareas de cocina por las mujeres, pueden durar varias horas y suelen estar con sus niños en la espalda. Es importante reducir la cantidad de tiempo que están expuestos alrededor del fuego mientras cocinan los alimentos con los niños. En los epígrafes 6.4.1, 6.4.2 y 6.4.3 se han indicado los tiempos de cocción con las diferentes estufas, que se plasman en la figura 6.12. Se incluye en el gráfico la estufa ICS-G2 con doble reactor, que puede cocinar dos ollas al mismo tiempo, realizando las mismas tareas de cocina en 172 minutos. Esto significa que una ICS-G2 logra un ahorro de tiempo de 79 minutos, respecto del modelo TCS-C.



**Fig.6.12. Tiempo de cocción para los diferentes tipos de estufas (método CCT).**

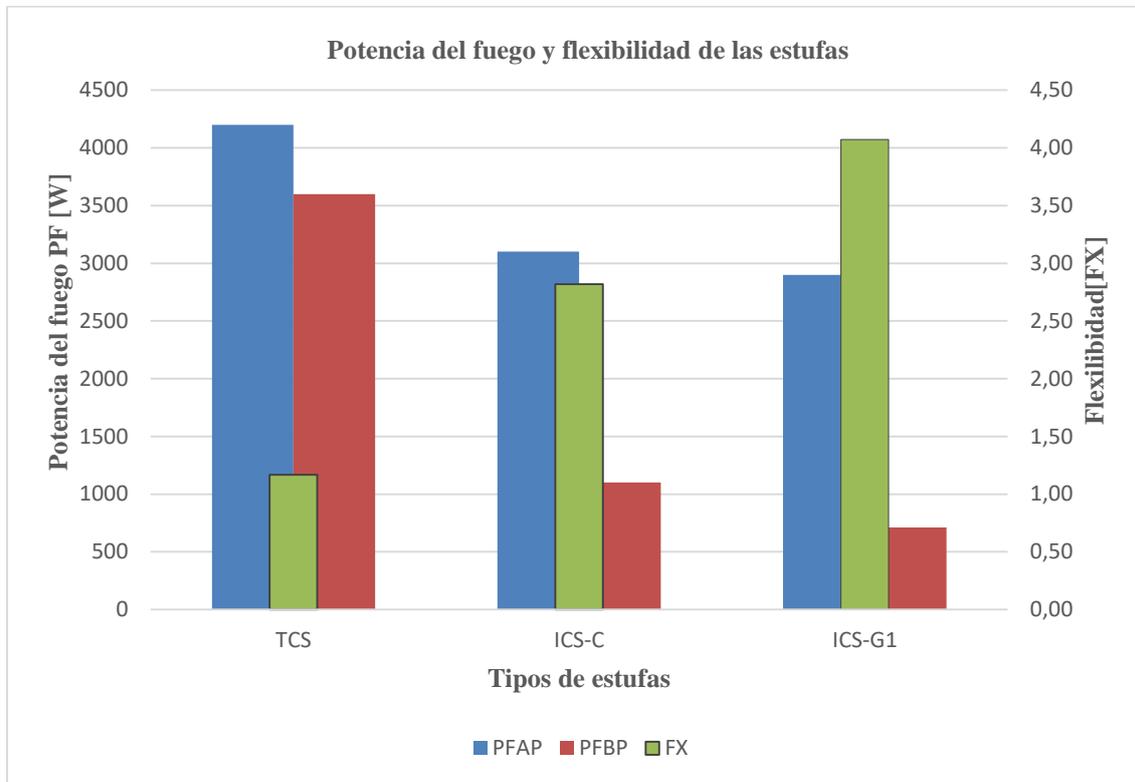
#### 6.4.5.2 Aspectos económicos.

Un hogar de 8 personas en la ciudad de Kinshasa consumiría, dependiendo del tipo de cocina utilizada, TCS-C, ICS-C e ICS-G1 2063g, 1234g y 805g de carbón vegetal por día, respectivamente. El precio del carbón vegetal en Kinshasa es de 0,6 dólares estadounidenses por kg de carbón vegetal [6.11], lo que da un gasto mensual de 37,1 dólares estadounidenses, 22,2 dólares estadounidenses y 14,4 dólares estadounidenses, respectivamente para cada tipo de estufa.

