UNIVERSIDAD NACIONAL DE UCAYALI

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES Y AMBIENTALES
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

REDUCCIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO, RECICLANDO LOS RESIDUOS SÓLIDOS DE LA TRANSFORMACIÓN PRIMARIA DE LA MADERA *Terminalia oblonga (Yacushapana)*; **VÍA GASOGENACIÓN, A NIVEL DE PROTOTIPO, EN EL ASERRADERO JORGE ROLANDO SAC DEL DEPARTAMENTO DE UCAYALI, 2015.**

TESIS

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO AMBIENTAL

EDITH MAGNOLIA VALDIVIESO SOTO

PUCALLPA – PERÚ

2018

ACTA DE APROBACION

La presente Tesis fue aprobada por el jurado calificador de la Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales de la Universidad Nacional de Ucayali, para obtener el Título Profesional de Ingeniero Ambiental.

Dr. Carlos Panduro Carbajal .....

PRESIDENTE

M. Sc. Gladys Rojas Gutiérrez .....

MIEMBRO

M. Sc. Cesar Morí Montero .....

MIEMBRO

M.Sc. Melchor Herbert Dolmos Castro .....

ASESOR

Bach. Edith Magnolia Valdivieso Soto .....

TESISTA

DEDICATORIA

A Dios por ser mi guía y fortaleza espiritual en cada momento y etapa de mi vida, a mis hijas por ser la fuerza que me impulsaron a lograr mis objetivos, a mi esposo por su ayuda y disponibilidad de tiempo, a mis hermanos y a mi papá por el apoyo moral.

.

AGRADECIMIENTO

Mis más sinceros agradecimientos:

- A la Asociación de Productores Forestales de Ucayali – APROFU que a través de su presidente Sr Mauro Scavino me permitieron participar en la ejecución del proyecto denominado “Adaptación tecnológica de un **gasogenador para la utilización del gas convertido de los residuos de la madera, como fuente de energía eléctrica en un aserradero rural de la** región de Ucayali” haciendo posible la realización de la presente investigación mediante la logística de todos los materiales y equipos utilizados en el proceso de gasogenación de los residuos de la madera y apoyo tecnológico en la parte experimental mediante el Ing. Wininger Carhuaricra Atayama quien impartió sus conocimientos para el manejo del equipo gasificador.
- Al aserradero Jorge Rolando por brindar la facilidad en la recolección de residuos de la madera y el estudio de la huella de carbono de la transformación primaria de la madera de la especie *Terminalia oblonga* (Yacushapana).
- A la Universidad Nacional de Ucayali por haberme permitido utilizar los materiales del laboratorio de química y laboratorio de suelos.
- Al Mg. Melchor Herbert Dolmos Castro, asesor de la presente tesis, por su orientación científica y apoyo incondicional en el desarrollo de la presente investigación; quien con sus ideas innovadoras y optimista me permitió conocer y aprender sobre la obtención de energía renovable, obteniendo gas a partir de residuos sólidos de la madera.

ÍNDICE DE CONTENIDO

Resumen xi
Introduccion xiii
CAPITULO I 17
1.1. Planteamiento del problema 17
1.2.Justificacion 19
CAPITULO II 21
MARCO TEORICO 21
2.1. Contexto historico 21
2.1.1. Desarrollo histórico de la huella de carbono 21
2.1.2. Contexto de la gasogenacion como tecnologia de energia limpia 25
2.2. La huella de carbono 28
2.2.1. Conceptos de huella de carbono (Hc) 28
2.2.2. Clases de huella de carbono 30
2.2.3. Metodologias del calculo de la huella de la huella de carbono 31
.2.2.3.1. ISO 14.064 32
2.2.3.2. PAS 2050 33
2.2.3.2.1. Mapa de proceso. 33
2.2.3.2.2. Limites de medición. 34
2.2.3.2.3. Recolección de datos. 34
2.2.3.2.4. Calculo de la huella de carbono. 34
2.2.3.2.5. Análisis de incertidumbre. 35
2.3. Analisis de ciclo de vida 36
2.4. Gasificacion de residuos solidos de biomasa forestal 38
2.4.1. Gasificacion 38
2.4.2. Gas de gasificacion o gasógeno 40
2.4.2.1. Concepto. 40
2.4.2.2. Composición y poder calorífico del gas de gasificación o gasógeno . 40
2.4.3. Residuos solidos de biomasa forestal como combustible usado para la gasificación 43
2.4.4. Propiedades del combustible sólido (biomasa forestal) para la gasificación 44
2.4.4.1. Contenido energético o poder calorífico. 44
2.4.4.2. Contenido de humedad. 45

