

El Pennisetum Clandestinum como Fuente Energética para Aplicaciones Térmicas en el Ecuador

J. Ayala

Corporación Nacional de Telecomunicaciones - CNT EP

Resumen— Se presenta se describe la caracterización teórica de la combustión del Pennisetum Clandestinum desde el punto de vista energético y se describen sus aplicaciones térmicas en beneficio del Ecuador, considerando la disponibilidad de utilización de éste recurso natural renovable, que aporte a la matriz energética del país.

Palabras Clave— Biomasa, Energía, Pennisetum Clandestinum, Kikuyo, Combustión, Poder Calorífico.

1. INTRODUCCIÓN

La sociedad humana y la vida en el planeta Tierra se entrelazan y se encuentran en un punto crítico. Hoy en día el mundo depende de los combustibles de origen fósil para cubrir más del 80% de sus necesidades de energía. Actualmente la humanidad afronta amenazas y retos sin precedentes en materia de producción y generación de energía, con consecuencias socio-ambientales evidenciadas en el cambio climático debido al incremento de la concentración de los gases de efecto invernadero en la atmósfera, principalmente del dióxido de carbono (CO₂), así como una pobre de calidad del aire debido a sustancias contaminantes también concentradas en ella.

La alta concentración de CO₂ es causada mayoritariamente por la quema de combustibles fósiles, y en una menor medida por el cambio de actividades en el uso de la tierra. Sin embargo, las sociedades humanas pueden usar los conocimientos adquiridos, experiencia e innovación para crear nuevas oportunidades que aseguren una mejor calidad de vida para las generaciones presentes y futuras. Dentro de este contexto, la agricultura moderna puede jugar un papel primordial en la construcción de sociedades sostenibles, mediante la producción de alimentos y la producción y utilización de biomasa no alimenticia para la generación de energía, combustible y bioproductos, reduciendo así nuestra dependencia en combustibles fósiles.

El término biomasa hace referencia a toda la materia orgánica que proviene de árboles, plantas y desechos animales que pueden ser convertidos en energía; o las provenientes de la agricultura (residuos de maíz, café, arroz,

macadamia, etc.) y los residuos urbanos (aguas negras, basura orgánica y otros). Los procesos termoquímicos llevados a cabo para la transformación de la biomasa son: combustión, gasificación y pirólisis. Mediante estos procesos se obtienen productos intermedios que dan lugar a la producción de calor y electricidad [1].

A principios del siglo XX la mayoría de las fuentes de energía y productos industriales provenían de biomasa. Por ejemplo Henry Ford usaba etanol en su motor original, y el motor de Rudolph Diesel funcionaba con aceite de maní. Solo a partir de 1920 el petróleo se convirtió en el combustible dominante en los sectores del transporte e industrial. Por más de ocho décadas nuestras economías se han apoyado en el petróleo como una fuente de energía económica y confiable. Sin embargo, la dependencia en la costosa energía fósil se está convirtiendo en un factor limitante para muchas economías emergentes y desarrolladas. Desde los principios de la humanidad el hombre ha utilizado la biomasa para abastecer sus necesidades energéticas, utilizando la combustión de leña vegetal para producir fuego y abastecerse de calor, desde hace más de 1'000.000 de años A.C. donde la demanda de energía eran de 2.000 Kcal/día (Kilo caloría por día) por hombre [1]. En la Tabla 1 se describe la demanda de energía a través de las eras evolutivas.

Tabla 1: Demanda de energía de la humanidad a través de las eras evolutivas

Edad de la humanidad	Año	Demanda de energía/hombre
Hombre primitivo	1 000 000 años A.C.	2 000 Kcal/día
Hombre nómada	100 000 años A.C.	5 000 Kcal/día
Agricultura primitiva	5 000 años A.C.	12 000 Kcal/día
Agricultura avanzada	1 400 años A.C.	26 000 Kcal/día
Hombre industrializado	1 875 años D.C.	77 000 Kcal/día
Hombre moderno	2 000 años D.C.	300 000 Kcal/día

En general, la biomasa tiene el potencial de contribuir al suministro y seguridad energética. La Agencia

Internacional de Energía (AIE) estima que al comienzo de esta década el suministro de energía a nivel mundial era dominado por combustibles fósiles (388 EJ por año), con una contribución mucho menor de la energía nuclear (26 EJ) y la hidroeléctrica (28 EJ). La biomasa genera cerca de 45 ± 10 EJ, convirtiéndose en la fuente más importante de energía renovable. De acuerdo con la AIE el potencial promedio de la biomasa como fuente de energía es de 200 a 400 EJ a nivel mundial, y puede alcanzar hasta 1,100 EJ en el año 2050. Este potencial energético de la biomasa depende de factores que van desde la disponibilidad de residuos y tierra de menor calidad para cultivar plantas dedicadas a la producción energética hasta unos escenarios más optimistas donde la agricultura intensiva se concentra en regiones con clima óptimo y suelos de mejor calidad. La AIE estima que la demanda total de energía primaria (involucrando combustibles fósiles, fuentes de energía renovable y nuclear) podría variar entre 800 EJ y 1,400 EJ para el 2050 [1].