Cabe señalar que la adopción de un modelo de estufa de cocina mejorado puede suponer ahorros mensuales de US \$ 14,9 y US \$ 22,7 para una ICS-C y una ICS-G1 respectivamente. Anualmente, estas cantidades suponen 181,3 US \$ y 275,5 US \$ para una y otra estufa. Este ahorro es muy significativo para un país como la República Democrática del Congo, cuyos hogares viven por debajo del umbral de pobreza según el FMI [6.10, 6.12]. Al estimar el precio de un ICS-C y un ICS-G1 en 30 dólares estadounidenses y 50

dólares estadounidenses respectivamente, el tiempo de retorno puede ser de aproximadamente 2 meses, que es un tiempo muy corto y aceptable.

### 6.5. Análisis de flexibilidad de las estufas.



**Fig.6.13. Potencia del fuego y flexibilidad de las estufas de cocción.**

Las potencias de fuego en la fase de alta potencia y en la fase de cocción a fuego lento son respectivamente 4200W y 3600W para el TCS-C, 3789W y 1400W para el ICS-C y 2900W y 712W para el ICS-G1 (Figura 6.13). Siendo la potencia de fuego más pequeña en la fase de cocción lenta la de la estufa ICS-G1.

La flexibilidad un parámetro importante que indica el potencial de ahorro de combustible en las condiciones reales de cocción. La flexibilidad es la relación entre la potencia de fuego de la fase de alta potencia (PFAP) y la de la fase de baja potencia (PFBP) (cocción a fuego lento). Identifica una estufa con la posibilidad de controlar el fuego según necesidades. Una flexibilidad elevada significa elevada posibilidad de manejo de la estufa. De hecho, una estufa bien construida debe tener una gran flexibilidad, lo que significa que la potencia del fuego en la fase de cocción a fuego lento tendrá que ser menor para que la estufa funcione en las mejores condiciones. En las condiciones reales de uso, la estufa funciona la mayor parte del tiempo a fuego lento. Las flexibilidades de las diferentes estufas TCS-C, ICS-C e ICS-G1 son 1.17, 2.82 y 4.1 respectivamente. Una flexibilidad de 4.1 simplemente significa que la potencia de fuego de la fase de cocción lenta del ICS-G1 es un 75% menor que la de la fase de arranque en caliente de alta potencia. Para tener una gran flexibilidad, la cámara de combustión de la estufa debe estar construida de un material aislante y acumulador de calor, como puede ser materiales cerámicos (arcilla), acero refractario o hierro fundido.

### 6.6. Análisis del nivel de seguridad de las estufas de cocción.

Las tablas 6.32, 6.33, 6.34 y 6.35 muestran los análisis de seguridad de las estufas TCS-C, TCS-3P, ICS-C e ICS-G1 respectivamente. Los niveles de seguridad se clasifican según la IWA Métrica y cabe señalar que los modelos tradicionales tienen niveles de seguridad muy bajos, mientras que en los modelos mejorados se aumentan notablemente. El único punto de mejora para los nuevos modelos consiste en actuar sobre la temperatura de la superficie, ya que esta es de 78°C después de 30 minutos de funcionamiento de la estufa, cuando ya se ha alcanzado el equilibrio térmico. Disminuir esta temperatura se puede conseguir aumentando el grosor del aislamiento térmico o bien utilizar un aislamiento con un menor coeficiente de conductividad térmica. Esto implicaría un costo adicional en la estufa mejorada.

**Tabla 6.32 Análisis de seguridad de la TCS-C.**

| Criterios de evaluación                                  | Puntuación 1-4 | Factor multiplicador | Subtotal      |
|--|----------------|----------------------|---------------|
| Controles de bordes afilados y puntas afiladas           | 1              | 1.5                  | 1.5           |
| Estabilidad de la estufa de cocción                      | 4              | 3.0                  | 12            |
| Contención de combustible                                | 1              | 2.5                  | 2.5           |
| Obstrucciones cerca de la superficie de cocción          | 4              | 2.0                  | 8             |
| La temperatura de la superficie                          | 1              | 2.0                  | 2             |
| Transmisión de calor a los alrededores                   | 1              | 2.5                  | 2.5           |
| Temperatura de las muñecas                               | 4              | 2.0                  | 8             |
| Blindaje de la chimenea                                  | 4              | 2.5                  | 10            |
| Las llamas que rodean la olla                            | 4              | 3.0                  | 12            |
| Llamas / combustible saliendo de la cámara de combustión | 4              | 4.0                  | 16            |
| <b>Total</b>   |                |                      | <b>74.5 %</b> |

