



Universidad
Nacional
de Loja

Universidad Nacional de Loja

Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos

Naturales no Renovables

Carrera de Ingeniería Electromecánica

**Viabilidad técnica económica del aprovechamiento energético de
biomasa de cascarilla de arroz en el Cantón Macará**

Trabajo de Titulación, previo
a la obtención del título de
Ingeniero Electromecánico

AUTOR:

Cristhian Alexander Cueva Rentería

DIRECTOR:

Ing. Carlos Gustavo Samaniego Ojeda, Mg. Sc.

Loja- Ecuador

2024

Certificación

Loja, 25 de julio de 2024

Ing. Carlos Gustavo Samaniego Ojeda Mg, Sc.
DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

CERTIFICO:

Que he revisado y orientado todo proceso de la elaboración del Trabajo de Titulación del grado denominado: **Viabilidad técnica económica del aprovechamiento energético de biomasa de cascarilla de arroz en el Cantón Macará**, de autoría del estudiante **Cristhian Alexander Cueva Rentería**, con **cédula de identidad Nro. 1105962599**, previa a la obtención del título de **Ingeniero Electromecánico**, una vez que el trabajo cumple con todos los requisitos exigidos por la Universidad Nacional de Loja para el efecto, autorizo la presentación para la respectiva sustentación y defensa.



Firmado electrónicamente por:
CARLOS GUSTAVO
SAMANIEGO OJEDA

Ing. Carlos Gustavo Samaniego Ojeda Mg, Sc.
DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Autoría

Yo, Cristhian Alexander Cueva Rentería, declaro ser el autor del presente Trabajo de Titulación y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos de posibles reclamos y acciones legales por el contenido del mismo. Adicionalmente, acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja la publicación de mi Trabajo de Titulación en el Repositorio Institucional – Biblioteca Virtual.

Firma: 

Cédula de identidad: 1105962599

Fecha: 24 de julio del 2024

Correo electrónico: cacuevar@unl.edu.ec

Celular: 0993745947

Carta de autorización por parte del autor, para consulta, reproducción parcial o total y/o publicación electrónica del texto completo, del Trabajo de Titulación.

Yo, **Cristhian Alexander Cueva Rentería** declaro ser autor del Trabajo de Titulación denominado: **Viabilidad técnica económica del aprovechamiento energético de biomasa de cascarilla de arroz en el Cantón Macará**, como requisito para optar por el título de Ingeniero Electromecánico; autorizo al sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que con fines académicos muestre la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera en el Repositorio Institucional.

Los usuarios pueden consultar el contenido de este rebajo en el Repositorio Institucional, en las redes de información del país y del exterior con las cuales tenga convenio la Universidad.

La Universidad Nacional de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia del Trabajo de Titulación que realice un tercero.

Por constancia de esta autorización, suscribo, en la ciudad de Loja, a los veinticuatro días del mes de julio del dos mil veinticuatro.



Firma:

Cédula de identidad: 1105962599

Fecha: 24 de julio del 2024

Correo electrónico: cacuevar@unl.edu.ec

Teléfono: 0993745947

DATOS COMPLEMENTARIOS

Director del Trabajo de Titulación: Ing. Carlos Gustavo Samaniego Ojeda, Mg. Sc.

Dedicatoria

Primeramente, a Dios, por haberme otorgado una familia extraordinaria, quienes han creído siempre en mí, dándome ejemplo de superación, humildad y sacrificio.

A mi madre por ser siempre ese pilar de respaldo y haberme inculcado los mejores valores para poder alcanzar este objetivo en mi vida. También por ser parte de mi sustento económico en el proceso de toda mi carrera universitaria.

A mi amada esposa Arianna Calva y a nuestro querido Eithan por su amor incondicional, paciencia y constante apoyo han sido mi mayor motivación y fuerza durante este arduo proceso. Cada logro alcanzado en este trabajo es también suyo, pues han sido mi inspiración y sostén en los momentos más difíciles.

Es gracias a ustedes que pude alcanzar esta meta y a quienes dedico este proyecto de titulación.

Cristhian Alexander Cueva Rentería

Agradecimientos

A mis formadores desde la niñez, adolescencia y adultez, quienes han compartido desinteresadamente su conocimiento para instruirme en ciencia y valores.

Agradezco a la Universidad Nacional de Loja, carrera de Ingeniería Electromecánica y toda su planta docente por enseñarme las bases del quehacer ingenieril para poder desempeñarme con ética y responsabilidad en la vida profesional.

De manera especial, mi agradecimiento al Ing. Carlos Gustavo Samaniego Ojeda, quien con paciencia y experiencia ha sabido enfocarme y darme las pautas necesarias para todas las incógnitas que se presentaron en algunos temas del desarrollo del Trabajo de Titulación.

Cristhian Alexander Cueva Rentería

Índice de contenidos

Portada.....	I
Certificación	ii
Autoría	iii
Carta de autorización	¡Error! Marcador no definido.
Dedicatoria.....	v
Agradecimientos.....	vi
Índice de contenidos.....	vii
Índice de tablas.....	xii
Índice de figuras	xiv
Índice de anexos	xv
Simbología	xvi
1. Título.....	1
2. Resumen	2
Abstract.....	3
3. Introducción	4
4. Marco teórico	6
4.1 Capítulo I: Biomasa	6
4.1.1 Energía Renovable (ER).....	6
4.1.2 Importancia de la energía renovable.....	6
4.1.3 Energía por Biomasa.....	6
4.1.4 Biomasa	6
4.1.5 Tipos de Biomasa	7
4.1.5.1 Biomasa natural	7
4.1.5.2 Cultivos Energéticos.....	7
4.1.5.3 Biomasa Residual	7
4.1.6 Características energéticas de la biomasa.....	8
4.1.6.1 Composición química.....	8
4.1.6.2 Contenido de humedad	8
4.1.6.3 Porcentaje de cenizas.....	9
4.1.6.4 Poder calorífico	9
4.1.6.5 Densidad Aparente	10
4.1.7 Arroz (Oryza sativa).....	10
4.1.8 Estimación de residuos agrícolas del arroz.....	11
4.1.9 Producción agrícola de arroz en el cantón Macará.....	12
4.1.10 Clasificación de las Piladoras de Arroz	13
4.1.10.1 Piladora de primera categoría	13

4.1.10.2	Piladora de segunda categoría	13
4.1.11	Piladoras de arroz en el cantón Macará	13
4.2	Capítulo II: Logística de Transporte de la biomasa	14
4.2.1	Transporte y Distribución	14
4.2.1.1	Volquete	15
4.2.2	Sistemas de Almacenamiento	15
4.2.3	Sistema de transporte	15
4.2.4	Máquina empacadora de cascarilla de arroz (Compactadora)	16
4.2.5	Empacadora de cascarilla de arroz móvil	17
4.3	Capítulo III: Tecnologías y proceso de aprovechamiento energético de la biomasa.	17
4.3.1	Procesos Termoquímicos	18
4.3.1.1	Combustión de biomasa.....	19
4.3.1.2	Gasificación	19
4.3.1.3	Pirólisis	20
4.3.2	Costo Total aplicado a un sistema de energía renovable	21
4.3.2.1	Costos de Capital	21
4.3.3	Ingresos.....	21
4.3.3.1	Tarifas preferenciales de energías renovables no convencionales.....	21
4.3.3.2	Vigencia de los precios.....	21
4.3.4	Mecanismos de Desarrollo Limpio.....	22
4.3.4.1	Bonos de Carbono	22
4.3.4.2	Ciclo de un proyecto de Bonos de Carbono	22
4.3.5	Indicadores económicos de rentabilidad.....	23
4.3.5.1	Tasa de Descuento	23
4.3.5.2	Valor Actual Neto (VAN)	23
4.3.5.3	Tasa Interna de Retorno (TIR).....	24
4.3.5.4	Plazo de recuperación de inversión inicial (PAY-BACK)	24
5.	Metodología.....	24
5.1	Área de trabajo.....	24
5.2	Equipos y materiales.....	25
5.2.1	Equipos	25
5.2.2	Materiales	25
5.3	Procedimiento.....	26
5.4	Procesamiento y análisis de datos.....	27
5.4.1	Módulo de Fuentes de biomasa: Cascarilla de arroz	27
5.4.1.1	Identificación de fuentes de biomasa residual	27
5.4.1.2	Cuantificación de la biomasa de cascarilla de arroz.....	28

5.4.1.2.1	Coeficientes de generación superficial de residuos.....	28
5.4.1.2.2	Coeficientes de generación de residuos en función de la producción agrícolas.....	28
5.4.1.2.3	Coeficiente de residuos en función de la actividad agroindustrial o industrial.....	28
5.4.1.3	Caracterización de biomasa residual y potencial de generación eléctrica.....	29
5.4.1.3.1	Análisis Elemental.....	29
5.4.1.3.2	Análisis Próximo.....	29
5.4.1.3.3	Análisis de los componentes (estructural).....	29
5.4.1.3.4	Densidad Aparente.....	29
5.4.1.3.5	Potencial de Generación Eléctrica.....	29
5.4.1.4	Análisis de dispersión / producción superficial de biomasa.....	31
5.4.1.5	Análisis de estacionalidad.....	31
5.4.2	Módulo de logística de transporte de biomasa de cascarilla de arroz.....	31
5.4.2.1	Matriz de Distancia.....	32
5.4.2.2	Transporte necesario para el suministro de biomasa.....	32
5.4.2.3	Costo de Transporte por Km.....	33
5.4.2.4	Costos Fijos.....	34
5.4.2.5	Determinación del Costo de los Componentes Complementarios al viaje.....	36
5.4.2.5.1	Costo por hora de tiempo de espera.....	36
5.4.2.5.2	Costos por hora de tiempo de carga y descarga.....	36
5.4.2.6	Cálculo de la tarifa mínima por viaje.....	37
5.4.2.7	Costo total de transportación de biomasa.....	37
5.4.2.8	Costo de transporte con cascarilla compactada.....	38
5.4.3	Módulo de aprovechamiento de biomasa residual.....	38
5.4.3.1	Tecnologías de aprovechamiento energético.....	39
5.4.3.2	Caracterización de las tecnologías aplicables y restricciones técnico-económicas... ..	39
5.4.3.3	Estudio del potencial bioenergético técnico.....	40
5.4.3.4	Requerimientos para el funcionamiento de la planta ORC.....	40
5.4.3.4.1	Alimentación de cascarilla de arroz.....	40
5.4.3.4.1	Cascarilla de arroz requerida por año.....	41
5.4.3.4.2	Eficiencia del ciclo ORC.....	41
5.4.3.4.3	Eficiencia de la planta ORC.....	41
5.4.3.4.4	Potencia de la planta ORC (MWe).....	41
5.4.3.5	Análisis económico de la tecnología.....	42
5.4.3.5.1	Costo de inversión inicial.....	42
5.4.3.5.1	Costos fijos de operación y mantenimiento (O&M).....	42
5.4.3.5.2	Costos variables.....	43
5.4.3.6	Ingresos.....	43