Los altos niveles de contaminación ambientales han motivado a los países de las Naciones Unidas a firmar el protocolo de Kioto sobre el cambio climático, que tiene por objeto reducir las emisiones de seis Gases de Efecto Invernadero (GEI) que causan el calentamiento global: dióxido de carbono (CO_2); gas metano (CH_4); óxido nitroso (N_2O); Hidrofluorcarbonos (HFC); Perfluorcarbonos (PFC) y Hexafluoruro de azufre (SF_6), en un porcentaje aproximado de al menos 5%, dentro del periodo que va desde el año 2008 al 2012, en comparación con las emisiones al año 1990. El protocolo fue inicialmente adoptado el 11 de diciembre de 1997 en Kioto Japón, pero entro en vigencia el 16 de febrero del 2005 y ratificado en el 2009. Estados Unidos de Norteamérica es el mayor emisor de GEI el cual no ha ratificado el protocolo [2].

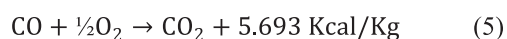
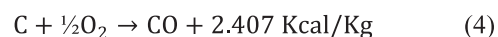
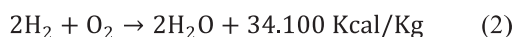
En promedio, en la mayoría de los países industrializados, la biomasa contribuye con menos del 10% del suministro total de energía generada por diversas fuentes energéticas. En países desarrollados como Suecia, la proporción aumenta entre el 20% y 30%. En los países que conforman la Organización para la Cooperación y el Desarrollo (OECD) se han instalado aproximadamente 18.4 GW (Gigavatios), lo cual es cerca de un 1% del total de la capacidad de generación de energía en el año 2000. La fundación World Wide Fund (WWF) afirma que la biomasa puede suministrar el 9% de la demanda de energía primaria global y el 24% de la electricidad requerida a nivel mundial para el año 2020. Actualmente y en términos relativos, el uso de la biomasa proveniente de cultivos y desperdicios animales genera seis veces más energía que los sistemas solares, geotermales y eólicos en los Estados Unidos de Norteamérica [1].

En el 2002, la biomasa suministró cerca del 47% de toda la energía renovable consumida en los Estados Unidos de Norteamérica. De acuerdo con la WWF y la Asociación de Biomasa Europea (European Biomass Association), los países industrializados tienen más de 1 500 millones de hectáreas de cultivos y bosques, de las cuales cerca de 460 millones de hectáreas son tierras cultivables. Si un promedio de 1,25 millones de hectáreas de tierra cultivable fueran convertidos en cultivos para la energía, la biomasa podría producir un 15% de la energía requerida en los países de la OECD. Esta cantidad de hectáreas representa tan solo un poco más del 2% del total de la tierra en los países industrializados [1].

Se define como combustión como una reacción química relativamente rápida, mediante la que se combinan el oxígeno del aire (comburente) con los diferentes elementos oxidables que contiene el combustible, originándose en el proceso desprendimiento de calor [3].

[1 EJ (ExaJoules)= 10^{18} J (Joule); 4187 J = 1 Kcal (Kilo caloría); 1 KWh (Kilo vatio hora) = $3,6 \times 10^6$ J]

Sus principales reacciones químicas se describen en las siguientes expresiones:



Donde:

C = Carbono.

O_2 = Oxígeno.

H_2 = Hidrógeno.

S = Azufre.

CO_2 = Dióxido de Carbono, 1 Kg de C producirá 8.100 Kcal.

H_2O = Agua, 1 Kg de H_2 producirá 34.100 Kcal.

SO_2 = Dióxido de Azufre, 1 Kg de S producirá 2.200 Kcal.

CO = Monóxido de Carbono, 1 Kg de C producirá 2.407 Kcal.

CO_2 = Dióxido de Carbono, 1 Kg de C producirá 8.100 Kcal.

En el siglo pasado, las plantas de energía que empleaban biomasa eran vistas como una forma para

deshacerse de materia orgánica, lo que resultó en la instalación de plantas de baja eficiencia. En las últimas décadas y debido a las presiones que ha generado el incremento en los precios de combustibles fósiles, se han desarrollado plantas más eficientes para su combustión. Este nuevo desarrollo tecnológico de la biomasa permite que la eficiencia de combustión de la biomasa sea similar a la que presentan los nuevos sistemas de combustión basados en el uso de combustibles fósiles. De acuerdo con la Asociación Europea de la Industria de la Biomasa (European Biomass Industry Association) la combustión directa de la biomasa sólida incluye sistemas que varían desde pequeñas estufas caseras de 1 a 10 KW (Kilovatio) hasta grandes calderas usadas en plantas de energía y cogeneración-CHP mayor a 5 MW (Megavatio). Las calderas de tamaño pequeñas incluyen sistemas de 10 a 50 KW utilizados principalmente en hogares para calefacción. Las calderas de tamaño mediano de 50 a 150 KW se utilizan en unidades multi-familiares o en sistemas de calefacción de edificios. Las grandes calderas de 150 a 1 MW se usan en la generación de calor a nivel distrital [1].