**Tabla 6.33. Análisis de seguridad de la TCS-3P.**

| Criterios de evaluación                                  | Puntuación 1-4 | Factor multiplicador | Subtotal    |
|--|----------------|----------------------|-------------|
| Controles de bordes afilados y puntas afiladas           | 2              | 1.5                  | 3           |
| Estabilidad de la estufa de cocción                      | 4              | 3.0                  | 12          |
| Contención de combustible                                | 1              | 2.5                  | 2.5         |
| Obstrucciones cerca de la superficie de cocción          | 1              | 2.0                  | 2           |
| La temperatura de la superficie                          | 1              | 2.0                  | 2           |
| Transmisión de calor a los alrededores                   | 1              | 2.5                  | 2.5         |
| Temperatura de las muñecas                               | 1              | 2.0                  | 2           |
| Blindaje de la chimenea                                  | 4              | 2.5                  | 10          |
| Las llamas que rodean la olla                            | 1              | 3.0                  | 3           |
| Llamas / combustible saliendo de la cámara de combustión | 1              | 4.0                  | 4           |
| <b>Total</b>   |                |                      | <b>43 %</b> |

**Tabla 6.34. Análisis de seguridad de la ICS-C.**

| Crterios de evaluación                                   | Puntuación 1-4 | Factor multiplicador | Subtotal   |
|--|----------------|----------------------|------------|
| Controles de bordes afilados y puntas afiladas           | 2              | 1,5                  | 3          |
| Estabilidad de la estufa de cocción                      | 4              | 3,0                  | 12         |
| Contención de combustible                                | 4              | 2,5                  | 10         |
| Obstrucciones cerca de la superficie de cocción          | 4              | 2,0                  | 8          |
| La temperatura de la superficie                          | 1              | 2,0                  | 2          |
| Transmisión de calor a los alrededores                   | 4              | 2,5                  | 10         |
| Temperatura de las muñecas                               | 4              | 2,0                  | 8          |
| Blindaje de la chimenea                                  | 4              | 2,5                  | 10         |
| Las llamas que rodean la olla                            | 4              | 3,0                  | 12         |
| Llamas / combustible saliendo de la cámara de combustión | 4              | 4,0                  | 16         |
| <b>Total</b>   |                |                      | <b>91%</b> |

**Tabla 6.35. Análisis de seguridad de la ICS-G1.**

| Crterios de evaluación                                   | Puntuación 1-4 | Factor multiplicador | Subtotal    |
|--|----------------|----------------------|-------------|
| Controles de bordes afilados y puntas afiladas           | 4              | 1,5                  | 6           |
| Estabilidad de la estufa de cocción                      | 4              | 3,0                  | 12          |
| Contención de combustible                                | 4              | 2,5                  | 10          |
| Obstrucciones cerca de la superficie de cocción          | 4              | 2,0                  | 8           |
| La temperatura de la superficie                          | 3              | 2,0                  | 6           |
| Transmisión de calor a los alrededores                   | 4              | 2,5                  | 10          |
| Temperatura de las muñecas                               | 4              | 2,0                  | 8           |
| Blindaje de la chimenea                                  | 4              | 2,5                  | 10          |
| Las llamas que rodean la olla                            | 4              | 3,0                  | 12          |
| Llamas / combustible saliendo de la cámara de combustión | 4              | 4,0                  | 16          |
| <b>Total</b>   |                |                      | <b>98 %</b> |

## 6.7. Conclusión.

Una vez realizado el diseño de las estufas se han optimizado las dimensiones a través de numerosos ensayos y efectuado las pruebas necesarias para comprobar el ahorro de combustible y de emisiones que se obtiene con ellas. Los resultados han sido muy satisfactorios, así tan solo introducir la base cerámica consigue un ahorro de 18% de la leña utilizada. Aislado térmicamente las paredes con placas cerámicas aumenta este ahorro al 27% y a partir de aquí los nuevos diseños consiguen ahorros mucho más importantes. Utilizar una estufa mejorada supone, en cada utilización ahorrar 828 g de leña (40%) y con una de gasificación se puede ahorrar 1258g (62%).

Se ha constatado también que es posible la utilización de briquetas de combustibles obtenidas a través de residuos agrícolas, con lo que se consigue abaratar el proceso y mantener el bosque en mejores condiciones.

Los ahorros de combustible a nivel global para una población como Kinshasa son de un valor muy elevado llegando a cifras anuales de 2265 kton para el caso de la estufa mejorada, 3435 kton para la de gasificación y 5647 kton utilizando briquetas, lo que conduce a ahorros de emisiones de CO<sub>2</sub> de 2235 kton , 3405kton y 5580 kton para cada uno de los casos indicados.