2.4.4.3. Tamaño de partículas. 47
2.4.4.4. Contenido de materiales volátiles. 48
2.4.4.5. Contenido de cenizas. 48
2.4.4.6. Densidad aparente. 49
2.4.5. Procesos de la gasificacion 49
2.4.5.1. Pirolisis o descomposición térmica. 50
2.4.5.2. Oxidación o combustión. 51
2.4.5.3. Reducción o gasificación. 52
2.4.6. Los gasificadores o gasogenadores 53
2.4.6.1.- Concepto. 53
2.4.6.2 . Tipos de gasificadores. 53
2.4.6.2. Descripción del gasificador de lecho fijo y corriente paralela "downdraft" 56
2.4.6.2.2. Proceso de gasificación en un gasogenador de lecho fijo en corrientes paralelas 55
2.5 Modelos matematicos 57
Definición de términos básicos 57

CAPITULO III 64
METODOLOGIA 64
3.1. Metodo de investigación 64
3.2. Población y muestra 64
3.2.1. Población. 64
3.2.2. Muestra. 64
3.2.3.- Ubicación donde se recolectaron los residuos de la especie *Terminalia oblonga* (yacushapana) y donde se estimó la huella de carbono. 65
3.2.4. Ubicación del área de estudio. 65
3.3. Instrumentos de recolección de datos 66
3.3.1. Instrumentos de medición 66
3.3.2. Materiales y equipos de campo 67
3.4. Procedimiento 68
3.4.1. Para el proceso de gasogenacion 68
3.4.1.1. Recoleccion de muestras de residuos solidos de la especie yacushapana 68
3.4.1.2. Preparacion de las muestras par gasogenar 68
3.4.1.3. Proceso de gasificacion 71

3.4.2. Para la huella de carbono 74
3.5. Procesamiento de datos.....75
3.5.1. Para el proceso de gasogenacion 75
3.5.1.1. Calculo del poder calorifico del gasogeno 75
3.5.1.2. Determinacion en el rendimiento en la gasogenacion 75
3.5.2. Para la reduccion de la huella de carbono.....77
3.5.2.1. Huella de carbono de los residuos de la madera de la especie *Terminalia oblonga*.....77
3.5.2.2. Calculo de la huella de carbono por el consumo de energia electrica durante la transformacion primaria de la madera de yacushapana en el aserradero Jorge Rolando. 80
3.5.2.3. Calculo para reducir la huella de carbono total de la especie forestal en estudio. 81
3.5.2.5. Diseño estadistico 84
3.6.- Tratamiento de datos 85
CAPITULO IV.....87
RESULTADO Y DISCUSION 87
4.1. Poder calorifico del gasogeno en funcion de la humedad del aserrin de la especie *terminalia oblonga (*yacushapana*)* 87
4.2. Poder calorifico en funcion del tamaño de carga 91
4.3. Reduccion de la huella de carbono reciclando los residuos de madera yacushapana 95
4.3.1. Huella de carbono sin gasogenacion de residuos 95
4.3.2. Porcentaje de reduccion de la huella de carbono gasogenando residuos de madera yacushapana.....96
4.4. Modelo matematico correspondiente a la reduccion de la huella de carbono en funcion de la energia generada.....100
V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 104
5.1. Conclusiones 104
5.2. Recomendaciones 105
VI. ..... B
IBLIOGRAFIA. 106
ANEXOS.....110

INDICE DE TABLAS.