Plantas que utilizan la combustión de biomasa a escalas mayores de 10 MW operan en Norte América y en los países europeos del norte. Por ejemplo, un estudio de 20 plantas de biomasa ubicadas en Estados Unidos, Canadá y Finlandia muestra que la capacidad asociada de instalación de generación de electricidad varía entre 10 a 50 MW, y la cantidad de electricidad generada anualmente desde estas plantas está en un rango de 53 a 560 GWh (Gigavatios hora). Estas plantas han sido construidas para proveer energía a fábricas, industrias manufactureras y áreas urbanas, y utilizan los residuos forestales, agrícolas y de madera como combustibles. Las plantas de biomasa con co-combustión de carbón alcanzan niveles de calor equivalentes a un poco menos de 11 000 BTU/KWh (BTU=British Thermal Unit; 1 BTU = 1 055,056 J) en la porción de combustible de biomasa, comparada con 9 818 BTU/KWh producidas por solamente el carbón. Una ventaja del proceso de co-combustión de la biomasa con fuente fósil de combustible es el establecimiento de estaciones generadoras de electricidad de gran escala mayor a 100 MW, en lugares donde hay un acceso limitado a las fuentes de biomasa [1].

Actualmente, la combustión de residuos agrícolas, forestales y desechos municipales contribuye a la producción de bioenergía en la industria de pulpa y papel, del acero y aluminio, invernaderos y también para áreas residenciales. En Canadá y USA, la combustión de residuos agrícolas como el Pasto Varilla o Erguido (*Panicum Virgatum*), el cual

produce gran cantidad de biomasa, solo o combinado con otras fuentes de biomasa ha despertado interés entre la industria de invernaderos y en granjas individuales. El establecimiento y la demostración de plantas pilotos para la producción de bioenergía en base a la combustión de biomasa de tamaño pequeño y grande, son clave para el desarrollo de esta industria en áreas rurales. Estas plantas de bioenergía ayudan también a compensar las emisiones de GEI producto del consumo de electricidad derivada del uso de combustibles fósiles. Estas plantas generadoras de energía entregan los mismos beneficios asociados con la “Energía Distribuida”, suministrando electricidad áreas rurales o tradicionalmente remotas.

El aumento de la capacidad de cogeneración de bioenergía en base a biomasa requiere cantidades de producción adicional de esta materia prima. Una opción para aumentar la cantidad requerida de materia prima es mejorando la eficiencia de secado y densificación de la biomasa antes de su combustión. Igualmente, los residuos forestales que se dejan en el suelo forestal y los residuos de los cultivos agrícolas que quedan después de las cosechas en las tierras cultivadas son recursos importantes de combustibles, por ejemplo la cascarilla de arroz. En general, la biomasa y los residuos de desperdicios son considerados fundamentalmente para uso local como combustibles con bajas densidades de energía comparados con los combustibles líquidos. Es así que los costos de transporte de la biomasa se vuelven significativos más allá de los 30 Km, y son usualmente prohibidos más allá de los 160 Km. En cambio, las comunidades con fácil acceso a fuentes de biomasa se pueden beneficiarse enormemente de las tecnologías de cogeneración para suplir la demanda de energía calórica y eléctrica. La tasa de adopción de estas tecnologías se puede incentivar y aumentar mediante el establecimiento de plantas piloto en varias regiones de los países para dar suficiente confianza a los consumidores, varios niveles de gobierno, agencias reguladoras, proyectos de desarrollo e instituciones financieras y aseguradoras.

Es evidente que muchos sectores de la economía mundial se beneficiarán de las tecnologías modernas de combustión para la bioenergía. En las áreas con menos abundancia de biomasa agrícola y forestal, la co-combustión con otras fuentes de biomasa (por ejemplo: residuos de desperdicios sólidos municipales) pueden ser alternativas viables para suplir parte de la energía industrial. Dentro de los beneficios económicos de la co-combustión se incluyen bajos costos operacionales y una mayor seguridad en materia energética. Obviamente, y desde un punto de vista de sostenibilidad ambiental,

las plantas de energía en base solo al uso de la biomasa son preferibles. Los sistemas de combustión flexibles de biomasa adquieren importancia en regiones geográficas que tienen a su disposición un rango variado de residuos agrícolas y forestales y otras fuentes como los residuos municipales, grano destilado, o biomasa con alto contenido de lignina [1]. Hoy en día, los sistemas avanzados de energía basados en el uso de biomasa deben cumplir con altas eficiencias de conversión y límites estrictos de emisión de gases a la atmósfera.

En el Ecuador, la utilización de la biomasa como fuente de energía se encuentra limitada únicamente para abastecer necesidades térmicas, muy puntualmente la leña vegetal se la utiliza en los sectores rurales como combustible para la cocción de alimentos a través de la combustión directa. El sector industrial ecuatoriano emplea biomasa para abastecer la demanda de procesos térmicos empleando calderas de combustión directa, la biomasa más utilizada es el carbón vegetal. Los combustibles derivados del petróleo en el Ecuador es la fuente principal de energía para abastecer los procesos térmicos y eléctricos en el sector industrial, el segmento de biomasa con mayor desarrollo en el Ecuador, es el de la caña de azúcar, la cual se emplea para generar bioproductos como es el biodiesel. Se han determinado que el Ecuador dispone de altos potenciales energéticos basados en biomasa principalmente de caña de azúcar, cascarilla de arroz, pasto, carbón vegetal, leña, piñón; aunque en las dos últimas décadas no han existido programas ni estrategias públicas ni privadas que permitan la importación, tecnificación ni el desarrollo de la tecnología de biomasa que aporte sustentablemente en la matriz energética del Ecuador.