5.4.3.6.1	Ahorro por consumo eléctrico	43
5.4.3.6.2	Ingresos por venta de energía	44
5.4.3.6.3	Venta de certificado de reducción de emisiones (CERs).....	44
5.4.3.7	Rentabilidad del proyecto.....	45
6.	Resultados.....	47
6.1	Módulo de Fuentes de Biomasa	47
6.1.1	Estimación de superficie agrícola de cascarilla de arroz	47
6.1.2	Producción agrícola de arroz en cantón Macará.....	47
6.1.3	Generación de biomasa de cascarilla de arroz	48
6.1.4	Cuantificación de biomasa de cascarilla de arroz	48
6.1.5	Caracterización de Biomasa de cascarilla de arroz.....	49
6.1.5.1	Análisis Elemental.....	49
6.1.5.2	Análisis Próximo	50
6.1.5.3	Análisis de los componentes.....	50
6.1.6	Potencial de generación eléctrica de biomasa de cascarilla de arroz en Macará	50
6.1.7	Dispersión y Producción Zonal	51
6.1.7.1	Dispersión.....	51
6.1.7.2	Producción Zonal.....	52
6.1.8	Estacionalidad de la biomasa de cascarilla de arroz	53
6.1.9	Accesibilidad a los centros de generación de biomasa de cascarilla de arroz	54
6.2	Resultados del módulo de logística de transporte de biomasa	55
6.2.1	Distancia entre Piladoras	55
6.2.2	Transporte de carga disponible en la localidad.....	56
6.2.3	Costos Total anual de Transporte de biomasa (Subcontratado).....	57
6.2.4	Costo de transporte de carga (camión propio).....	58
6.2.4.1	Costos Fijos	58
6.2.4.2	Determinación del costo de los componentes complementarios al viaje.....	58
6.2.4.2.1	Costos por hora de tiempo de espera	58
6.2.4.2.2	Costos por hora de tiempo de carga y descarga.....	58
6.2.4.3	Cálculo de la tarifa mínima por viaje	59
6.2.4.4	Costos totales de transporte desde los centros de generación de biomasa de cascarilla de arroz (camión propio)	59
6.2.4.5	Costo total anual de transporte de carga (camión propio)	60
6.2.4.6	Costo de transporte con biomasa de cascarilla de arroz compactada	61
6.2.4.7	Costo de transporte de biomasa de cascarilla de arroz compactada (Subcontratado).61	
6.2.4.8	Costo de transporte de biomasa de cascarilla de arroz compactada (Camión Propio).	

6.3	Resultados del módulo de tecnologías de aprovechamiento de biomasa de cascarilla de arroz.....	63
6.3.1	Caracterización de las tecnologías aplicables y restricciones técnico-económicas	63
6.3.1.1	Caracterización de las tecnologías aplicables.....	63
6.3.1.2	Restricciones técnicas y económicas de las tecnologías de aprovechamiento energético de biomasa	64
6.3.1.3	Selección de la Tecnología de Aprovechamiento Energético.	65
6.3.2	Tecnología de aprovechamiento energético sistema ciclo Rankine orgánico.....	65
6.3.2.1	Selección del fluido de trabajo	65
6.3.2.2	Estudio de las tecnologías ORC	65
6.3.2.3	Selección de los equipos.....	65
6.3.2.3.1	Sistema OCR	65
6.3.2.3.2	Caldera.....	66
6.3.2.4	Análisis termodinámico.....	67
6.3.2.4.1	Alimentación de cascarilla de arroz.....	69
6.3.2.4.2	Cascarilla de arroz requerida por año	69
6.3.2.4.3	Eficiencia del ciclo ORC	70
6.3.2.4.4	Eficiencia de la planta ORC	70
6.3.2.4.5	Potencia de la planta ORC (MWe).....	70
6.3.3	Estudio de viabilidad económica	70
6.3.3.1	Coste de biomasa.....	71
6.3.3.2	Costo de inversión inicial	71
6.3.3.3	Egresos	71
6.3.3.3.1	Costos fijos de operación y mantenimiento (O&M).....	71
6.3.3.3.2	Costos Variables	72
6.3.3.4	Ingresos.....	72
6.3.3.4.1	Ahorro por consumo eléctrico	73
6.3.3.4.2	Venta de energía	74
6.3.3.4.1	Venta de certificado de reducción de emisiones (CERs).....	74
6.3.4	Rentabilidad económica.....	75
7.	Discusión.....	77
8.	Conclusiones.....	79
9.	Recomendaciones.....	80
10.	Bibliografía.....	81
11.	Anexos.....	88

Índice de tablas:

Tabla 1. Precios preferenciales de energías renovables.	21
Tabla 2. Tipos de Proyectos MDL	22
Tabla 3. Interpretación del VAN	24
Tabla 4. Coordenadas geográficas del cantón Macará	25
Tabla 5. Coeficiente de generación de residuos de cascarilla de arroz	28
Tabla 6. Rendimiento Global de Plantas Energéticas	30
Tabla 7. Poder Calorífico Inferior	30
Tabla 8. Componentes de la metodología para la definición del límite inferior tarifario	33
Tabla 9. Costo por km para cada categoría y tipo de viaje	34
Tabla 10. Salario mensual de conductor para camiones pesados y extrapesados de más de 3.5 toneladas.....	35
Tabla 11. Costo de la Revisión Técnica Vehicular de vehículos pesados	35
Tabla 12. Costos promedio de la emisión del certificado de la operación vehicular anual ...	35
Tabla 13. Densidad cascarilla de arroz compactada.....	38
Tabla 14. Cargos Tarifarios.....	43
Tabla 15. Estimación de superficie agrícola cantonal de arroz (2017-2021).....	47
Tabla 16. Producción de arroz en el cantón Macará	48
Tabla 17. Cuantificación de cascarilla de arroz	49
Tabla 18. Análisis elemental de la biomasa de cascarilla de arroz	49
Tabla 19. Análisis Próximo de la biomasa de cascarilla de arroz	50
Tabla 20. Análisis de los componentes de la biomasa de cascarilla de arroz	50
Tabla 21. Potencial de generación eléctrica de la biomasa de cascarilla de arroz	51
Tabla 22. Densidad superficial de la biomasa de cascarilla en cada piladora.....	52
Tabla 23. Coordenadas de ubicación de la piladoras	53
Tabla 24. Porcentaje de residuos de biomasa de cascarilla de arroz generado por mes (%) ..	53
Tabla 25. Residuos de biomasa de cascarilla de arroz generados por mes (ton)	54
Tabla 26. Matriz de Distancias entre Piladoras (km)	55
Tabla 27. Costos por viaje de transporte de carga pesada subcontratado	56
Tabla 28. Carga real del transporte subcontratado	57
Tabla 29. Costo de transporte de biomasa total (Subcontratado).....	57
Tabla 30. Cuadro de resumen con las propiedades de la cascarilla de arroz compactada	61
Tabla 31. Costo total de transporte subcontratado con biomasa compactada.....	61
Tabla 32. Cuadro de resumen con los costos de transporte totales al año	63

Tabla 33. Tipos de planta de aprovechamiento energético de biomasa MTD's (mejores tecnologías disponibles)	63
Tabla 34. Restricciones técnicas de las tecnologías	64
Tabla 35. Parámetros de los fluidos de trabajo	65
Tabla 36. Parámetros de selección del sistema OCR	66
Tabla 37. Parámetros de selección de caldera	66
Tabla 38. Características con circuito de vapor y aceite térmico	67
Tabla 39. Datos iniciales del Sistema ORC	67
Tabla 40. Parámetros del sistema ORC	68
Tabla 41. Costos Fijos	71
Tabla 42. Costos Variables.....	72
Tabla 43. Consumo eléctrico mensualizado de la Piladora Macarennito.....	73
Tabla 44. Resumen de la demanda eléctrica anual.....	74
Tabla 45. Determinación de la rentabilidad del proyecto	75

Índice de figuras:

Figura 1. Poderes caloríficos de diferentes tipos de biomasa.	8
Figura 2. Valores del poder calorífico de biomasa agrícola y forestal.....	10
Figura 3. Arroz en el Ecuador	11
Figura 4. Rendimiento y Participación en la Producción Nacional	11
Figura 5. Cultivo de arroz en el cantón Macará	12
Figura 6. Piladoras de arroz en Macará.....	14
Figura 7. Volquete para transportar arroz a granel	15
Figura 8. Máquina Empacadora de cascarilla de arroz	16
Figura 9. Compactadora móvil de cascarilla de arroz.....	17
Figura 10. Clasificación de los procesos.....	18
Figura 11. Ruta de Combustión de una partícula de biomasa.....	19
Figura 12. Esquema de los principales procesos termoquímicos y los productos intermedios y finales que se obtienen de ellos.	20
Figura 13. Ciclo de un proyecto de Bonos de Carbono	23
Figura 14. Ubicación geográfica del cantón Macará	25
Figura 15. Muestreo de Marcos de Áreas (izquierda); Muestreo de Marco de Lista (derecha)	27
Figura 16. Detalle de Pago del Valor de la Matricula.....	36
Figura 17. Costo mensualizado de seguro de vehículo pesado	36
Figura 18. Usos y aprovechamiento de biomasa húmeda y biomasa seca.....	39
Figura 19. Mapa con la ubicación de la Piladoras de arroz	52
Figura 20. Accesibilidad a las piladoras de arroz.	55
Figura 21. Tamaño de la muestra.....	56
Figura 22. Esquema del Ciclo Rankine Orgánico.....	68
Figura 23. Resultados del análisis termodinámico del sistema OCR.....	68

Índice de anexos:

Anexo 1. Pesos máximos permitidos	88
Anexo 2. Ficha Técnica Camión Volquete GHAJNUA - 1726.....	89
Anexo 3. Tabla de salario mínimo sectorial para estibador o ayudante de piladora E2	90
Anexo 4. Costos referenciales de la demanda y energía. Resolución Nro. 009/2022.	91
Anexo 5. Vida útil aplicable para cada tecnología de generación eléctrica.....	92
Anexo 6. Costo de compactadora de arroz.	92
Anexo 7. Parámetros técnicos compactadora	93
Anexo 8. Costos Capital de Instalación, costos de operación y mantenimiento.....	93
Anexo 9. Certificado de traducción de resumen.	94

Simbología:

CR_S = Coeficiente de generación superficial de residuos

CR_P = Coeficiente de generación de residuos en función de la producción agrícola

CR_{PM} = Coeficiente de residuos de función de la actividad agroindustrial

PE = Potencial de generación de energía eléctrica [kWh]

R_S = Generación de residuos anuales [kg]

PCI = Poder calorífico inferior [MegaJoules/kg]

CF = Rendimiento global de la planta en base al tipo de proceso de generación energético

$Densidad_i$ = Densidad superficial de la biomasa [ton/km²]

$Area_{municipal_i}$ = Área del cantón [km²]

CF = Costo Fijos de transporte mensuales

MO = Gastos mensuales de mano de obra (incluido afiliación y beneficios de Ley)

SEG = Gastos en seguros para el vehículo mensualizados

LEG = Gastos de legalización mensualizados

GA = Gastos administrativos mensualizados

GO = Gastos operativos mensualizados

D = Gastos por depreciación mensualizados

E_2 = Costo de estibador por hora

ϕ = Valor de los costos de los componentes complementarios al viaje

T = Tarifa mínima por viaje [USD/viaje]

C_{TT} = Costo total de transporte [USD]

Cap_{carga} = Capacidad de carga del transporte [ton]

fa = factor de disponibilidad

η_{planta} = Eficiencia de la planta

P = Potencia de la planta [kW]

E_g = energía generada anualmente [kWh]

$Costo_{Inv}$ = Costo inversión inicial [USD]

$Costo_{kW}$ = Costo de potencia unitario [USD/kW]

$Costo_{O\&M}$ = Costos fijos de operación y mantenimiento [USD/kWh]

$Costo_{variables}$ = Costos variables [USD/kWh]

1. Título

Viabilidad técnica económica del aprovechamiento energético de biomasa de cascarilla de arroz en el Cantón Macará

2. Resumen

El presente proyecto tiene como propósito determinar la viabilidad del aprovechamiento energético de la biomasa de cascarilla de arroz, debido a que este tipo de generación eléctrica es considerada como una alternativa sostenible y limpia a los sistemas tradicionales de energía.