Tabla 1.Factor de emisión de diferentes combustibles 35
Tabla 2. Clasificación del gas de gasificación según el agente gasificante usado…40
Tabla 3. Rango de composición teórica del gas de gasogenación 41
Tabla 4. Composición química teórica del gas de madera 42
Tabla 5. Promedios de los valores caloríficos inferiores de combustibles. 45
Tabla 6. Productos de la pirolisis 51
Tabla 7. Clasificación de modelos matemáticos. 58
Tabla 8. Esquema del diseño al azar (DCA). 85
Tabla 9. Composición volumétrica y Poder calorífico del gasógeno en función de la humedad de los residuos. 87
Tabla 10. Análisis de regresión y correlación de la humedad vs poder calorífico del asógeno...89 Tabla 11. Composición volumétrica y poder calorífico del gasógeno a diferentes tamaños y humedad constante (21.5%).....91
Tabla 12. Análisis de regresión y correlación del tamaño de partículas vs poder calorífico del gasógeno 92
Tabla 13. Huella de carbono de la transformación primaria de la especie Terminalia oblonga en el aserradero Jorge Rolando SAC. 95
Tabla 14. Reducción de la huella de carbono en función de tamaños de partículas de la especie forestal yacushapana. 97
Tabla 15. % Reducción de la huella de carbono de la transformación primaria de la madera de la especie Terminalia oblonga en función de la energía generada (PCI) por el gasógeno obtenido **. ...**98
Tabla 16. Cuadro resumen del %de reducción de la huella de carbono y la energía generada (el poder calorífico) a condiciones de humedad del 21.5%.....100
Tabla 17. Comparación de la reducción de la huella de carbono con el PCI experimental y calculado don el con modelo matemático 103
Tabla 18.% Humedad del aserrín sacado del aserradero..... 110
Tabla 19.Determinación de la humedad de las muestras de aserrín en la estufa, a un tamaño constante 0.0208 cm.....110

Tabla 20. Determinación de % humedad para diferentes tamaños y una humedad constante de 21,5%..... 111
Tabla 21. Resultados experimentales de la especie Terminalia oblonga a diferentes humedades y tamaño constante..... 113
Tabla 22. Resultados experimentales de la especie Terminalia oblonga a diferentes tamaños y humedad constante de 21.5%..... 114
Tabla 23. Composición porcentual del gasógeno obtenido a partir del aserrín a diferentes humedades.....115
Tabla 24. Cubicación de las trozas que ingresaron al proceso..... 117
Tabla 25. Determinación de la densidad saturada del residuo de la madera yacushapana al 46.73% de humedad. 118
Tabla 26. Determinación de la densidad del residuos de la madera yacushapana al 21,5% de humedad 118
Tabla 27. Determinación del volumen total de madera aprovechada comercialmente.....119
Tabla 28. Consumo de energía eléctrica por la empresa Jorge Rolando 121
Tabla 29. Cuadro resumen de la energía generada vía gasogenación en función de tamaños de partículas 124
Tabla 30. Cuadro resumen de la huella de carbono residuo potencial 126
Tabla 31. Cuadro resumen del cálculo % de reducción de huella de carbono de la especie Terminalia oblonga. 127
Tabla 32. Cuadro resumen del cálculo del rendimiento en la generación de energía eléctrica de los residuos de yacushapana. 128
Tabla 33. Entalpias de formación.....130
Tabla 34.Densidad y peso molecular..... 131
Tabla 35. Entalpias de cada gas combustible..... 131
Tabla 36.Fórmulas para el cálculo de análisis de significancia. 138
Tabla 37.Interpretación del análisis de los resultados 138

INDICE DE FIGURAS.