En este trabajo se determinarán las características termo-físicas del *Pennisetum Clandestinum* que es biomasa de origen vegetal, y sus posibles aplicaciones térmicas, que permitan a largo plazo aportar a la matriz energética del Ecuador.

2. EL PENNISETUM CLANSDESTINUM

El *Pennisetum Clandestinum* es un pasto comúnmente conocido como “Kikuyo”, cuyo nombre viene de los Kikuyus, una etnia del este de África, de la región donde el Kikuyo es originario. Este pasto fue introducido en Sudamérica alrededor de 1930, con el fin de mejorar los potreros para la cría de ganado. Ha demostrado ser una de las plantas más invasoras que han llegado al Ecuador, donde se ha propagado por casi todos los pastizales y campos fértiles, desplazando a la mayor parte de las hierbas que crecen en estos lugares [4].

En la Figura 1. se muestra el aspecto físico del pasto *Pennisetum Clandestinum* predominante en el Ecuador.



Figura 1: Pasto *Pennisetum Clandestinum*

Anteriormente a su introducción, en los potreros de las montañas de Sudamérica se tenían un aspecto completamente diferente al actual, estando dominados en su mayor parte por pastos formadores de Macollas y no formando césped por medio de rizomas procedentes del Kikuyo. Por ejemplo, en las praderas de la sierra andina era dominante el pasto nativo “*Agrostis Perennans*”, junto con otras especies. Se cree que la introducción del *Pennisetum Clandestinum* y el subsiguiente cambio en los ecosistemas de potrero con macollas a potrero denso de Kikuyo, ha causado la casi completa extinción de las poblaciones de alondras (*Eremophila Alpestris Peregrina*) y atrapamoscas (*Muscisaxicola Maculirostris Niceforoi*), subespecies de aves endémicas de la sierra andina [4].

Algunas especies de aves, como los copetones (*Zonotrichia Capensis*), se alimentan con las semillas de Kikuyo. El Kikuyo puede reproducirse por medio de semillas, pero su principal método de propagarse es por medio de sus rizomas, cualquier trozo de estos puede desarrollarse hasta formar otra gran mata de Kikuyo.

2.1. Estimación del *Pennisetum Clansdestinum* en el Ecuador

En el Ecuador el *Pennisetum Clandestinum* es uno de los cultivos que ocupa grandes extensiones de terreno, en zonas no productivas, de acuerdo al Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC) al 2010, en el Ecuador el pasto natural a nivel nacional ocupaba una superficie de 1 509 970,00 Hectáreas (Has.), mientras el cultivo de pasto a nivel nacional ocupaba una superficie de 3 409 953,00 Has. Solamente en la provincia de Pichincha el pasto natural ocupaba una superficie de 109 676,00 Has., mientras el cultivo de pasto ocupaba una superficie de 195 900,00 Has. [5].

Tabla 2. Uso de suelo con pasto en el Ecuador al 2010

Ámbito	Datos de uso en hectáreas (Has.)		Total
	Pastos cultivados	Pastos naturales	
Total Nacional	3 409 953,00	1 509 971,00	4 919 924,00
Región Sierra	989 075,00	1 145 494,00	2 134 569,00
Región Costa	1 638 260,00	243 339,00	1 881 599,00
Región Oriental	782 618,00	121 138,00	903 756,00
Región Sierra			
Azuay	59 986,00	261 013,00	320 999,00
Bolívar	130 862,00	89 437,00	220 299,00
Cañar	39 623,00	64 296,00	103 919,00
Carchi	25 149,00	69 891,00	95 040,00
Cotopaxi	125 541,00	48 715,00	174 256,00
Chimborazo	74 959,00	92 360,00	167 319,00
Imbabura	51 941,00	46 434,00	98 375,00
Loja	95 227,00	335 430,00	430 657,00
Pichincha	195 901,00	109 676,00	305 577,00
Tungurahua	39 358,00	25 512,00	64 870,00
Santo Domingo de los Tsachilas	150 527,00	2 731,00	153 258,00
Región Costa			
El Oro	231 282,00	21 040,00	252 322,00
Esmeraldas	276 739,00	5 163,00	281 902,00
Guayas	221 097,00	99 859,00	320 956,00
Los Ríos	89 981,00	16 095,00	106 076,00
Manabí	807 199,00	70 000,00	877 199,00
Santa Elena	11 962,00	31 182,00	43 144,00
Región Oriental			
Nororiente	202 066,00	14 692,00	216 758,00
Centro-Suroriente	580 552,00	106 446,00	686 998,00

El Pennisetum Clandestinum es una gramínea de origen africano, de mayor presencia, de las más comunes y mejor adaptadas en las zonas de clima frío, a una altitud entre 1 000 y 3 200 msnm. Se adapta a cualquier tipo de suelo, pero no prospera bien si éstos son muy pobres, Resiste especialmente a la sequía y su óptima producción se obtiene en suelos de alta fertilidad con un mínimo de 750 mm de precipitación anual. Es una planta que se extiende superficialmente. Posee rizomas gruesos y succulentos, que pueden alcanzar hasta un metro de longitud. Se propaga vegetativamente por medio de estolones. Las hojas alcanzan de 5 a 20 cm de largo, y

de 8 a 15 mm de ancho. Algunos tallos crecen erectos (50 a 60 cm). Se usa para pastoreo, ensilaje, heno, prados y campos de deporte. Cuando se hace un mal manejo de este pasto, por ejemplo un sobrepastoreo, existe el riesgo de invasión de la maleza conocida como lengua de vaca. El Pennisetum Clandestinum es un cultivo puro, sin leguminosas asociadas, responde bien a la aplicación de nitrógeno; en algunos casos, se ha duplicado su producción con dos bultos de este elemento por hectárea. En suelos bajos de fósforo y potasio, el Kikuyo presenta buena respuesta a la aplicación anual de fertilizantes, a razón de 100 a 150 Kg de superfosfato triple por hectárea, y 80 a 90 Kg de cloruro de potasio por Has. [5].