Se plantea como objetivo general elaborar una evaluación técnica y económica del aprovechamiento energético de la biomasa de cascarilla de arroz del cantón Macará.

Para el cumplimiento del primer objetivo, se identificó en primera instancia la superficie agrícola del arroz, la producción de arroz por hectáreas para luego estimar la generación de residuos de cascarilla de arroz y se realizó una encuesta a los propietarios de las piladoras para comparar con los datos de cuantificación. En lo que respecta al segundo objetivo, se identificó las ubicaciones de los puntos de generación de cascarilla de arroz y la distancias que existe entre estas, seguidamente se estimó los costos de transporte totales de cuatro alternativas siendo estas; transporte con camión subcontratado, camión subcontratado con compactación; en la cual se empleó una encuesta a los propietarios de transporte de carga pesada y los costos de camión propio y camión propio con compactación se fundamentaron en el “Método para determinar el límite inferior de las tarifas para vehículos comerciales pesados”. El tercer objetivo se caracteriza a las tecnologías de aprovechamiento energético seleccionando la adecuada en base a la caracterización y cuantificación de la cascarilla de arroz. Se refiere además al análisis de beneficios en comparativa con los costos que se tendría que considerar para la implementación de este proyecto, se analizó el consumo energético, costos de inversión inicial, costos fijos y variables de operación y mantenimiento; a partir de estos valores se determinó la rentabilidad que genera la propuesta de aprovechamiento.

Palabras clave: *caracterización, cuantificación, aprovechamiento energético, compactación, alternativa sostenible.*

Abstract

The purpose of this project is to determine the feasibility of utilizing rice husk biomass for energy, as this type of power generation is considered a sustainable and clean alternative to traditional energy systems. The main objective is to conduct a technical and economic evaluation of the energy application of rice husk biomass in the Macará canton.

To meet the first objective, the agricultural area of rice and the production of rice per hectare were identified to estimate the generation of rice husk waste. A survey was conducted among the owners of the rice mills to compare with the quantification data. For the second objective, the locations of the rice husk generation points and the distances between them were identified. Afterwards, the total transportation costs for four alternatives were estimated: transport with subcontracted truck, subcontracted truck with compaction; where a survey was applied to the heavy load transport owners and the costs for own truck and own truck with compaction were based on the "Method to determine the lower limit of rates for heavy commercial vehicles." The third objective involves characterizing the energy utilization technologies and selecting the most suitable based on the characterization and quantification of the rice husk. It also refers to the analysis of benefits compared to the costs required for the project's implementation. The analysis covered energy consumption, initial investment costs, and fixed and variable operation and maintenance costs. Based on these values, the profitability of the utilization proposal was determined.

Keywords: characterization, quantification, energy utilization, compaction, sustainable alternative.

3. Introducción

El presente trabajo de investigación basa su desarrollo en la viabilidad técnica y económica del aprovechamiento energético de biomasa de cascarilla de arroz en el cantón Macará, a fin de aprovechar el recurso de biomasa disponible, conocer los costos de transporte, así como los valores económicos que conllevaría implementar este tipo de energía renovable; contribuyendo a las iniciativas medioambientales que procuran disminuir la contaminación.

En los últimos años, varios molineros e industrias de arroz en países asiáticos han comenzado a utilizar residuos de cáscara de arroz para producir electricidad y productos industriales de alto valor, respectivamente. Aproximadamente una tonelada de cáscara de arroz puede generar 800 kWh de energía eléctrica (Pode, 2016).

En Ecuador, debido a su naturaleza agrícola y forestal, la biomasa constituye una fuente renovable de energía con un alto potencial de aprovechamiento. El uso de los residuos agrícolas con fines energéticos representa una oportunidad para mejorar la situación socioeconómica de las áreas rurales y urbanas; además, una mayor participación de las energías renovables puede ser una alternativa fundamental para diversificar la matriz energética, en apoyo a la estrategia del país (Carreño, y otros, 2023).

Estudios demuestran que la quema de productos agrícolas tiene como consecuencia la contaminación del aire por las sustancias nocivas que se producen. Se estima que la quema de biomasa, como madera, hojas, árboles y pastos (incluidos los residuos agrícolas), produce 40% del dióxido de carbono (CO₂), 32% del monóxido de carbono (CO), 20% de la materia particulada o partículas de materia suspendida (PM) y 50% de los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) emitidos al ambiente a escala mundial (CCA, 2014).

La tendencia actual está orientada hacia la sostenibilidad, por ello, es necesario encontrar procesos eficientes y amigables con el medio ambiente para darle valor agregado a residuos agroindustriales que generan contaminación como la cascarilla de arroz en un país productor de arroz como Ecuador (Génesis, García, Cedeño, & Alcivar, 2021).

El objetivo general que ha guiado a la presente investigación es el de “Elaborar un estudio de viabilidad técnica-económica del aprovechamiento energético de biomasa de cascarilla de arroz en el cantón Macará”.

Los objetivos específicos son los siguientes:

- Evaluar la disponibilidad de biomasa de cascarilla de arroz en el cantón Macará.

- Estimar los costos aproximados de transporte y recolección de la cascarilla de arroz.
- Determinar la viabilidad técnica y económica para el aprovechamiento energético de la biomasa de cascarilla de arroz.

Con la ejecución de este proyecto se busca determinar la viabilidad de aprovechar energéticamente la biomasa de cascarilla de arroz mediante la elaboración de un estudio técnico económico, conociendo la disponibilidad de la biomasa de cascarilla de arroz y los costos de transporte.

Este trabajo puede construir una base o referente para proyectos similares llevados a cabo con diferentes residuos agrícolas.

4. Marco teórico

4.1 Capítulo I: Biomasa

4.1.1 *Energía Renovable (ER)*

Según (Estrada & Arancibia, C, 2010) entiende por fuentes de energía renovables aquellas que por su cantidad con relación a los consumos que los seres humanos pueden hacer de ellas son inagotables y su propio consumo no afecta el medio ambiente. En tanto, las energías renovables comprenden todas aquellas que se extraen de fuentes que se regeneran de manera natural, lo que garantiza que no se agoten y que se consideren en principio limpias o verdes, porque contaminan muy poco, y no emiten los gases que producen el efecto de invernadero.

4.1.2 *Importancia de la energía renovable*

La importancia del impulso a las energías renovables y la eficiencia energética no sólo radica en reducir la dependencia en la utilización de los combustibles fósiles; también se han creado nuevas oportunidades económicas y se ha desarrollado un mercado energético totalmente diversificado y más amigable con el medio ambiente. A pesar de la predominancia pronosticada de los combustibles fósiles, se espera que el uso de las energías renovables registre un aumento significativo. La incorporación de nuevas fuentes de generación de energía renovable, a la matriz energética continúa siendo un tema de interés mundial, no tanto por su peso como oportunidad de negocio, sino por los efectos nocivos que significan para el medio ambiente el uso creciente de fuentes de energía térmicas o convencionales. (Barrangan & Llanes, 2020).

4.1.3 *Energía por Biomasa*

Se considera biomasa a un grupo de productos energéticos y materias primas de tipo renovable que se originan a partir de materia orgánica formada por vía biológica. Esta definición excluye expresamente los combustibles fósiles y las materias orgánicas derivadas de aquéllos, como los plásticos y productos sintéticos, (Organización de las Naciones Unidas, 2007).

4.1.4 *Biomasa*

El término biomasa, en el sentido amplio, se refiere a cualquier tipo de materia orgánica que haya tenido su origen inmediato en el proceso biológico de organismos recientemente vivos, como plantas, o sus desechos metabólicos (el estiércol); e concepto de biomasa comprende productos tanto de origen vegetal como de origen animal. En la actualidad se ha aceptado este término para denominar al grupo de productos energéticos y materias primas de

tipo renovable que se origina a partir de la materia prima orgánica formada por vía biológica, (Salinas Catellas & Gasca Quezada, 2009).

4.1.5 Tipos de Biomasa

Atendiendo a su origen, los distintos tipos de biomasa que pueden ser utilizados con fines energéticos, se clasifican en tres grandes grupos: natural, residual y cultivos energéticos.

4.1.5.1 Biomasa natural

Es la biomasa que se produce de forma espontánea en la naturaleza, en ecosistemas que no hayan sufrido intervención humana. Su explotación, en general, no es interesante por razones económicas ya que la gestión de la adquisición y transporte de las materias primas al lugar de utilización no son rentables. A pesar de ello, hoy en día constituye la principal fuente energética de pequeñas localidades y de países en vías de desarrollo, (De Lucas Herguedas & Del Peso, 2012).

4.1.5.2 Cultivos Energéticos

Este tipo de biomasa se produce exclusivamente con el fin de ser transformada en energía. Se trata de una alternativa aún muy reciente que está experimentando un gran auge. Los cultivos energéticos, realizados con la finalidad de producir Biomasa transformable en combustible (en lugar de producir alimentos, como ha sido la actividad tradicional de la agricultura) son ya realidad en algunos países, principalmente en Brasil y Estados Unidos, que enfocan la producción de caña de azúcar y maíz respectivamente a la obtención de etanol para carburante de automoción, (Afonso, 2013).

4.1.5.3 Biomasa Residual

Es la que se genera como consecuencia de cualquier proceso en que se consuma biomasa. Se produce en explotaciones agrícolas, forestales o ganaderas, así como los residuos de origen orgánico generados en las industrias y en los núcleos urbanos. La utilización de biomasa residual es, en principio, atractiva, pero limitada: en general, es más importante la descontaminación que se produce al eliminar estos residuos que la energía que se puede generar con su aprovechamiento. En muchos casos, sin embargo, puede hacer autosuficientes desde el punto de vista energético a las instalaciones que aprovechan sus propios residuos tales como granjas, industrias papeleras, serrerías o depuradoras urbanas, (Fernández, 2003). En la **Figura 1** se aprecia el poder calorífico de diferentes tipos de biomasa.