## Referencias bibliográficas del capítulo 6.

- [6.1] Barbieri, J.; Parigi, F.; Riva, F.; Colombo, E. Laboratory Testing of the Innovative Low-Cost Mewar Angithi Insert for Improving Energy Efficiency of Cooking Tasks on Three-Stone Fires in Critical Contexts, *Energies*, 2018, 11, 3463-3472. Doi: 10.3390/en1123463.
- [6.2] Elías José Hurtado Pérez, Oscar Mulumba Ilunga, María Cristina Moros Gómez et Carlos Vargas Salgado « Analyse des impacts économique-environnementaux du changement d’usage d’un foyer de cuisson traditionnel par un foyer de cuisson amélioré optimisé à charbon de bois dans les ménages de la ville de Kinshasa », *Déchets sciences et techniques* [En ligne], N°75, mis à jour le : 19/12/2017, URL : <http://odel.irevues.inist.fr/dechets-sciences-techniques/index.php?id=3714>, <https://doi.org/10.4267/dechets-sciences-techniques.3714>.
- [6.3] Yves Schenkel, Paul Bertaux, Stéphane Vanwijnsberghe & José Carré,(1997). «Une évaluation de la technique de la carbonisation en meule», BASE [on line], Volume 1 (1997), Numéro 2, 113-124 URL :<http://popups.ulg.ac.be/1780-4507/index.php?id=16126>. (Ultimo consulta 13/10/2019).
- [6.4] Ilunga, O. and José, H. (2018) Environmental Impacts (ER CO<sub>2</sub>) of an Improved Multi-Fuel Gasifier Forced Air Cookstove in the City of Kinshasa. *Journal of Environmental Protection*, 9, 619-635. doi: [10.4236/jep.2018.96039](https://doi.org/10.4236/jep.2018.96039)
- [6.5] Gitau, J.K.; Sundberg, C.; Mendum, R.; Mutune, J.; Njenga, M. Use of Biochar-Producing Gasifier Cookstove Improves Energy Use Efficiency and Indoor Air Quality in Rural Households. *Energies* 2019, 12(22), 4285-4304. <https://doi.org/10.3390/en12224285>.
- [6.6] Paulo Medina, V. Berrueta, M. Martínez, V. Ruiz, I. Ruiz Mercado, O. R. Masera, 2017. Closing the gap between lab and field cookstove tests: Benefits of multi-pot and sequencing cooking tasks through controlled burning cycles, <https://doi.org/10.1016/j.esd.2017.08.009>
- [6.7] Oscar Mulumba-Ilunga, Elías Hurtado-Pérez, Elisa Peñalvo-López y Francisco-Javier Cárcel Carrasco. 2020. Evaluación de rendimiento y de sostenibilidad de una estufa mejorada de carbón vegetal



por métodos WBT Y CCT. Aplicación a Bandundu (R.D. CONGO). Dyna, Cod. 9590 | Tecnología de productos metálicos | 3316.05 Hornos, calderas y estufas. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/9590>.

[6.8] Small-Scale Methodology: Energy Efficiency Measures in Thermal Applications of Non-Renewable Biomass. UNFCCC 2019. AMS-II.G. Version 10.0 Sectoral Scope(s):03. [https://cdm.unfccc.int/filestorage/1/F/S/1FSPVQM7JWELKHB5U94DXR23TOC6AZ/EB100\\_repan12\\_AMS-II.G.pdf?t=QnJ8cHBmcHhxfDD4WnsRhxhp0I9t-xRRTpRM](https://cdm.unfccc.int/filestorage/1/F/S/1FSPVQM7JWELKHB5U94DXR23TOC6AZ/EB100_repan12_AMS-II.G.pdf?t=QnJ8cHBmcHhxfDD4WnsRhxhp0I9t-xRRTpRM) (Accessed 9/12/ 2019).

[6.9] Kinshasa population 2020. Online. <https://worldpopulationreview.com/world-cities/kinshasa-population>. (consulta 20/09/2020).

[6.10] Pauvreté et condition de vie des ménages, Province de Kinshasa. 2013 <https://www.cd.undp.org/content/rdc/fr/home/library/poverty/pauvrete-et-condition-de-vie-des-menages111111111.html>. (consulta 21/09/2020).