Cuando el Pennisetum Clandestinum se establece después de un cultivo que ha sido abonado adecuadamente (rotación papa-pastos), se puede mantener una buena producción sin fertilizar, durante dos o tres pastoreos, siempre que se cuente con humedad adecuada. Con la aplicación de agua adicional, es posible mantener una producción alta en épocas secas, especialmente cuando se fertiliza. Se debe hacer riego cada 10 días. El Pennisetum Clandestinum es apto para tener un pastoreo continuo, con períodos de descanso entre cinco y ocho semanas, dependiendo de la humedad. Se debe pastorear hasta una altura de 5 a 10 cm.

El Pennisetum Clandestinum se debe manejar adecuadamente si se quiere obtener una buena producción y una capacidad de carga alta. En ocasiones, cuando ha sido mal manejado, se acolchona y la producción se rebaja significativamente. Por tanto, económicamente resulta beneficioso renovarlo. La renovación es una práctica que consiste en pastorear bajo el potrero, sacar los animales y aplicar cal al voleo, escarificar con una renovadora de praderas, arado de cincel o rotovator de cuchillas planas, fertilizar y sembrar con carretones, alfalfa y/o Ryegrasses. La producción de carne y leche se ha evaluado en varios ensayos con animales en pastoreo. Con vacas de leche en pastoreo rotacional, se obtuvo para el Pennisetum Clandestinum la mayor capacidad de carga, al compararlo con Ryegrass inglés y Orcho, con 3,75 animales por hectárea y una producción diaria promedio, por vaca, de 15 Kg de leche, con 4% de grasa [5].

2.2. Composición Química del Pennisetum Clandestinum

En la Tabla 3 se presenta la composición química del Pennisetum Clandestinum obtenida de un estudio minucioso desarrollado en el 2012, en el laboratorio de Energías Renovables de la Escuela Politécnica del Ejército, Sangolquí, Ecuador, empleando un sistema térmico con capacidad de 60 000 Kcal/hora.

Tabla 3: Composición química del Pennisetum Clandestinum

Componente	%
Carbono	34,70
Hidrógeno	5,10
Nitrógeno	0,40
Oxígeno	33,10
Azufres	0,50
Cenizas (Sílice 94.5%)	7,80
Humedad (H ₂ O)	18,40

Como se puede ver, existen compuestos en una proporción ínfima como el nitrógeno y los sulfuros, y otros que son de inertes en la reacción química de la combustión como las cenizas. Así que solo se tendrán en cuenta el carbono, el hidrógeno y el oxígeno para el análisis de los procesos de combustión, cuyos porcentajes se dividen por el peso molecular de cada una para hallar su cantidad molar, las cuales aparecen en la Tabla 4.

Tabla 4: Composición molecular del Pennisetum Clandestinum

Componente	Mol
Carbono	2,8890
Hidrógeno	5,0600
Oxígeno	2,0688

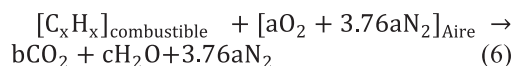
Luego, se divide estas cantidades por la menor de ellas, en este caso el oxígeno, para obtener la relación atómica que guardan los elementos entre sí, la cual reducida a cantidades enteras por razones estequiométricas llega a ser C:H:O = 1:2:1. Estos valores corresponden al carbono equivalente, al hidrógeno equivalente y al oxígeno equivalente. Sin embargo, en la estequiometría de la combustión el oxígeno equivalente debe ser sustraído del hidrógeno equivalente, y el hidrógeno restante se denomina hidrógeno neto [6]. Entonces, el carbono equivalente y el hidrógeno neto es la cantidad de carbono e hidrógeno disponibles para la combustión. Por lo tanto, la relación quedaría C:H:O = 1:1:0, y la fórmula empírica equivalente del Pennisetum Clandestinum será CH₁, aunque por comodidad se referirá en este artículo como CH.

No obstante, se debe hacer claridad en el hecho de que ésta no es la fórmula molecular del Pennisetum Clandestinum sino sólo un estimativo teórico de la misma. Se recurre a este equivalente ya que no se dispone del peso molecular del Pennisetum Clandestinum que permita calcular la fórmula molecular. Esto debido a que el Pennisetum

Clandestinum no es propiamente un compuesto químico sino un aglomerado de muchos compuestos. A partir de ésta fórmula se puede hacer un estudio cuantitativo de la reacción de la combustión del Pennisetum Clandestinum.