Poderes caloríficos de diferentes tipos de biomasa				
TIPO DE BIOMASA	PCI			PCS
<i>Contenido en humedad (%)</i>	0	10	15	0
RESTOS DE CULTIVOS HERBÁCEOS				
■ Paja de cereales	4060	3630	3300	4420
■ Tallos de girasol	3700	3310	3090	4060
<i>Contenido en humedad (%)</i>	0	20	40	0
RESTOS DE CULTIVOS LEÑOSOS				
■ Sarmientos de vid	4200	3280	2310	4560
■ Ramas de poda del olivo	4240	3190	2135	4600
<i>Contenido en humedad (%)</i>	0	20	40	0
RESIDUOS FORESTALES				
■ Leñas y ramas				
■ Coníferas	4590	3590	2550	4950
■ Frondosas	4240	3310	2340	4600
■ Cortezas				
■ Coníferas	4670	3650	2650	5030
■ Frondosas	4310	3370	2380	4670
<i>Contenido en humedad (%)</i>	0	10	15	0
RESTOS DE AGROINDUSTRIAS				
■ Cáscara de Almendra	4400	3940	3690	4760
■ Cáscara de Avellana	4140	3710	3470	4500
■ Cáscara de Piñón		4570	4090	3830 4930
■ Cáscara de Cacahuete	3890	3480	3260	4250
■ Cascarilla de arroz		3770	3370	3150 4130
<i>Contenido en humedad (%)</i>	0	15	35	0
RESTOS DE INDUSTRIAS FORESTALES Serrines y virutas				
■ Coníferas	4880	4520	3796	4880
■ Frondosas de clima templado	4630	4270	3580	4630
■ Frondosas tropicales	4870	4520	3780	4870

Figura 1. Poderes caloríficos de diferentes tipos de biomasa (Fernández, 2003).

4.1.6 Características energéticas de la biomasa

Según, (De Lucas Herguedas & Del Peso, 2012), la evaluación de la viabilidad técnica y económica de un proceso de conversión de la biomasa en energía requiere considerar ciertos parámetros y condiciones, agrupados en:

4.1.6.1 Composición química

Los diferentes tipos de biomasa están formados por una parte orgánica, una inorgánica y agua. Durante la combustión, se quema la parte orgánica, la inorgánica influye en el proceso de combustión y forma la ceniza o residuo sólido. La composición química de la biomasa original se puede conocer realizando análisis de los elementos más importantes, como carbono (C), hidrógeno (H), nitrógeno (N), azufre (S), y en algunos casos cloro (Cl). También contiene oxígeno (O), pero este elemento no se determina directamente, sino que se calcula a partir de la diferencia entre el peso total y la suma del resto de elementos más las cenizas, (De Lucas Herguedas & Del Peso, 2012).

4.1.6.2 Contenido de humedad

La humedad contenida en la biomasa varía dependiendo del tipo de biomasa, pretratamiento y almacenamiento. En algunos casos, la biomasa es secada con la finalidad de aumentar la eficiencia de la combustión. El incremento de la humedad reduce la máxima temperatura de combustión posible e incrementa la necesidad del tiempo de residencia en la

cámara de combustión, lo que deriva en la reducción del espacio para la prevención de las emisiones resultantes de una combustión incompleta, (Saidur, Abdelaziz, Demirbas, Hossain, & Mekhilef, 2011). Para (De Lucas Herguedas & Del Peso, 2012). La mayoría de los procesos de conversión energética requieren valores de humedad relativa inferiores al 30%. Con valores superiores se hace necesaria la implementación de operaciones de acondicionamiento y secado previas al proceso de conversión de energía.

4.1.6.3 Porcentaje de cenizas

Para determinar el contenido en cenizas de un biocombustible se realiza el calentamiento de la muestra a 550 °C en presencia de aire durante aproximadamente cinco horas (o hasta alcanzar peso constante). En estas condiciones, se asegura que toda la parte volátil de la biomasa se ha liberado y que todo el carbono fijo se ha oxidado, de tal modo que el residuo resulta de un análisis inmediato del combustible, es siempre inferior al de la materia minera presente en la biomasa ya que una parte de esta se volatiliza durante el proceso de calentamiento. Por ser una fracción inerte, la energía disponible de cualquier combustible se reduce proporcionalmente a su contenido de cenizas, (Nogués, 2010).

4.1.6.4 Poder calorífico

El contenido calórico por unidad de masa es el parámetro que determina la energía disponible en la biomasa y se expresa como la cantidad de energía por unidad física (ej. Joule por kilogramo). Es la energía que se libera en forma de calor cuando la biomasa se quema completamente. De manera más concreta, el poder calorífico superior (PCS) es aquel calor que verdaderamente se produce en la reacción de combustión, y el inferior (PCI) el realmente aprovechable, producido sin utilizar la energía de la condensación del agua y de otros procesos, (De Lucas Herguedas & Del Peso, 2012).

En la **Figura 2** se aprecia el poder calorífico inferior de biomasa agrícola y forestal en el Ecuador.

TIPO DE BIOMASA		PODER CALORÍFICO INFERIOR (MJ/kg)
AGRICOLA	Palma Africana residuo de campo	12,471
	Palma Africana residuo de proceso	16,404
	Banano residuos de campo	12,625
	Banano residuos de empaque	4,180
	Cacao residuo de campo	6,464
	Cacao residuo beneficio	15,526
	Cacao residuo de proceso	12,000
	Arroz residuo de campo	13,349
	Cáscara de Arroz	14,951
	Caña de Azúcar residuo de campo	19,849
	Maíz Duro residuo de campo	12,553
	Plátano residuo de campo	12,625
	Plátano residuos de empaque	4,180
	Café residuo de campo	6,464
	Café residuo de beneficio	13,460
	Café residuo de proceso	12,000
	Palmito residuo de campo	12,603
	Palmito residuo de proceso	15,630
	Piña residuo de campo	9,036
Piña residuo de proceso	11,081	
FORESTAL	Residuo de monte implantado	19,259

Figura 2. Valores del poder calorífico de biomasa agrícola y forestal (Atlas Bioenergético del Ecuador, 2014).

4.1.6.5 Densidad Aparente

La densidad aparente tiene que ver con el modo cómo cada tipo de biocombustible sólido tiene de a llenar un volumen. De otra manera, la densidad aparente, es la cantidad de peso de biocombustible sólido que se puede acumular en un volumen dado. La densidad aparente de un material varía, fundamentalmente, con el grado de compactación que haya sufrido, con su compresibilidad, así como con el contenido de humedad que presente, (Nogués, 2010).

Los combustibles que presentan una densidad aparente elevada favorecen la relación de energía por unidad de volumen, ya que se requieren menores tamaños de los equipos y se aumenta el tiempo que transcurre entre cargas del equipo. Por el contrario, las materias primas de baja densidad aparente necesitan un mayor volumen de almacenamiento y transporte, (Del Peso et al., 2012).

4.1.7 Arroz (*Oryza sativa*)

El cultivo de arroz (*Oryza Sativa*) es de ciclo corto es decir su período dura en promedio entre 120 -130 días. Este se ha constituido en un componente clave en el desarrollo económico del Ecuador principalmente para los cantones de las provincias arroceras como Guayas, Los Ríos, El Oro y Loja. Este cultivo es uno de los que garantizan la soberanía alimentaria del país. A nivel mundial, se cultivan más de 164 millones de hectáreas, superficie en la cual se produce, en promedio cerca de 756 millones de toneladas de este cereal. En el país, el arroz se produce

en dos épocas durante el año, una en invierno y una de verano, (MAG, 2022). En la **Figura 3** se aprecia las propiedades de arroz en el Ecuador.

Producción	1.565.535 t/año en cáscara
Superficie sembrada total	411.459 ha
Tipo de Cultivo	Transitorio
Provincias productoras importantes (Producen más del 70% de la producción total del país)	Guayas Los Ríos
Otras Provincias	Manabí Loja El Oro
Período de Cosecha	Abril - Mayo y Septiembre - Noviembre
Producto	Arroz
Variedades	INIAP 2, INIAP 6, INIAP 7, INIAP 415, INIAP 10, INIAP 11, INIAP 12, INIAP 13, INIAP 14, INIAP 15, INIAP 16, INIAP 17, INIAP 18
Residuo de campo	Panca (pajilla)
Residuo de procesamiento	Cáscara
Utilización	Industria Alimenticia
Destino	Consumo interno
Tecnologías de aplicación	Gasificación Combustión
PCI - Residuos de Campo	13,349 (MJ/kg)
Producción de Energía Eléctrica	744,38 kWh/t (base seca)

Figura 3. Arroz en el Ecuador (Atlas Bioenergético del Ecuador, 2014).

La **Figura 4** se observa el ranking de las provincias con mayor rendimiento y participación en la producción de arroz en el Ecuador.

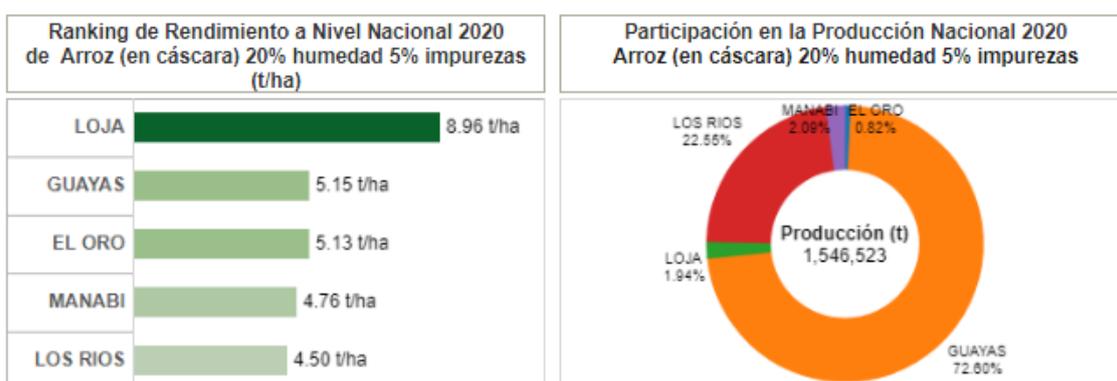


Figura 4. Rendimiento y Participación en la Producción Nacional (SIPA, s.f.).

4.1.8 Estimación de residuos agrícolas del arroz.

- En la producción de este cultivo se produce paja de arroz entre un 30 y 45% y en particular se produce cascarilla de arroz durante su procesamiento la en grandes cantidades: 100 kg de arroz producen 20 kg de cascarilla (Red Española de

Compostaje, 2014). Los residuos del procesamiento del arroz son en promedio 20% de su producción, (Peñaranda Gonzáles, Montenegro Gómez, & Abad, 2017).