Figura 1. Diagrama de cálculo de emisiones para análisis de ciclo de Vida.....36
Figura 2. Composición del gas de madera en función del contenido de la humedad.....42
Figura 3. Zonas del gasogenador de lecho fijo y corriente paralelo.....55
Figura 4.Ubicación de la empresa Jorge Rolando SAC 65
Figura 5. Ubicación de la empresa THOT S.R.L, donde se ejecutó la presente tesis 66
Figura 6. Balance de materia del proceso de transformación de la madera de la especie Terminalia oblonga.....78
Figura 7. Comportamiento del poder calorífico del gas de gasogenación en función de diferentes humedades del aserrín..... 90
Figura 8. Poder calorífico del gas de gasificación en función del tamaño de partículas a un 21,5% de humedad.....93
Figura 9. Porcentaje de reducción de la huella de carbono de la transformación primaria de la madera de la especie *Terminalia oblonga*.....99
Figura 10. Modelo matemático sin ajustar.....101
Figura 11. Modelo matemático ajustado en función de reducción de huella de carbono y energía generada 102

ÍNDICE DE ICONOGRAFÍAS

Fotografía 1. Recolección de muestras.....140
Fotografía 2. Tamizado de aserrín.....141
Fotografía 3. Secado de aserrín 141
Fotografía 4. Toma de muestras para determinar la humedad de los Residuos 141
Fotografía 5. Determinación de la humedad de las muestras 141
Fotografía 6. Preparación de tamaños de partículas de la madera 142
Fotografía 7. Equipo gasogenador.....142
Fotografía 8. Retiro de cenizas del reactor 142
Fotografía 9. Limpieza del cuello del reactor.....143
Fotografía 10. Cargando el reactor 143
Fotografía 11. Instalando el testo 350.....143
Fotografía 12. Filtros del testo 350.....143
Fotografía 13. Encendido del reactor 143
Fotografía 14. Encendido de la antorcha 143
Fotografía 15. Medida del volumen de las trozas.....144
Fotografía 16. Aserrío de yacushapana en cierra principal y en la canteadora 144
Fotografía 17. Aserrío de la yacushapana en la despuntadora y en El área de recuperación.....144
Fotografía 18. Residuos generados del aserrío de la madera de Yacushapana 145
Fotografía 19. Motores intervinientes durante el proceso de la Gasogenacion 145
Fotografía 20. Ventiladores para el condensador.....145

RESUMEN

El presente estudio se realizó en el marco del proyecto, FINCYT-APROFU-UNU: “Adaptación tecnológica de un gasificador para utilizar, el gas obtenido de los residuos de madera, como fuente de energía, para el funcionamiento de un aserradero rural en la región de Ucayali”, con el propósito de simular la reducción de la huella de carbono (Hc), reciclando los residuos sólidos de la transformación primaria de la madera de la especie *Terminalia oblonga* (yacushapana), vía el proceso de gasificación, a nivel prototipo. La simulación de la reducción de la Hc del proceso se realizó en el aserradero Jorge Rolando del distrito Manantay para lo cual primero se calculó la Hc del proceso, teniendo como resultado sin reciclar los residuos sólidos de la madera vía gasificación la Hc es 3 459,665 TM de CO_2 eq / año, luego reciclando los residuos de la madera vía gasificación la Hc es 74,659 TM de CO_2 eq/año. Posteriormente se simuló la reducción de la Hc en función de la energía generada (poder calorífico inferior) del gas obtenido de la gasificación de los residuos de la madera como fuente de energía renovables. Para lo cual la parte experimental se realizó en un gasificador de flujo paralelo, realizándose 18 pruebas de gasificación del aserrín a diferentes humedades y 12 pruebas de gasificación de diferentes tamaños de la madera *Terminalia oblonga,* teniendo como resultado el mejor poder calorífico del gas es 708,25 Kcal/m^3 a una humedad constante de 21,5% a base de probetas de madera de yacushapana, de dimensiones 5cmX4cmX3cm. Es con este PCI del gas que se simulo la generación eléctrica para el uso del proceso del aserradero Jorge Rolando reduciéndose así la Hc de la especie forestal en un 97,842%. Siendo la ecuación del modelo matemático del % reducción de Hc en función de la energía generada: $y = -0,062\ln(x) + 98,244$.