2.3. Análisis Estequeométrico de la Combustión del Pennisetum Clandestinum

La estequiometría es la rama de la química que estudia las propiedades de los componentes involucrados en una reacción química. En este caso se estudia la combustión de una reacción de oxidación en la cual se libera la energía química almacenada en los enlaces moleculares del combustible. Una reacción de combustión de cualquier combustible del tipo C_xH_y tiene una ecuación química de la siguiente forma:



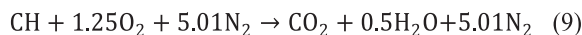
Donde el valor del coeficiente a –cantidad molar estequiométrica de oxígeno– se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$a = (x + y)/4 \quad (7)$$

Aplicando la fórmula equivalente del Pennisetum Clandestinum a la ecuación 6 y a la ecuación 7, se obtiene la ecuación química para la combustión del Pennisetum Clandestinum ó



Mediante el balance atómico de cada uno de los elementos presentes en los compuestos de la reacción se encuentran los diferentes coeficientes. Después de realizar los respectivos cálculos y reemplazando estos valores en la ecuación 8, ésta última toma la forma:



Ahora la relación aire combustible –la cantidad de aire necesaria por unidad molar de combustible para obtener una reacción química estequiométrica– se define por:

$$(A/C)_{\text{esteq}} = \left(\frac{m_{\text{aire}}}{m_{\text{combustible}}} \right) = \frac{4.76a}{1} \frac{MW_{\text{aire}}}{MW_{\text{combustible}}} \quad (10)$$

Reemplazando el valor del peso molecular del aire, del Pennisetum Clandestinum y la cantidad molar estequiométrica de oxígeno en la ecuación 10 se obtiene:

$$(A/C)_{\text{esteq}} = \frac{(4,76)(1,25)(28,8491)}{(13,0189)} = 13,185 \quad (11)$$

Lo cual indica que por cada unidad de masa de combustible se necesita suministrar un poco más de 13 unidades de masa de aire para lograr una reacción de combustión tipo estequiométrica.

2.4. Análisis Térmico de la Combustión del Pennisetum Clandestinum

2.4.1. Poder Calorífico

De acuerdo a la investigación desarrollada en el 2012, en el laboratorio de Energías Renovables de la Escuela Politécnica del Ejército, Sangolquí, Ecuador, empleando un sistema térmico con capacidad de 60.000 Kcal/hora para la caracterización termo física del Pennisetum Clandestinum, donde previamente se ha procedido a realizar un proceso de secado de la biomasa vegetal a un 50% de su estado inicial de humedad, se ha determinado que el poder calorífico del Pennisetum Clandestinum en condiciones óptimas de combustión (con un 9,2% de humedad H₂O) es de 14823.682 KJ/Kg, No obstante para calcular la temperatura adiabática de llama se necesita convertir este valor en función de la cantidad molar debido a que se está trabajando con reacciones químicas basadas en dicha variable. Por lo tanto, haciendo la conversión el poder calorífico resulta ser:

$$h_1 = 14823,682 \frac{\text{J}}{\text{g}} \frac{[1(12,011)+(1,0079)]\text{g}}{1\text{mol de CH}} \quad (12)$$

$$h_1 = 14823,682 \frac{\text{J}}{\text{g}} \frac{13,0189\text{g}}{1\text{mol de CH}}$$

$$h_1 = 192,988 \frac{\text{KJ}}{\text{mol}}$$

2.4.2. Temperatura Adiabática de Llama a Volumen Constante

Utilizando la primera ley de termodinámica para volumen constante se define la temperatura adiabática de llama para el proceso de combustión que se lleva a cabo en el interior de un quemador de biomasa experimental con capacidad de 60 000 Kcal/hora. La temperatura adiabática se calcula suponiendo que la combustión es completa, que no se transfiere calor desde la cámara de combustión y que los productos no se disocian en otras especies químicas. Cada uno de estos efectos tiende a reducir a reducir la temperatura de combustión adiabática. Para estimar el valor teórico, se utiliza el procedimiento en el cual el número total de moles de los productos de la combustión representan un número total de moles de nitrógeno (Tadiabática N₂= 3 000°K [7]), determinándose que la temperatura

de combustión adiabática máxima posible para el Pennisetum Clandestinum es de 2727 °C.

2.4.3. Calor de Combustión

Se calcula con la siguiente expresión:

$$Q = mc \cdot HR \quad (13)$$

Donde:

mc es la masa del combustible en Kg.

HR es equivalente al Poder Calorífico en KJ/Kg.

Para mc = 14 Kg se tiene:

$$Q = 14\text{Kg} \cdot 14823,682 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

$$Q = 207531,548 \text{ KJ}$$

La densidad térmica QE producida por la combustión de 14 Kg/h, con una humedad del 9,2% y un poder calorífico de 14823.682 KJ/Kg, se determina con la siguiente expresión:

$$QE = Q/3600 \quad (14)$$

Debido a que 1 KWh (Kilo vatio hora) = 3,6×10⁶ J, se tiene:

$$QE = \frac{207531,548}{3600} \text{ KWh}$$

$$QE = 57,64 \text{ KWh}$$

El aporte energético del combustible es 57,64 KW térmicos, al combustionar una masa de 14 Kg de Pennisetum Clandestinum. Si esta energía se utiliza para la producción de electricidad en la cual sus eficiencias varían del 25% al 35% [8]. Se tiene:

$$Q_e = 0,3 \cdot QE \quad (15)$$

$$Q_e = (0,3) \times 57,64 \text{ KWh}$$

$$Q_e = 17,29 \text{ KWh}$$

Es necesario indicar que este proceso de aprovechamiento energético de la biomasa vegetal empleando el Pennisetum Clandestinum, tendría como principal aplicación la producción de electricidad a partir de centrales eléctricas de biomasa. En este campo el Ecuador no ha incursionado debido a la falta de tecnología de explotación de nuevas fuentes de energía.