4.1.9 Producción agrícola de arroz en el cantón Macará

En el cantón Macará la base de su economía y sistema económico es la agricultura y ganadería principalmente, seguido del comercio actividad característica por ser un cantón fronterizo y que por este hecho se convierte en comercio internacional. Los principales productos agrícolas del cantón Macará son el maíz y el arroz. En las parroquias rurales el principal producto cultivable es el maíz y en la cabecera cantonal el arroz.

El sector arrocero, de acuerdo con el Gobierno Autónomo Descentralizado del cantón Macará (2015) “Al sector arrocero lo constituyen 121 productores de arroz, destinando 565,71 hectáreas de terreno, obteniendo una producción estimada por campaña de 76.407,40 quintales de arroz; es necesario mencionar que en el año se dan dos campañas, sumando anualmente una producción de 152.814,80 quintales de arroz.”

La principal actividad agrícola es la producción y comercialización de arroz, en sus diversas formas bajo riego, así se realiza un sistema productivo combinado en 1.244,14 has. Sistema agropecuario combinado. - Se caracteriza por desarrollar actividades de cultivo de arroz, ocupa una superficie mínima del 2,17%, y se ubica en los barrios Guatara, Vadeal, Hito Cachaco, Hito la Tina, Hito Macará, Pénjamo. En el cultivo de arroz se utiliza semilla mejorada, la maquinaria y equipos que disponen son propios, la comercialización del ganado de arroz es en pie y se distribuye a las ciudades de: Macará, Machala, Guayaquil, Loja, Cuenca. En la **Figura 5** se aprecia en cultivo de arroz en el cantón Macará.



Figura 5. Cultivo de arroz en el cantón Macará (MAG, 2020).

4.1.10 Clasificación de las Piladoras de Arroz

El Consejo Consultivo del arroz ha clasificado las plantas procesadoras en dos categorías, que se describen a continuación.

4.1.10.1 Piladora de primera categoría

Este grupo comprende a las plantas piladoras con capacidad para procesar más de 20qq/hora.

Algunas de estas empresas disponen de facilidades de almacenamiento y secado artificial, lo que les permite operar durante todo el año, pero numerosas plantas carecen de medios para secar el grano, función que realiza en tendales con ayuda de la radiación solar. Operación que es muy generalizada en el país, debido a que se tiene inconveniente que a menudo al grano se le extrae un contenido de humedad mayor que el requerido para poder ser pilado, lo que ocasiona la partidura de los granos durante su procesamiento, (Echeverría Cruz & López Mena, 2010).

4.1.10.2 Piladora de segunda categoría

Este grupo comprende a las plantas piladoras con capacidad para procesar menos de 20qq/hora.

El secado del grano se realiza en tendales y solo disponen de bodegas para un almacenamiento temporal. De esta manera, estas plantas pueden operar en la época de cosecha, con un máximo de 120 días al año. El equipo de pilado está compuesto de un descascarador y separador de arrocillo y polvillo. No blanquea ni pule el grano. El producto final resulta con elevado porcentaje de grano quebrado, (Echeverría Cruz & López Mena, 2010).

4.1.11 Piladoras de arroz en el cantón Macará

El Geoportal de Agricultura del Ecuador clasifica a las piladoras según la capacidad pilado instalada en 3 grupos estos son:

- Pequeña: Con una capacidad de pilado de alrededor de 1 a 20 qq/h.
- Mediana: Con una capacidad de 20 a 40 qq/h.
- Grande: Con una capacidad mayor a 40qq/h.

En el cantón Macará se encuentran ubicadas 5 procesadoras de arroz de las cuales tres se encuentran en la categoría de Grande y tres en la categoría de Mediana.

Las piladoras de arroz que se encuentran en la categoría de grandes son las siguientes piladora: El Macareñito, Carmita, y Gallo & Rosillo Cia. Ltda.; y las piladoras de categoría Mediana son: Piladora Macará y Piladora del Pueblo. En la **Figura 6** se observa la ubicación de las piladoras de arroz.

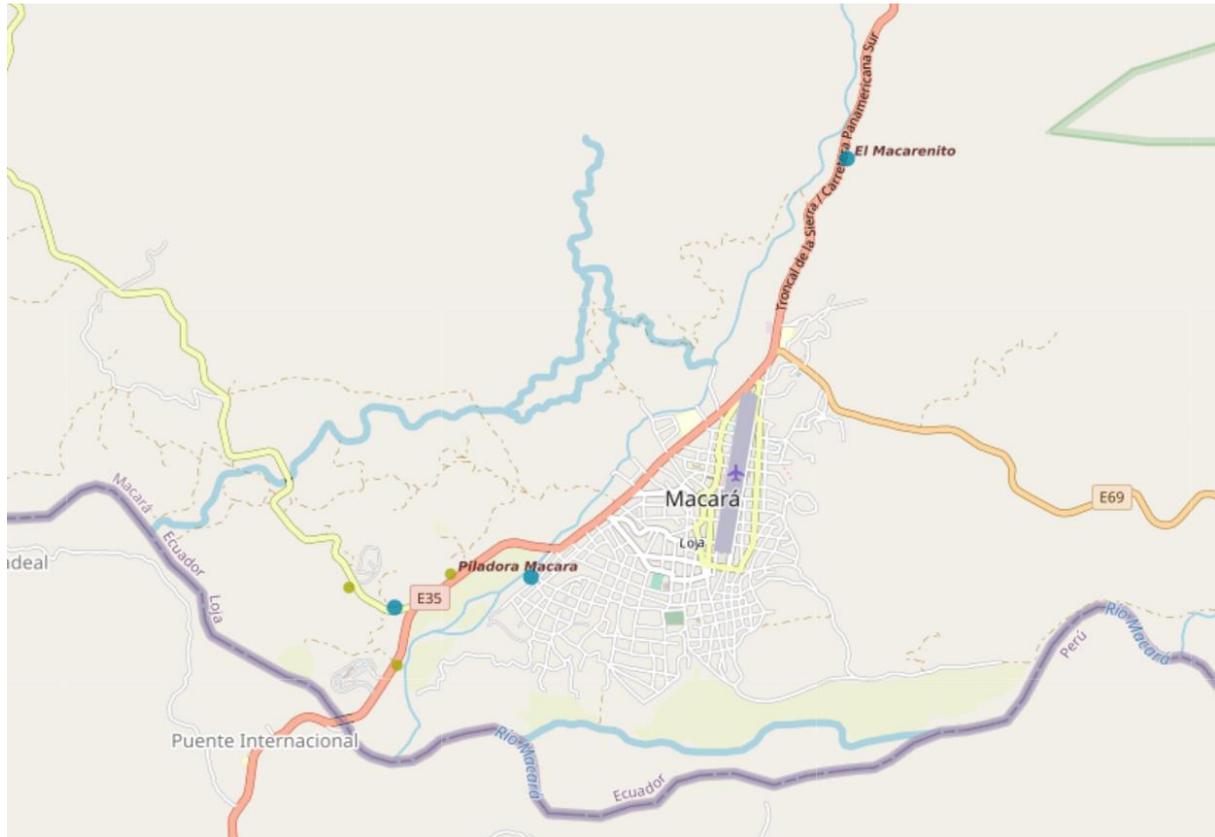


Figura 6. Piladoras de arroz en Macará (SIPA, s.f.).

4.2 Capítulo II: Logística de Transporte de la biomasa

La logística para el funcionamiento de una planta de biomasa integra todas las actividades necesarias para su puesta en funcionamiento y su mantención: desde la manipulación de la materia prima que la abastece hasta su almacenamiento, pasando por el necesario transporte entre el origen y su lugar de destino. La materia prima es la biomasa, que debe ser recogida bien en el monte, bien en un almacén intermedio, y transportada hasta la planta, (González, 2014).

4.2.1 Transporte y Distribución

El medio de transporte más apropiado para el reparto de biomasa depende del tipo y la forma de la biomasa, la cantidad a transportar, el tipo de cliente y la distancia a recorrer. Sea cual sea el método de transporte elegido, conviene que éste suministre siempre el mismo tipo de biomasa para garantizar la pureza del combustible, evitando mezclas entre la biomasa y la anterior mercancía transportada ya que es inevitable la presencia de restos de esta última. Además, dependiendo del tipo de sistema de transporte utilizado y la diligencia con la que se practica su manipulación, el combustible puede verse contaminado con tierra o arena, lo que hace aumentar su contenido de cenizas y silicio (IDAE, Guía técnica Instalaciones de biomasa térmica en edificios, 2009).

4.2.1.1 Volquete

Apto para un amplio rango de cargas, se puede utilizar para el transporte de astillas de madera, pellets y algunos residuos forestales o agroindustriales. Con un diseño adecuado del recinto de almacenamiento, el suministro puede ser tan fácil como verter la carga en el silo o bombearla mediante un sistema neumático. Así, se elimina la necesidad de manipulación o equipamiento adicional, (IDAE, Guía técnica Instalaciones de biomasa térmica en edificios, 2009). En la **Figura 7** se observa el transporte de carga pesada propiedad de la piladora El Macareñito.



Figura 7. Volquete para transportar arroz a granel
Fuente: (Autor).

4.2.2 *Sistemas de Almacenamiento*

Según la (IDAE, Guía técnica Instalaciones de biomasa térmica en edificios, 2009), el lugar destinado al almacenamiento de los biocombustibles sólidos debe estar destinado exclusivamente para este uso, pudiendo hallarse dentro o fuera del edificio. Cuando el almacenamiento esté situado fuera del edificio podrá construirse en superficie o subterráneo, pudiendo utilizarse también contenedores específicos de biocombustible. La elección del sistema y el volumen de almacenamiento depende de varios factores: características de los sistemas de distribución y suministro de biomasa, necesidad anual de biomasa, espacio disponible para caldera y almacén, etc.

4.2.3 *Sistema de transporte*

Tanto el sistema de transporte y distribución propio como el subcontratado suponen una serie de beneficios para las empresas. Se menciona algunas de cada caso:

- **Transporte Propio:** Las empresas gozan de una mayor flexibilidad en lo que se refiere a horarios, plazos, condiciones del servicio, entre otros, pues finalmente es ella misma

la que decide cómo y cuándo se efectúa la entrega de las existencias. Sin embargo, como contrapartida puede disminuir la eficiencia del servicio, un elemento que se da casi por garantizado cuando se le delega a un tercero, (Pérez, 2017).

- **Transporte subcontratado:** Si quieres optar por la segunda opción, antes debes realizar un análisis en el que contemples factores como el servicio ofrecido, la seguridad, las garantías del mantenimiento de la calidad del producto transportado y, claro, los costes. Eso sí, debes tener en mente que estos últimos serán siempre fijos, pues al no tener derecho sobre el medio de transporte, tendrás que pagar lo que corresponde por su uso temporal. Por supuesto, el éxito del modelo subcontratado dependerá también de la capacidad de negociación con las empresas especializadas en este sector, especialmente en lo que se refiere a las condiciones, (Pérez, 2017).