[6.11] Hurtado Pérez, E.; Mulumba Ilunga, O.; Alfonso Solar, D.; Moros Gómez, M.C.; Bastida-Molina, P. Sustainable Cooking Based on a 3 kW Air-Forced Multifuel Gasification Stove Using Alternative Fuels Obtained from Agricultural Wastes. *Sustainability* 2020, 12, 7723

[6.12] IMF. Country Report No. 15/280 DEMOCRATIC REPUBLIC OF THE CONGO 521 <https://www.imf.org/external/pubs/ft/scr/2015/cr15280.pdf> (accessed 15/02/2019)





## **Capítulo 7**

### **Conclusiones generales e investigaciones futuras**



## Capítulo 7. Conclusiones generales e investigaciones futuras.

### 7.1. Conclusiones generales

En este trabajo, propusimos un modelo de estufa de alto rendimiento utilizando biomasa sólida como combustible bajo el principio de micro gasificación de la biomasa. Esta estufa puede utilizar varios tipos de biomasa sólida (Carbón vegetal, pellets, briquetas, etc.). Para ello, el enfoque fue proponer las primeras mejoras en primeras aproximaciones que se harían a las estufas tradicionales TCS-3P y TCS-C. Estas mejoras preliminares son urgentes para las poblaciones en situaciones socioeconómicas muy críticas. Estas soluciones muy simplistas consisten en añadir CB y CPs respectivamente a las estufas TCS-3P y TCS-C. Estas soluciones urgentes se traducen en mejoras del 23,4%, 13,8% y 43,2% respectivamente en el consumo específico de combustible, en la reducción de las emisiones de baja potencia de CO y PM para la TCS-3P y del 18,7%, 14,2% y 12,3% respectivamente en el consumo específico de combustible, en la reducción de las emisiones de baja potencia de CO y PM para la TCS-C.

Además, se llevó a cabo una mejora intermedia en el TCS-C proponiendo una estufa de combustión natural mejorada ICS-C por método participativo con cambio progresivo de los parámetros constructivos de la estufa. Un ICS-C da mejoras del 31,2%, 28,6% y 18,1% respectivamente en el consumo específico de combustible, reducción de emisiones de baja potencia de CO y PM.

Por último, el prometedor y eficiente sistema de gasificación de biomasa fue diseñado, teniendo en cuenta los hábitos culinarios locales. Las estufas de gasificación ICS-G1, comparadas con otros tipos de estufas tradicionales o mejoradas de combustión natural, es una estufa de cocción que permite optimizar los siguientes parámetros funcionales e indicadores de rendimiento:

- **Mejorar la eficiencia energética:**

La estufa de gasificación tiene una buena puntuación en términos de eficiencia energética en comparación con otros modelos de estufas, con la eficiencia energética del ICS-G fluctuando alrededor del 51,6%, mientras que los modelos ICS-C oscilan entre el 35% y el 40%. La ICS-G1 tiene una mejora en la eficiencia

de hasta 129,3% respecto a la tradicional TCS-C. El ahorro de combustible de hasta el 61 % en comparación con el modelo tradicional TCS-C.

- **Mejora del tiempo de cocción:**

El ahorro en el tiempo de cocción en los hogares comparado con el sistema de cocción tradicional es del 12,3% y 38% respectivamente para el reactor dual ICS-G1 e ICS-G2.

- **Mejora en la reducción drástica de las emisiones contaminantes:**

En la ICS-G1 la combustión es mejor debido a la turbulencia que favorece una buena mezcla de combustible gas-aire. El aire secundario entra en el reactor ya precalentado. Esto permite que la cámara de combustión alcance temperaturas de alrededor de 1000°C. Las emisiones de CO y PM se reducen drásticamente. En resumen, la reducción de las emisiones contaminantes es de 54,6-71,4% y 26,1-56,7% respectivamente de CO y PM (en baja y alta potencia) en comparación con el modelo Tradicional.

- **Mejora de la seguridad de los usuarios:**

La estufa de gasificación diseñada ofrece una seguridad significativamente mayor en comparación con el modelo tradicional. Casi todos los 10 indicadores de seguridad han sido mejorados al nivel óptimo. El nivel de seguridad total es del 98% (más alta).

- **Mejora de la flexibilidad de uso de la estufa.**

- ❖ **Reducción del tiempo de ignición de la ICS-G1**

La estufa ICS-G1 es muy fácil de usar. El arranque y la ignición del combustible son muy rápido y fácil. Puede que el fuego sólo tarde dos minutos en iniciarse (con soplador). Mientras que la estufa TCS-C puede tomar hasta 20 minutos (ventilación natural) para que un usuario muy experimentado inicie el fuego.

- ❖ **Ajuste rápido y fácil de la potencia de fuego**

Ajustar la potencia de fuego es rápido y fácil con una ICS-G1. Simplemente varía el flujo de aire en el reactor (con soplador) usando un potenciómetro adjunto al lado izquierdo. Mientras que con el modelo tradicional, es difícil o incluso imposible ajustar la potencia de fuego según los deseos del usuario (ventilación natural). De hecho, siendo la combustión natural, el suministro de aire es aleatorio.