Palabras claves: Huella de carbono, residuos de la madera, energía renovable vía gasificación, poder calorífico, transformación primaria de la madera.

ABSTRACT

The present study was carried out in the framework of the project, FINCYT-APROFU-UNU: "Technological adaptation of a gasifier to use, the gas obtained from wood waste, as an energy source, for the operation of a rural sawmill in the region of Ucayali ", with the purpose of simulating the reduction of the carbon footprint (Hc), recycling solid waste from the primary transformation of the wood of the species Terminalia oblonga (yacushapana), via the gasification process, at the prototype level. The simulation of the reduction of the Hc of the process was carried out in the sawmill Jorge Rolando of the Manantay district, for which the Hc of the process was calculated first, having as a result without recycling the solid residues of the wood via gasification the Hc is 3 459,665 TM of CO2 eq / year, then recycling the waste from the wood via gasification, the Hc is 74,659 MT of CO2 eq/year. Subsequently, the reduction in Hc was simulated as a function of the energy generated (lower calorific value) of the gas obtained from the gasification of wood waste as a renewable energy source. For which the experimental part was carried out in a parallel flow gasifier, 18 gasification tests of the sawdust at different humidities and 12 gasification tests of different sizes of the Terminalia oblong wood were carried out, resulting in the best calorific value of the gas is 708,25 Kcal / m^3 at a constant humidity of 21,5% based on specimens of yacushapana wood, of dimensions 5cmX4cmX3cm. It is with this PCI of the gas that the electric generation for the use of the process of the sawmill Jorge Rolando was simulated, thus reducing the Hc of the forest species by 97,842%. Being the equation of the mathematical model of the percentage reduction of Hc as a function of the generated energy: y = -0.062ln (x) + 98.244.

Keywords: Carbon footprint, wood waste, renewable energy via gasification, calorific value, primary transformation of the wood.

INTRODUCCION

El cambio climático, genera el principal problema ambiental de nuestro planeta, cuyos efectos ya es parte de nuestro diario vivir y afecta la supervivencia en nuestro planeta, especialmente por el uso de combustibles fósiles como fuentes de energía, para el transporte, procesos industriales y los servicios de luz (Informe del Panel Intergubernamental de Cambio Climático 2011 – IPCC ,2011). En este marco, se están desarrollando mecanismos y metodologías a nivel internacional para cuantificar y reducir el impacto ambiental de las actividades del ser humano. Una de ellas es: la Huella de Carbono (Hc), que es una herramienta que permite identificar las fuentes más importantes de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), para posteriormente cuantificar estas emisiones, plantear estrategias de reducción y finalmente tomar decisiones para neutralizar nuestro impacto. Conocer la huella de carbono permite identificar rutas para controlar, reducir o mitigar las emisiones y su impacto, y se reconoce cada vez con más intensidad su alcance. Por lo tanto una vez conocida la huella de carbono una alternativa para reducir dicha huella es el uso alternativo de fuentes y tecnologías limpias de energía siendo una de ellas la gasogenación de la biomasa.

La gasogenación es una tecnología que aplicaron los países europeos durante la segunda guerra mundial frente la escases de combustibles fósiles, para satisfacer la necesidades energéticas pero declino esta tecnología a nivel mundial después de la década de los 50 del siglo pasado debido a la estabilidad de la industria del petróleo, sin embargo frente al calentamiento global los países europeos retoman la gasificación de biomasa como un tipo de energía renovable que fue ganando lugar en la producción energética, por lo

tanto esta fuente de energía debe ser considerada y aplicada en nuestro país. En el Perú la gasificación de la madera a base de aserrín se llevó a cabo el año 1982 en el distrito de Campo Verde, departamento de Ucayali.