4.2.4 Máquina empacadora de cascarilla de arroz (Compactadora)

Esta máquina está diseñada especialmente para embalar material suelto, por ejemplo, cáscara de arroz, afeitado de madera/virutas, aserrín, láminas de maní. Esta máquina puede darse cuenta después de embalar, la bala se convierte en una briqueta dura, sin embalaje ni flejes o las pacas se pueden embalar con una bolsa de plástico o una bolsa de lana, lo que hace que sean fáciles de transportar y apilar. Estas máquinas son ampliamente utilizadas en fábricas de materiales de alimentación de animales/ropa de cama, fábricas de fertilizantes de plantas y granjas, etc, (Rugao Huicheng Hydraulic Machinery Co., 2013). En la **Figura 8** se aprecia la máquina empacadora de cascarilla de arroz.



Figura 8. Máquina Empacadora de cascarilla de arroz (Rugao Huicheng Hydraulic Machinery Co., 2013).

4.2.5 *Empacadora de cascarilla de arroz móvil*

Embolsadora de compresión es un tipo de enfardado o embolsado unidad que es comúnmente utilizado por las empresas necesitan bolsa rápida producción de fardos con relativamente gran cantidad de material. Es adecuado para el tratamiento de virutas de madera, viruta de madera, ensilado, textil, hilados de algodón, alfalfa, cascarilla de arroz y otros muchos materiales compresibles natural o sintético.

Un diseño muy sencillo, con muy pocas partes móviles reduce el costo de mantenimiento y mejora la confiabilidad, el diseño de cuerpo horizontal permite al usuario sólo tiene que cargar los materiales en la tolva de forma manual o automáticamente y la máquina hace el resto, (Made in China, 2023). En la **Figura 9** se aprecia la compactadora móvil de cascarilla de arroz.



Figura 9. Compactadora móvil de cascarilla de arroz (Made in China, 2023).

4.3 **Capítulo III: Tecnologías y proceso de aprovechamiento energético de la biomasa.**

Desde el punto de vista energético, la biomasa se puede aprovechar de dos maneras; directamente por combustión para producir calor o transformándola en combustible para su mejor transporte y almacenamiento. Las propiedades y naturaleza de la biomasa son muy variadas, en el caso de biomasa animal estará compuesta de lípidos y proteínas, en cambio, en la biomasa vegetal serán abundantes los hidratos de carbono. Según (Mujal Rosas, 2003), el aprovechamiento energético de la biomasa en general exigirá la utilización de procesos de transformación que pueden ser:

- **Físicos:** Son procesos que actúan físicamente sobre la biomasa como pretratamientos y están asociados a las fases primarias de transformación, dentro de lo que puede denominarse fase de acondicionamiento, como, triturado, astillado, compactado e incluso secado.

- **Biológicos:** Son los llevados a cabo por la acción directa de microorganismos o de sus enzimas, generalmente llamado fermentación. Son procesos relacionados con la producción de ácidos orgánicos, alcoholes, cetonas y polímeros.
- **Termoquímicos:** están basados en la transformación química de la biomasa, al someterla a altas temperaturas (300°C - 1500°C). Cuando se calienta la biomasa se produce un proceso de secado y evaporación de sus componentes volátiles, seguido de reacciones de craqueo o descomposición de sus moléculas, seguidas por reacciones en la que los productos resultantes de la primera fase reaccionan entre sí y con los componentes de la atmósfera en la que tenga lugar la reacción, de esta forma se consiguen los productos finales. En la **Figura 10** se muestra la clasificación de los procesos de transformación de la biomasa.

A PARTIR DE BIOMASA SECA	
Procesos Termoquímicos	
COMBUSTIÓN	Calor Electricidad
GASIFICACIÓN	Gas pobre Gas de síntesis Metanol
PIRÓLISIS	Carbón vegetal Aceite de pirólisis Brea Vegetal Gases no condensables
A PARTIR DE BIOMASA HÚMEDA O SECA	
Procesos Químicos y Biológicos	
FERMENTACIÓN ALCOHÓLICA	Bioetanol
TRANSESTERIFICACIÓN Y ESTERIFICACIÓN	Metil ester (Biodiesel)
DIGESTIÓN ANAEROBIA (FERMENTACIÓN METÁNICA)	Biogás (Metano)

Figura 10. Clasificación de los procesos (Atlas Bioenergético del Ecuador, 2014).

4.3.1 Procesos Termoquímicos

Dentro de los procesos de transformación termoquímicos se cuenta con la pirólisis o degradación térmica de la biomasa, la gasificación, la combustión y la licuefacción. La pirólisis es un proceso de transformación básico, pues por un lado es posible obtener a partir de éste productos sólidos, líquidos o en forma de gas y por otro lado es el primer paso en los procesos de gasificación y combustión. La gasificación puede ser interpretada como un proceso de

pirólisis que busca maximizar la fracción de gas como producto del proceso. La combustión se realiza en una atmósfera reactiva con aire (u oxígeno) y arroja como producto principal calor. Con el uso de procesos adicionales o secundarios es posible obtener nuevos productos a partir del sólido, líquido y gas obtenido anteriormente en la transformación termoquímica (Wiest, 2004).

4.3.1.1 Combustión de biomasa

La combustión de la biomasa involucra varios aspectos que pueden afectar directamente su eficiencia y utilidad, la cual, de las propiedades de la biomasa y el tipo de aplicación de la combustión, como en el caso de generación de vapor saturado o sobrecalentado, ya que la tecnología a utilizar interferirá directamente en la eficiencia del proceso, (Barrera, Ramírez Contreras, & García Nuñez, 2018).

La biomasa, al tratarse de un combustible sólido, posee la misma ruta de combustión que el carbón, por lo que se distinguen las etapas de secado, devolatilización, gasificación, combustión y la oxidación de la fase gaseosa, (Nussbaumer, 2003).

El secado corresponde a la etapa en que el contenido de humedad es evaporado. La volatilización es el proceso en el cual se libera una gran variedad de productos gaseosos a través de la descomposición del combustible, (Basu, 2006). Los gases volátiles desprendidos son hidrocarburos que son quemados posteriormente. Tras la devolatilización, el carbón fijado en la biomasa es quemado, liberando así el calor hasta quedar reducido en ceniza, la cual está compuesta principalmente por los minerales presentes en la biomasa. En la **Figura 11** se observa las etapas de combustión de una partícula de biomasa.

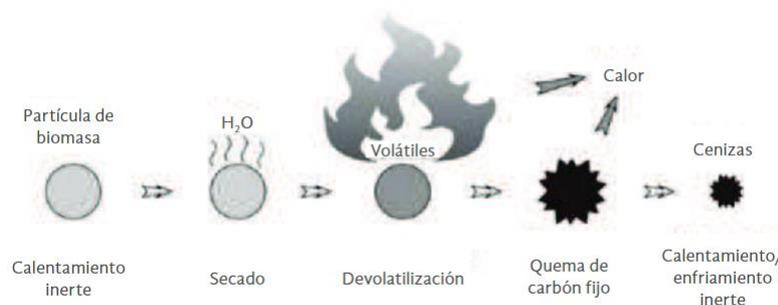


Figura 11. Ruta de Combustión de una partícula de biomasa (Basu, 2006).

4.3.1.2 Gasificación

Se denomina gasificación de biomasa a un conjunto de reacciones termoquímicas, que se produce en un ambiente pobre en oxígeno, y que da como resultado la transformación de un sólido en una serie de gases susceptibles de ser utilizados en una caldera, en una turbina o en

un motor, tras ser debidamente acondicionados. En el proceso de gasificación, la celulosa se transforma en hidrocarburos más ligeros, incluso en monóxido de carbono e hidrógeno. Esta mezcla de gases llamada gas de síntesis o “syngas”, tiene un poder calorífico inferior (PCI) equivalente a la sexta parte del poder calorífico inferior del gas natural, cuando se emplea aire como agente gasificante, (IDAE, 2007).

Existen dos familias de tecnologías principales de gasificación si se atiende al tipo de gasificador:

- La de lecho móvil que, a su vez, se subdivide dependiendo del sentido relativo de las corrientes de combustible (biomasa) y agente gasificante. Cuando las corrientes son paralelas, el gasificador se denomina “downdraft” o de corrientes paralelas; cuando circulan en sentido opuesto, se denomina “updraft” o de contracorriente.
- La de lecho fluidizado, en la que el agente gasificante mantiene en suspensión a un inerte y al combustible, hasta que las partículas de éste se gasifican y convierten en cenizas volátiles y son arrastradas por la corriente del syngas, (IDAE, 2007).

4.3.1.3 Pirólisis

La pirólisis es la conversión termoquímica de la biomasa en tres productos (ruta clásica): líquido (bioaceites), gas (biogás) y residuo carbonoso (biocarbón), por calentamiento de la biomasa, (alrededor de 500 °C), en ausencia de aire. Hay diferentes tipos de pirólisis en función de la velocidad de calentamiento y el tiempo de residencia de la biomasa en los reactores, (Urien, 2013).

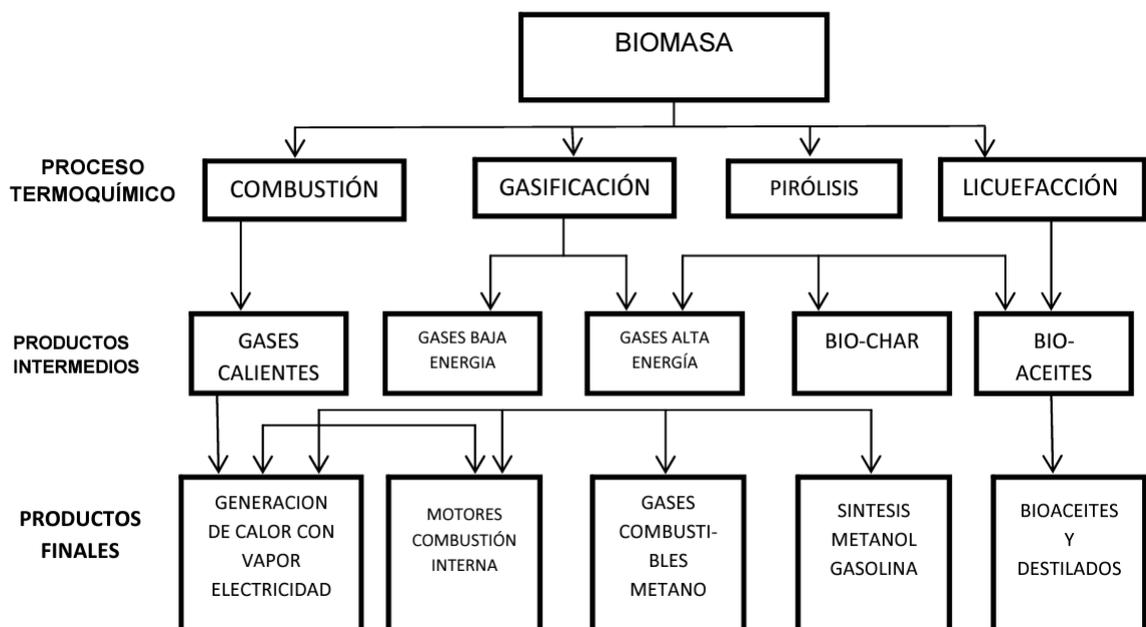


Figura 12. Esquema de los principales procesos termoquímicos y los productos intermedios y finales que se obtienen de ellos. (Urien, 2013).