3. APLICACIONES TÉRMICAS

Se ha descrito en la Tabla 1, el uso de suelo con pasto en el Ecuador de acuerdo a los resultados presentados en el INEC al 2010. En el Ecuador la el pasto parcialmente se encuentra utilizado para actividades de alimentación a sector ganadero orientado a la producción de leche y cárnicos, quedando sub utilizado la utilización de ésta biomasa, se calcula que únicamente el 5% de los pastos se utilizan para el sector ganadero [5].

Para determinar el potencial energético del Pennisetum Clandestinum en el Ecuador se realizan las siguientes consideraciones:

- Del total de área disponible de Pennisetum Clandestinum en el Ecuador se utilizará únicamente el 10%.
- Se consideran 5 cm promedio de longitud del Pennisetum Clandestinum, durante el proceso de cosecha, aunque normalmente este entre 10 a 20 cm de largo, esto en función del peor escenario posible.
- Una tonelada métrica (TM) equivalen a 2,83 m³ de volumen total recolectado en el proceso de cosecha.
- 1 000 Kg equivalen a una tonelada métrica.
- Por el proceso de briquetado ó compactación de la Biomasa Cosechada (BC) el volumen total utilizable será únicamente del 10% del volumen cosechado.

A continuación se desarrolla un ejemplo de cálculo del potencial eléctrico por año que se podría generar empleando Pennisetum Clandestinum a través de procesos de combustión específicamente para la provincia de Pichincha, y los valores resultantes proyectados a nivel nacional se los describen en la Tabla 5, descritos por cada región.

Empleando las ecuaciones (13), (14) y (15) se tiene:

$$Q_e = 0,3 \cdot Q_E \quad \text{KWh}$$

$$Q_e = 0,3 \cdot \frac{Q}{3600} = 0,3 \cdot \frac{mc \cdot HR}{3600} \quad \text{KWh}$$

$$mc = [\text{Biomasa Cosechada (BC)}] \cdot (0,1) \quad \text{Kg}$$

$$BC = \left[\frac{\text{Volumen Toneladas métricas (TM)}}{2,83} \cdot 1000 \right] \quad \text{Kg}$$

$$BC = \frac{[\text{Área útil} \cdot \text{longitud del Pasto}] m^3}{2,83} \cdot 1000 \quad \text{Kg}$$

$$\text{Área útil} = 10\% \text{ del Área total disponible } m^2$$

$$\text{Área útil} = (0,1 \times 305.577,00) \times 10.000 \quad m^2$$

$$\text{Área útil} = 305.577.000,00 \quad m^2$$

$$mc = \left[\frac{[305.577.000,00 \cdot x(0,05)] m^3}{2,83} \cdot 1000 \right] \times 0,1 \quad \text{Kg}$$

$$mc = 539.888.692,58 \quad \text{Kg}$$

$$Q_e = 0,3 \cdot \frac{(539.888.692,58) \cdot (14823.682)}{3600} \quad \text{KWh}$$

$$Q_e = 666.928.191,20 \quad \text{KWh}$$

$$Q_e = \frac{666.928.191,20}{(24) \cdot (24) \cdot (12) \cdot (1.000)} \quad \text{MWe por año}$$

$$Q_e = 96,49 \quad \text{MWe por año}$$

Tabla 5. Cantidad de Energía generada proyectada empleando Pennisetum Clandestinum en el Ecuador

Ámbito	Área Total disponible (Has)	Total de Biomasa utilizable (Kg)	Energía generada por año (MWe)
Total Nacional	4 919 924,00	8 692 445 229,68	1 553,47
Región Sierra	2 134 569,00	3 771 323 321,55	673,99
Región Costa	1 881 599,00	3 324 379 858,66	594,11
Región Oriental	903 756,00	1 596 742 049,47	285,37
Región Sierra			
Azuay	320 999,00	567 136 042,40	101,36
Bolívar	220 299,00	389 220 848,06	69,56
Cañar	103 919,00	183 602 473,50	32,81
Carchi	95 040,00	167 915 194,35	30,01
Cotopaxi	174 256,00	307 872 791,52	55,02
Chimborazo	167 319,00	295 616 607,77	52,83
Imbabura	98 375,00	173 807 420,49	31,06
Loja	430 657,00	760 878 091,87	135,98
Pichincha	305 577,00	539 888 692,58	96,49
Tungurahua	64 870,00	114 611 307,42	20,48
Santo Domingo de los Tsachilas	153 258,00	270 773.851,59	48,39
Región Costa			
El Oro	252 322,00	445 798 586,57	79,67
Esmeraldas	281 902,00	498 060 070,67	89,01
Guayas	320 956,00	567 060 070,67	101,34
Los Ríos	106 076,00	187 413 427,56	33,49

Ámbito	Área Total disponible (Has)	Total de Biomasa utilizable (Kg)	Energía generada por año (MWe)
Manabí	877 199,00	1 549 821 554,77	276,98
Santa Elena	43 144,00	76 226 148,41	13,62
Región Oriental			
Nororiente	216 758,00	382 964.664,31	68,44
Centro-Suroriente	686 998,00	1 213 777 385,16	216,93

Las aplicaciones térmicas del Pennisetum Clandestinum aplicables al Ecuador considerando la no afectación al sector ganadero son:

- Generación eléctrica con un potencial aproximado de 1 553,47 MWe por año, casi similar a la potencia generada por el proyecto Coca Codo Sinclair que generará 1 600 MWe empleando energía hídrica.
- Generación de energía calórica para procesos de calefacción y refrigeración con un potencial estimado de 5 178,35 MW térmicos, con aplicaciones en el sector industrial y residencial.