Actualmente la tecnología de la gasogenación fue experimentada por la Asociación de productores forestales de Ucayali (APROFU) mediante la ejecución del proyecto, en alianza con FINCYT-APROFU-UNU, denominado "Adaptación tecnológica de un gasogenador para la utilización del gas convertido de los residuos de madera, como fuente de energía eléctrica en un aserradero rural de la región de Ucayali". Para lo cual diseñaron y construyeron un gasogenador a nivel de prototipo, (ver el anexo 16, fotografía 7) mediante el cual se realizó la parte experimental para el presente estudio. El proyecto demando el conocimiento de la gasificación de nuestras especies forestales que no habían sido estudiados para estos fines. Pues actualmente se desconoce cómo es el comportamiento en la gasificación de la especie *Terminalia oblonga* (yacushapana). La transformación primaria de la madera de la especie forestal al igual que las demás genera residuos sólidos en abundancia que pueden ser útiles como materia prima en el proceso de gasificación. Esto nos motivó a estudiar la gasificación de la especie *Terminalia oblonga* con la finalidad de simular la reducción de la huella de carbono de la especie en su proceso de transformación de la madera en función del poder calorífico del gasógeno obtenido, manejando variables humedad y tamaño del combustible para obtener un gas ,optimizado, con un mayor poder calorífico con tales datos se simulo su conversión en energía eléctrica para autoabastecer al aserradero Jorge Rolando con energía limpia a base de sus residuos de madera procedentes del proceso de transformación primaria de la

madera, en forma similar como lo hacen los aserraderos de Alemania o como Finlandia.

El servicio de energía eléctrica está cargo de Electroucayali SA, que distribuye y comercializa, la energía proveniente del sistema interconectado nacional de energía eléctrica, con una huella de carbono muy significativa como consecuencia de que nuestra pirámide energética está basada en la generación térmica con gas natural en más del 52%, con tendencia a incrementar, y consecuentemente significa un alto componente que incrementa la huella de carbono en todas las actividades, en especial de los aserraderos. Por ello es de importancia una la eficiente gestión ambiental de los residuos de la actividad forestal en su disposición final, que mediante la gasogenación son fuente de energía eléctrica que se puede generar para los aserraderos rurales; este nuevo sistema de generación eléctrica en Latinoamérica es alternativa para promover en la actividad forestal la reducción al mínimo de la Hc forestal y de esta manera incrementar eficiencia en la actividad extractiva y la actividad de transformación de la madera en la concesión y adaptar a los efectos del cambio climático en los negocios de la actividad forestal.

El aporte que brinda esta tesis es de hacer una línea base que sirva como modelo para seguir conociendo sobre tecnologías que apoyan en la reducción de la huella de carbono en las industrias madereras de nuestra región; y disponer de una tecnología redescubierta con el propósito de adaptarnos a los efectos del cambio climático en nuestra amazonia que generará una cultura ambiental en este contexto entre los empresarios dedicados a la actividad forestal para que en su momento se viabilice juntar la actividad extractiva con la

actividad de transformación en la misma concesión, para bajar costos de producción y tener la necesidad de reforestar en la concesión a fin de tener siempre biomasa viva para absorber tanto exceso de calor, solo si saltamos de una actividad extractivista, a una actividad forestal manejada .

El presente estudio tuvo como objetivo general Determinar en cuánto se reduciría la huella de carbono de la especie *Terminalia oblonga* (Yacushapana), si reciclamos vía gasogenación los residuos sólidos de la transformación primaria de la madera de la especie en mención, en el aserradero Jorge Rolando SAC, en el departamento de Ucayali.

Para ello se desarrollaron los siguientes objetivos específicos:

- Determinar el porcentaje máximo que se lograra reducir la huella de carbono de la especie *Terminalia oblonga* (Yacushapana)
  gasogenando los residuos sólidos de la transformación primaria de la madera en el aserradero Jorge Rolando SAC, en el departamento de Ucayali.
- Determinar el porcentaje de humedad y tamaño de partículas
  Óptimo para lograr un mayor poder calorífico del gasógeno obtenido de los residuos sólidos de la especie *Terminalia oblonga (*yacushapana*)*.
- Determinar el modelo matemático de la reducción de la (Hc) con relación a la energía generada vía gasificación de los residuos sólidos de la especie Terminalia oblonga (yacushapana).