4.3.2 Costo Total aplicado a un sistema de energía renovable

Se define como la suma de los costos de capital, fijos, variables y externos. Los costos de capital se entienden como la inversión realizada en un sistema, considerada como una variable independiente; los costos fijos son aquellos que no varían con la capacidad del proceso o sistema; a su vez, los costos variables son aquellos que sí cambian; y los costos externos son los asociados a la generación de electricidad, los cuales incluyen todos los daños incurridos en relación con la salud y el medio ambiente, (Koo et al., 2011).

4.3.2.1 Costos de Capital

Costo de inversión, también llamado como costo de capital (por su traducción literal del término utilizado en inglés “*Capital cost*”), y representa la cantidad de dinero o capital que hay que invertir para construir una planta eléctrica, se representa normalmente en valor absoluto (\$) para saber el monto total de construcción de una planta, o en valor específico en (\$/kW). (Voces en el Fenix, (s.f.)).

4.3.3 Ingresos

En este apartado se determina los ingresos obtenidos mediante la implementación del sistema ORC. Para ello, es posible obtener ingresos por ahorro en consumo eléctrico, por venta de energía eléctrica y venta de certificados por reducción de emisiones.

4.3.3.1 Tarifas preferenciales de energías renovables no convencionales

Para conocer el ingreso obtenido por venta de energía utilizaremos las tarifas dadas por el ARCONEL. La **Tabla 1** describe los precios preferenciales de venta de la energía eléctrica con cada tipo de tecnología de aprovechamiento de energías renovables en Ecuador.

Tabla 1

Precios preferenciales de energías renovables.

Nomenclatura	Tecnología	CNE USD/kWh
BASS	Bagazo	\$0,0805
LGAS	Biogás	\$0,0747
OVAW	Otros residuos vegetales y agrícolas	\$0,0488
RHKS	Cascara de arroz	\$0,0586
WWST	Residuos de madera	\$0,0769
RMWS	Residuos municipales renovables	\$0,0477

Fuente: (DIRECCIÓN DE REGULACIÓN TÉCNICA DEL SECTOR ELÉCTRICO, 2022).

4.3.3.2 Vigencia de los precios

Según la regulación No. CONELEC-001/13, con su modificación en la Resolución N° 017/12 (2016) “los precios establecidos en esta regulación se garantizarán y tendrán vigencia por un

periodo de 15 años a partir de la fecha de suscripción del título habilitante, para todas las empresas que hubieren suscrito dicho contrato”.

4.3.4 Mecanismos de Desarrollo Limpio

El Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), es una alternativa para cofinanciar determinados proyectos, en particular aquellos relacionados con el sector eléctrico, de este modo proyectos de generación con nuevas tecnologías, y la implantación de programas de eficiencia energética, deberían ser considerados en los planes de desarrollo energético de los países en desarrollo. El MDL, es uno de los tres mecanismos flexibles que contempla el Protocolo de Kyoto, el cuál compromete a los países desarrollados y a los países en transición hacia una economía de mercado a alcanzar objetivos cuantificables de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), (Barragan, 2012).

En forma general la **Tabla 2**, se indica que tipos de proyectos pueden considerarse como proyectos MDL, y el tipo de emisiones relacionados con estos:

Tabla 2
Tipos de Proyectos MDL.

Reducción de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero	
Energía	Procesos Industriales
CO ² -CH ₄ -N ₂ O	CO ₂ -N ₂ O-HFCs-PFCs-FS ₆
Quema de combustibles	Productos Minerales
Industria de Energía	Industria Química
Industria de Transformación	Producción de Metales
Industria de Construcción	Producción y consumo de Halocarburos y Hexafluoruros sulfurosos
Emisiones fugitivas desde combustibles	sulfurosos
Combustibles sólidos, líquidos o gaseosos	Otros
Agricultura	Residuos
CH ⁴ -N ₂ O	CH ₄
Cultivo de arroz	Disposición de Residuos Sulfurosos
Quema de residuos de la agricultura	Tratamientos de Residuos Industriales
Otros sectores.	Incineración de residuos

Fuente: (Camargo, Carvalho, Garcia, & Sica, 2006).

4.3.4.1 Bonos de Carbono

Concebidos como herramientas financieras que buscan crear incentivos para los países y compañías que dentro de sus procesos utilicen tecnologías menos contaminantes o lo hagan en una escala menor a la esperada (Ochoa, 2016).

4.3.4.2 Ciclo de un proyecto de Bonos de Carbono

Para que exista la venta de bonos carbono dentro del esquema MDL (Mecanismos de Desarrollo Limpio), debe existir un ofertante y un demandante, el ofertante recibirá fondos

económicos para ayudar en los gastos del proyecto, mientras que el demandante, que generalmente es una empresa de algún país desarrollado, acredita las reducciones de emisiones como si las hubiera realizado él mismo y las utiliza para cumplir su compromiso internacional, (Procordova, 2007). En la **Figura 13** se observa el ciclo de un proyecto de bonos de carbono.

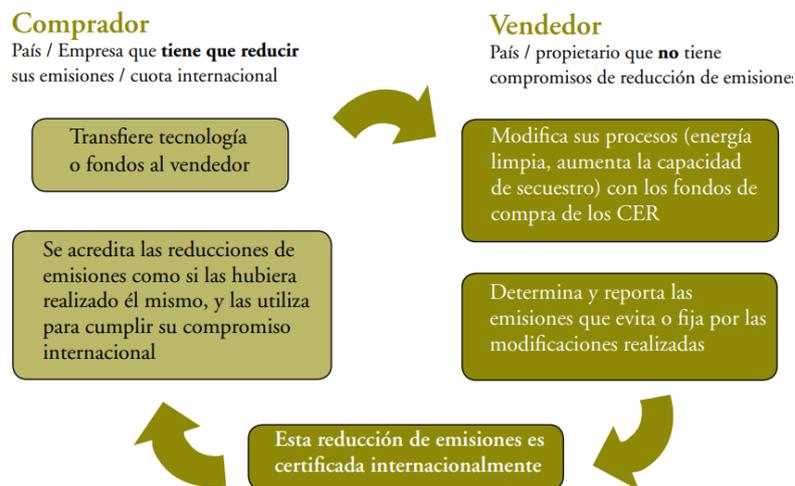


Figura 13. Ciclo de un proyecto de Bonos de Carbono (Procordova, 2007).

4.3.5 Indicadores económicos de rentabilidad

El establecer los rubros de ingresos y egresos del proyecto nos permite conocer la viabilidad financiera del proyecto, medida a través de indicadores financieros. Para determinar la rentabilidad económica del proyecto se debe calcular indicadores financieros como: valor actual neto (VAN), la tasa interna de retorno (TIR), pay-back (plazo de recuperación de inversión inicial).

4.3.5.1 Tasa de Descuento

En el Ecuador, al igual que en otros países de América Latina, se emplea una tasa fija de descuento, por lo general del 12%. Esta tasa no se origina en una estimación de las preferencias individuales o sociales sobre el tiempo, sino que, por el contrario, constituye una tasa administrativa sugerida tanto por organismos internacionales (por ejemplo, el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y el Banco Mundial) como por instituciones nacionales de planificación, (Castillo & Zhangallimbay, 2021).

4.3.5.2 Valor Actual Neto (VAN)

Este método es empleado para determinar si el desarrollo de un proyecto es viable o no. El procedimiento consiste en actualizar al presente los flujos de caja futuros que se van a generar durante la vida útil del proyecto. A cada flujo de caja futuro se le aplica un descuento mediante una tasa de descuento y al valor resultante en año cero se le resta el importe de la inversión inicial obteniendo así el VAN, (Criollo & Pinzón, 2018).

La interpretación del VAN, su significado y el proceso para la toma de decisiones se resumen en la **Tabla 3**.

Tabla 3
Interpretación del VAN.

Valor	Significado	Decisión
$VAN > 0$	La inversión producirá beneficios por encima de la rentabilidad exigida.	El proyecto puede aceptarse.
$VAN < 0$	La inversión producirá pérdidas por debajo de la rentabilidad exigida.	El proyecto debería no ser aceptado.
$VAN = 0$	La inversión no producirá beneficios ni pérdidas.	El proyecto no conlleva ningún resultado económico. La decisión debe tomarse en función de otros criterios.

Fuente: (Sánchez Lario, 2017).

4.3.5.3 Tasa Interna de Retorno (TIR)

Es la tasa de interés que proporciona un proyecto con un valor actual neto nulo, es decir, la tasa de interés por la cual los costes de inversión conducen a beneficios, (Sánchez Lario, 2017).

Los criterios tomados en cuenta para aceptar o rechazar el proyecto después de haber calculado el VAN son los siguientes:

Si $TIR \geq t_{desc}$ (tasa de descuento), Se acepta el proyecto.

Si $TIR \leq t_{desc}$ Se rechaza el proyecto.

4.3.5.4 Plazo de recuperación de inversión inicial (PAY-BACK)

Se define como el tiempo que se tarda en recuperar la inversión inicial a través de los flujos de caja generados. Se considera que la inversión ha sido recuperada en el año en el que los flujos de caja acumuladas en valor presente superan la inversión inicial, (Figuroa Luque, 2013).

5. Metodología

5.1 Área de trabajo

El área de estudio es el cantón Macará se encuentra ubicado al extremo sur occidental de la república del Ecuador, a $79^{\circ}57'49.39''$ de longitud oeste y $4^{\circ}23'13.11''$ de latitud Sur, tiene 575 kilómetros cuadrados, constituyendo el 5,2% de la superficie de la provincia de Loja. (Unidad de Sistemas Informáticos del GAD Macará, 2022). Se encuentra a una altura de 440 metros sobre el nivel del mar. Las coordenadas del lugar de emplazamiento se describen en la **Tabla 4** y la **Figura 14** se observa al cantón Macará.

Tabla 4
Coordenadas geográficas del cantón Macará

COORDENADAS	DECIMAL	GRADOS
Latitud	-4.383333°	4°23'0" S
Longitud	-79.95°	79°57'0" O
UTM	9515419 616506 17M	

Fuente: (Google Earth, 2022).



Figura 14. Ubicación geográfica del cantón Macará (Google Earth, 2022).

5.2 Equipos y materiales

5.2.1 Equipos

5.2.2 Materiales

Recursos tecnológicos

➤ Software

- QGis
- Google Earth Pro
- Excel
- Word

➤ Herramientas digitales

- Geoportal del Agro Ecuatoriano
- Sistema de Información Pública Agropecuaria (SIPA)

Recursos físicos

- Materiales de oficina
- Materiales bibliográficos
 - Libros
 - Tesis
 - Artículos
 - Páginas Web

Recursos Humanos

- Director Ing. Carlos G. Samaniego O.; MG. SC.
- Estudiante.
- Asesores externos, entre otros.