4. CONCLUSIONES

1. El Pennisetum Clandestinum es una biomasa de origen vegetal abundante en el Ecuador, la cual se encuentra sub utilizada y destinada únicamente para procesos de alimentación al sector ganadero, con una superficie estimada de 4 919 924,00 Has. a nivel nacional.
2. El poder calorífico del Pennisetum Clandestinum en condiciones óptimas de combustión (con un 9,2% de humedad H₂O) es de 14823.682 KJ/Kg, a una temperatura adiabática de combustión máxima posible de 2 727 °C.
3. La capacidad de generación estimada del Pennisetum Clandestinum es de 1 553,47 MWe por año, asumiendo que únicamente se utiliza el 10% de la superficie total disponible y el proceso de combustión emplea únicamente el 10% del volumen total cosechado debido a procesos de briquetado, considerando condiciones normales de combustión.
4. En el Ecuador en la actualidad no se encuentra desarrollada la tecnología de biomasa, orientada a las aplicaciones térmicas, únicamente se han desarrollado estudio a nivel de laboratorio, en tesis de pregrado y postgrado.

5. La combustión de biomasa puede ser utilizada para satisfacer las necesidades de calefacción y electricidad, para lo cual deberán utilizarse calderas de biomasa.
6. El aporte energético proyectado de la biomasa a través de la utilización del Pennisetum Clandestinum, contribuirá a la Matriz Energética del Ecuador a satisfacer la demanda de energía, a marcar el camino a la no dependencia de los combustibles de origen fósil, a su vez a portar a la reducción de las emisiones de gases de efectos invernaderos, considerando que el Ecuador a tarificado el protocolo de Kioto en el 2009.
7. En el 2012 a nivel nacional se evidencio la quema de bosques en más de 14 000 Has., lo cual incremento las emisiones del gases de efecto invernadero, demostrando que los pastizales del Ecuador no son aprovechados para la generación de energía y al contrario sus implicaciones afectaron directamente en el ámbito ambiental y económico al país.

5. RECOMENDACIONES

Iniciar en el corto y mediano plazo la generar de proyectos pilotos a nivel nacional, que fomente la utilización de biomasa en todas sus variedades, en procesos térmicos mediante políticas de inversión pública y privada, que a largo plazo a porte directamente a la matriz energética del Ecuador.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por su grandeza. A mi familia por ser mi fuerza motriz para emprender mis actividades diarias, a mi Madre por su amor y dedicación. Al Ing. Edgar Cabrera Cuenca por su amistad y conocimientos aportados en la investigación. En especial al Máster José Guasumba investigador de la ESPE por facilitar el equipamiento utilizado en la caracterización del Pennisetum Clandestinum. Se agradece a la Corporación Nacional de Telecomunicaciones CNT EP en especial al Ing. César Regalado Iglesias por brindar las facilidades tecnológicas y físicas para llevar a cabo este trabajo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Carlos M. Monreal. (2008). “La utilización de los residuos agrícolas y otros desechos para la producción de bioenergía, biocombustibles y bioproductos”. Environmental Health/Energy, pp. 11-32, Ottawa, Canada.

- [2] Naciones Unidas. (2010). “Protocolo de Kioto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático”, Nueva York, Estados Unidos de Norteamérica.
- [3] Van Wylen, G.J. & Sonntag. (1990). “Fundamentos de Termodinámica”, pp. 65 - 95. DF México, México.
- [4] INIAP Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias. (2004). “Manual Agrícola de los principales cultivos del Ecuador”, pp. 78 - 85. Quito, Ecuador.
- [5] INEC Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. (2010). “Estadísticas agropecuarias/ uso del suelo 2010”. <http://www.inec.gob.ec/estadisticas/>, Quito, Ecuador.
- [6] Glassman Irving. (1996). “Combustion”. 3era Edición, San Diego, Estado Unidos de Norteamérica.
- [7] CENGEL, Y. (2009), “Ter” 6ta Edición. Mc Graw Hill. DF México, México
- [8] Mario Ortega Rodriguez. (2000). “Energías Renovables, pp. 199. Madrid, España”



Jaime Enrique Ayala Jácome.-
Nació en Quito, Ecuador, en 1978. Recibió su título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones en 2004, en la Escuela Politécnica Nacional. Actualmente se encuentra desarrollando la tesis de Máster

en Energía Renovables. Trabaja en la Corporación Nacional de Telecomunicaciones CNT E.P. como Analista de Proyectos de la Regional Siete, sus campos de investigación están relacionados con la biomasa, sistemas de generación fotovoltaica y de las energías renovables en general.