- ❖ **Facilidad de extinción del fuego.**

El fuego se extingue fácilmente en una ICS-G1. Simplemente retire el suministro de aire del reactor devolviendo el potenciómetro a la posición cero. No hay más aire y el fuego se ha extinguido. Mientras que los usuarios de los modelos tradicionales necesitan tirar agua al fuego para extinguirlo, la ICS-G1 tiene una forma muy simple y fácil de extinguir el fuego.

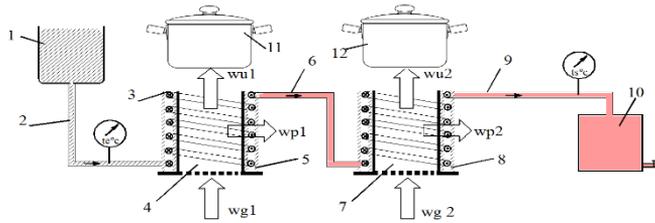
- **Uso de diferentes tipos de combustible.**

Una ICS-G1 utiliza varios tipos de biomasa: leña, carbón vegetal, pellets, briquetas biocombustible y otros tipos de biocombustibles sólidos procedentes de residuos agrícolas. Esta es una de las mayores ventajas de una ICS-G1. De hecho, en este último tiempo se están realizando estudios para buscar combustibles alternativos a la leña y al carbón vegetal con el fin de reducir la presión sobre los bosques para el suministro de estos dos tipos de combustibles. Una estufa que puede utilizar todos estos tipos diferentes de biocombustibles sólidos en un solo modelo es muy ventajosa.

## 7.2. Investigaciones futuras

Las futuras líneas de investigación podrían ser:

- Diseñar estufas mejoradas con sistema de cogeneración para la producción del agua caliente sanitaria. Este concepto podría ilustrarse con la siguiente figura 7.2. El trabajo futuro podría dirigirse al diseño de un ICS equipado con un sistema de agua caliente sanitaria (ACS), ya que las pérdidas de calor laterales pueden recuperarse para calentar el agua que circula en un serpentín alrededor de la cámara de combustión. Estos tipos de cocinas pueden contribuir en gran medida a hacer el espacio de la cocina mucho más limpio e higiénico. Así, se puede cocinar, limpiando la comida y los platos con agua caliente. Este podría contribuir a eliminar las enfermedades de manos sucias más comunes en los países de África sub sahariano.



**Fig7.1 Estufa ICS-C2 à cogeneración (Cocción + agua caliente sanitaria)**

- Diseñar estufas mejoradas planchas +chimenea+ extractor de aire + sistema de cogeneración para la producción del ACS aplicada a los países de África sub sahariano.
- Diseñar estufas institucionales con sistema de gasificación de biomasa de alta potencia que se puede utilizar en restaurantes, pensiones para estudiantes.
- Diseñar reactores de gasificación de biomasa de potencia superior a 15 KW que se pueden utilizar ventajosamente en hornos de panificación para panaderías artesanales.
- Uno de los problemas de las estufas que utilizan biomasa es la gestión de la potencia de fuego, lo que a menudo obliga a la cocinera a estar siempre cerca del fuego para garantizar un suministro continuo de combustible cuando el fuego disminuye. Se puede realizar un estudio para el diseño de una estufa de cocción con gestión automática de la potencia de fuego. Se establece un punto de ajuste de umbral de potencia de fuego. Un sistema motorizado de tornillo sin fin debe permitir alimentar el reactor de cocción a través de un pequeño depósito de almacenamiento de combustible
- En el campo de los combustibles alternativos se pueden realizar estudios de optimización para obtener un modelo óptimo de combustible alternativo que tenga en cuenta una buena elección y una buena dosificación de residuos agrícolas, una buena composición elemental, un mejor tamaño de partícula y resistencia mecánica de las briquetas de biocombustible.



## ANEXOS



ANEXOS.

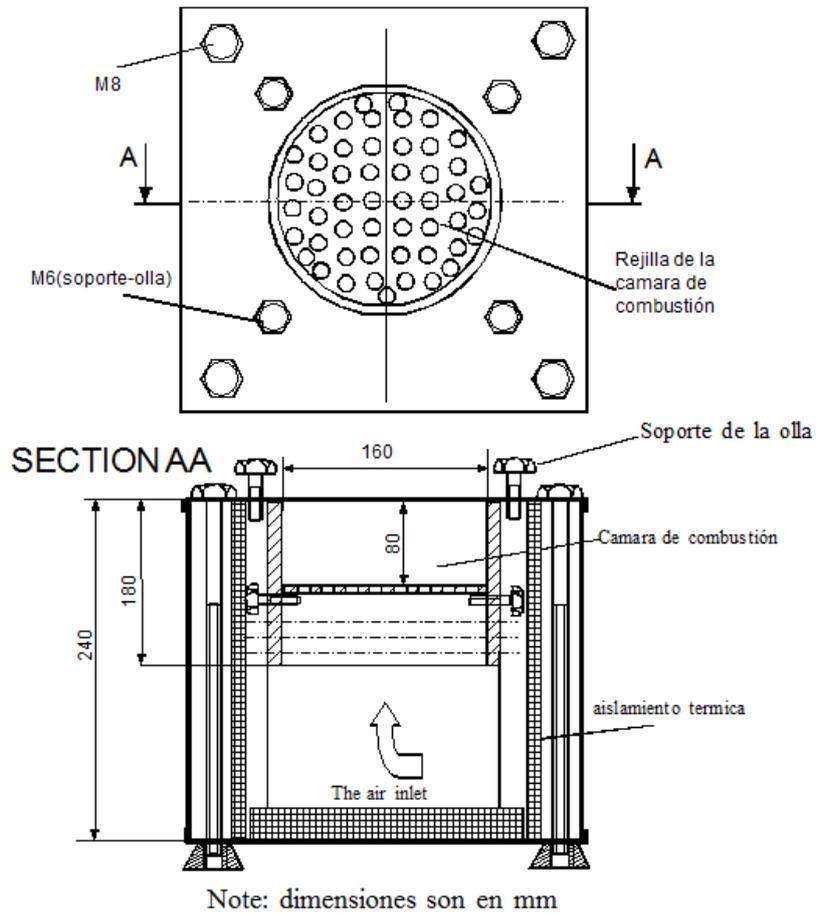


Fig.A1 Dimensiones ICS-C

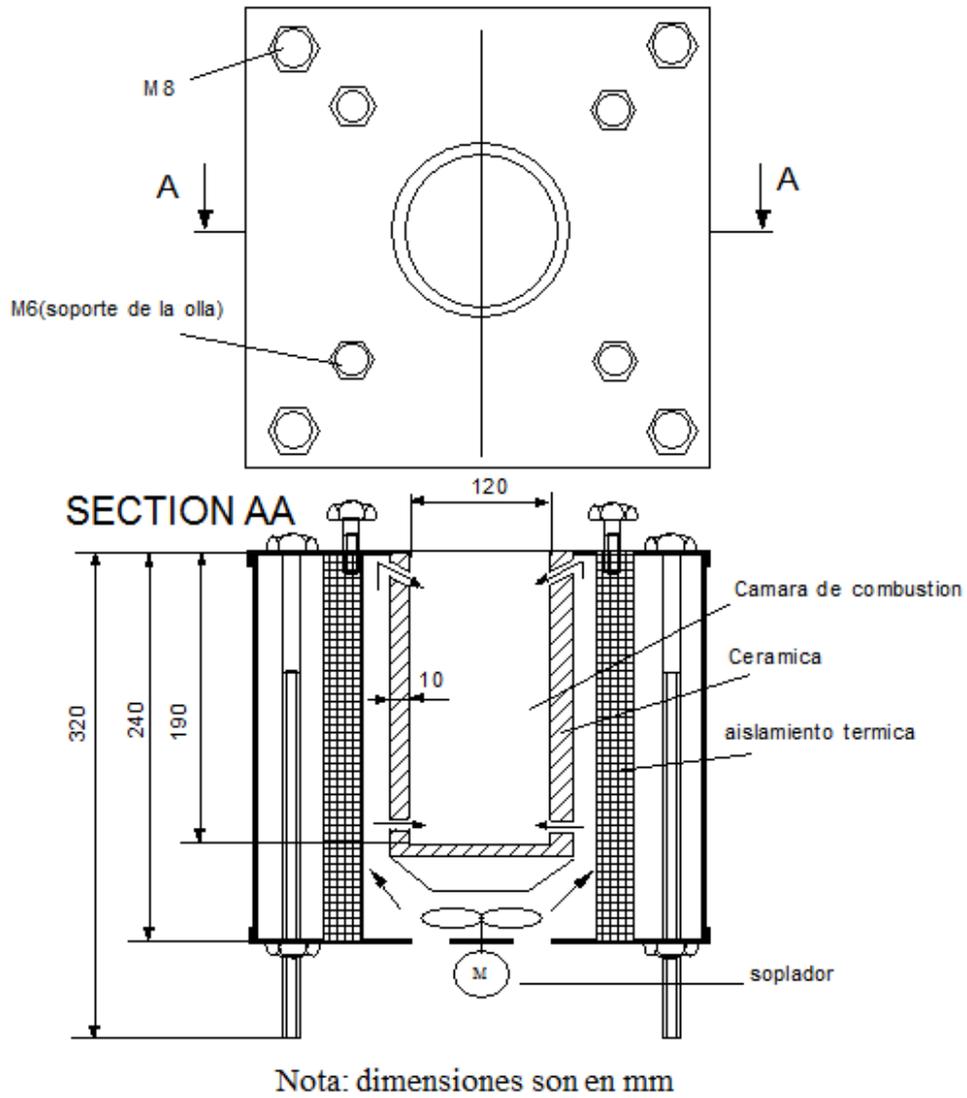


Fig. A.2 Dimensiones ICS-G1.

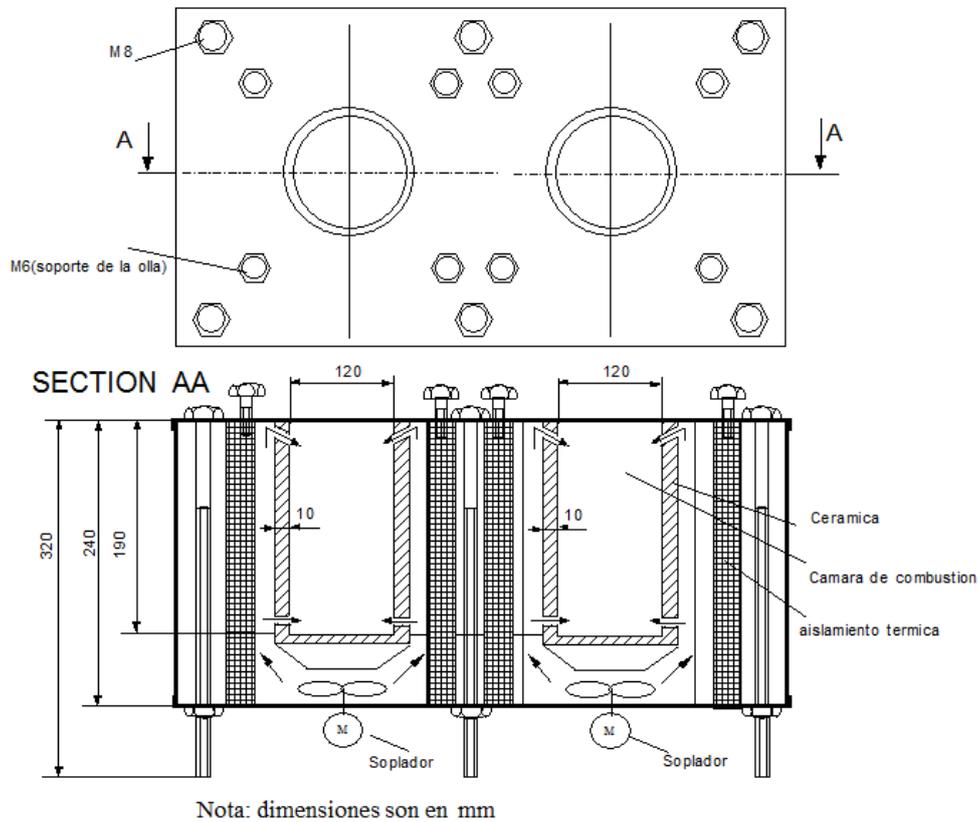


Fig.A3 Dimensiones de Estufa ICS-G2.

| Tabla A1. Estimación del coste de una estufa ICS-G1 |                                       |           |           |
|---|---------------------------------------|-----------|-----------|
| Nº  | Designación y características         | PU [€]    | PI [€]    |
| 01  | Soplador 1W-12V                       | 2         | 2         |
| 02  | Panel solar 5W-12V                    | 10        | 10        |
| 03  | Variador de velocidad 12V             | 2         | 2         |
| 04  | Batería de litio 9Ah /12V             | 9         | 9         |
| 05  | Aislamiento térmico de Lana de vidrio | 4         | 4         |
| 06  | Cámara de combustión                  | 5         | 5         |
| 07  | Carcasa metálica exterior             | 6         | 6         |
| 08  | Accesorios de mañero y fijación       | 2         | 2         |
| 09  | Coste de fabricación                  | 10        | 10        |
| 10  | Coste de venta TOTAL                  | <b>50</b> | <b>50</b> |

**Imprimido en España 2021**