5.3 Procedimiento

Para el correcto desarrollo de esta investigación se estructuró la siguiente metodología:

En primer lugar, se debe identificar las fuentes de biomasa generadas en el lugar de emplazamiento, así como también, recopilar los registros del volumen de generación de residuos por unidad de superficie, tomando como referencia las Encuestas de Producción Agropecuaria Continua (ESPAC), y las Series Estadísticas Anuales Nacionales del Ecuador a nivel de provincia de los años 2017 hasta 2021; posteriormente se debe caracterizar la biomasa en base a parámetros físicos y químicos.

Así mismo, se estimará los costos de transporte en base a la distancia que se debe recorrer desde los puntos de generación de biomasa hasta el lugar donde se realizará el aprovechamiento energético.

Finalmente se debe plantear alternativas de aprovechamiento que permitan estimar la factibilidad de aplicación de tecnologías para la conversión energética de la biomasa de cascarilla de arroz disponible en el cantón Macará, por último, se elaborará la evaluación económica considerando los beneficios, consumo energético, costos de inversión inicial, costos fijos y variables de operación y mantenimiento para obtener el VAN, TIR y Pay-back del proyecto.

Los distintos módulos de se compone la metodología se describen brevemente a continuación:

M1 - Módulo Fuente de biomasa: Cascarilla de arroz. Se identifican las principales fuentes de biomasa y se evalúa cantidad, características, ubicación, estacionalidad y disponibilidad de este recurso.

M2 - Módulo de logística de transporte de biomasa de cascarilla de arroz. Se evalúan las posibles estructuras logísticas, tecnologías, y costes de transporte para identificar ubicaciones óptimas o evaluar ubicaciones de interés.

M3 - Módulo de tecnologías de aprovechamiento de biomasa. Caracteriza las distintas tecnologías de aprovechamiento en cuanto a eficiencia energética, costes y restricciones. Elaborando finalmente la evaluación económica.

5.4 Procesamiento y análisis de datos

5.4.1 Módulo de Fuentes de biomasa: Cascarilla de arroz

5.4.1.1 Identificación de fuentes de biomasa residual

El Ecuador por medio del instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC), realiza con frecuencia anual una Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua (ESPAC) para obtener información sobre las hectáreas cosechadas y producción de cada cultivo en el sector agrícola, la encuesta utiliza la metodología de Muestreo por Marcos múltiples (MMM), donde se combina la información del Muestreo del Marco de Áreas (MMA), y el muestreo de Marco de Lista (MML), (ESIN Consultora S.A, 2014). Ver **Figura 15**.

Muestreo de Marco de Áreas (MMA): superficie agropecuaria sembrada en el Ecuador, dividida en segmentos de análisis.

Muestreo de Marco de Lista (MML): listado de especies sembradas en Ecuador.

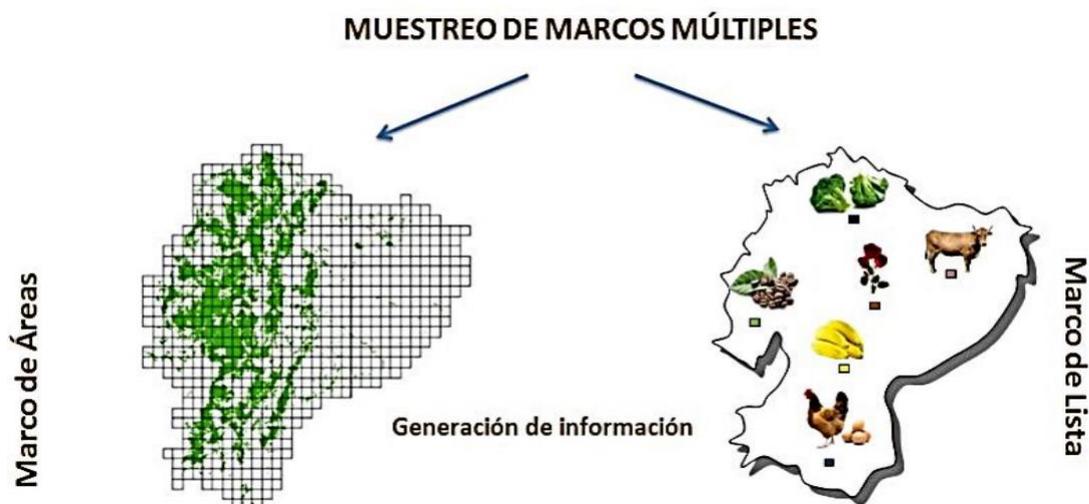


Figura 15. Muestreo de Marcos de Áreas (izquierda); Muestreo de Marco de Lista (derecha) (Atlas Bioenergético del Ecuador, 2014).

5.4.1.2 Cuantificación de la biomasa de cascarilla de arroz

La cuantificación se realiza mediante datos directos de estudios precedentes y estimaciones basadas en coeficientes de generación superficial, generación de residuos en función de la producción agrícola o en función de la actividad agroalimentaria e industrial (facturación, número de empleados, producción).

Los tipos de coeficientes utilizados son los siguientes:

5.4.1.2.1 *Coeficientes de generación superficial de residuos.*

CRS. - (t residuos / km²; t residuos / ha) para cada cultivo, superficie forestal o cultivo energético. Asignan una producción de residuos por hectárea o km², se basan en estudios anteriores realizados por comunidades autónomas y otras fuentes.

5.4.1.2.2 *Coeficientes de generación de residuos en función de la producción agrícolas.*

CRP. - (t residuos/ t fruto). Relacionan la cantidad de residuos con la cantidad del fruto recolectado.

5.4.1.2.3 *Coeficiente de residuos en función de la actividad agroindustrial o industrial.*

Estos coeficientes pueden tener las unidades: [t residuo] / [t producto], [t residuo] / [unidad producida · 10³]. Cuando el coeficiente en cuestión se base en el producto final obtenido el coeficiente será del tipo CR_P y cuando este referido a residuo generado en función de la materia prima procesada se llamará CR_{MP}.

- Utilización de los coeficientes CR_{MP}.

Para la industria a analizar la biomasa residual total (t/año) se calculará con la ecuación (1):

$$\text{Biomasa total} \left(\frac{t}{\text{año}} \right) = \text{Consumo materia prima} \left(\frac{t}{\text{año}} \right) * CR_{MP} \left(\frac{t}{t} \right) \quad \text{Ec. (1)}$$

donde CR_{PM} es el coeficiente de generación de residuos en función de la producción.

Consumo de materia prima (t/año) Es la producción anual de producción de arroz en cascarilla. La **Tabla 5** muestra el coeficiente de generación de cascarilla de arroz.

Tabla 5

Coeficiente de generación de residuos de cascarilla de arroz.

Planta y producto	Residuo	Residuos/Producto CR _{MP} (t/t)
Piladora de arroz	Cascarilla de arroz	0,2

Fuente: (Peñaranda González, Montenegro Gómez, & Abad, 2017).

5.4.1.3 Caracterización de biomasa residual y potencial de generación eléctrica

La caracterización puede basarse en datos directos, análisis específicos, informes sectoriales y bases de datos MAG y del ESPAC, estas presentan amplia tipología, información y elevada fiabilidad. Serán muy importantes para su gasificación/combustión, pre-tratamiento y aprovechamiento energético en general los siguientes parámetros básicos.

La caracterización de la biomasa residual agrícola para el presente estudio se realizó tomando como base los análisis: elemental, próximo y de los componentes propuestos por (Castells, y otros, 2005). En el tratamiento y valorización de los residuos, descripción a continuación:

5.4.1.3.1 Análisis Elemental

Permite determinar el contenido de los elementos que pueden gasificarse y supondrán un aporte calorífico en las reacciones de combustión de la biomasa, es decir, incluye el porcentaje en peso de carbono (C), oxígeno (O₂), hidrógeno (H), nitrógeno (N), azufre (S) y otros componentes. Es necesario analizar elementos adicionales que puedan modificar el proceso de combustión o que representen algún tipo de problema en cuanto a emisiones contaminantes como halógenos y metales.

5.4.1.3.2 Análisis Próximo

El análisis próximo permite determinar los porcentajes del material que se combustiona en estado gaseoso (material volátil), en estado sólido (carbono fijo) y el porcentaje de material de desecho inorgánico (cenizas); para (Buragohain, Mahanta, & Moholkar, 2010).

5.4.1.3.3 Análisis de los componentes (estructural)

El análisis de los componentes determina los porcentajes de contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina; según (Álvarez, 2013); el poder energético de la biomasa está directamente relacionado con la cantidad de celulosa y hemicelulosa, ya que son una potencial fuente de carbono (Loja, 2017).

5.4.1.3.4 Densidad Aparente

La cascarilla de arroz es de consistencia quebradiza, abrasiva y su color varía del pardo rojizo al púrpura oscura. Su densidad es baja, por lo cual al apilarse ocupa grandes espacios. El peso específico es de 125 kg/ m³, es decir, 1 tonelada ocupa un espacio de 8 m³ (Varón, 2005).

5.4.1.3.5 Potencial de Generación Eléctrica

El potencial de generación eléctrica se lo define como la energía química de la biomasa que puede ser transformada para su aprovechamiento (Perera, y otros, 2005); mientras que, el PCI de los residuos agrícolas expresa el contenido de energía calórica que pueden ser liberados mediante su combustión (ESIN Consultora S.A, 2014).

Para calcular el potencial teórico de generación eléctrica de la biomasa agrícola existente en Macará, se tomó como referencia la metodología utilizada por (Calderon Loor, Andrade , Lizarzaburu, & Masache, 2017) que propone la siguiente ecuación:

$$P_E = \frac{R_S * PCI * C_F}{3600} * 1000 \quad \text{Ec. (2)}$$

Donde:

PE: Potencial de generación de energía eléctrica (kilowatts hora kWh).

RS: Generación de residuos anuales (kilogramos kg).

CF: La selección del rendimiento global de la planta de obtiene considerando el tipo de proceso. de generación energético. (**Tabla 6**)

PCI: Poder Calorífico Inferior (MegaJoules/kg). (**Tabla 7**)

Tabla 6

Rendimiento Global de Planta Energética.

PROCESO	RENDIMIENTO	
	GLOBAL DE PLANTA n%	FUENTE
Combustión Directa	19,9	M. d. E. y. E. Renovable, "Atlas Bioenergético del Ecuador " 2014.

Fuente: (Autor).

Tabla 7

Poder Calorífico Inferior de Residuos Agrícolas.

	Tipo de Biomasa	LCV o PCI (MJ/kg)
	Agrícola	Arroz (cáscara)
Arroz residuo de campo		
Banano residuos de campo		8,4
Banano residuos de empaque		
Cacao residuo beneficio		11,33
Cacao residuo de campo		
Cacao residuo de proceso		
Café residuo de beneficio		10,64
Café residuo d campo		
Café residuo de proceso		
Caña de azúcar residuo de campo		19,85
Maíz duro residuo de campo		12,55
Palma africana residuo de campo		14,14
Palma africana residuo de proceso		
Palmito residuo de campo		14,12
Palmito residuo de proceso		
Piña residuo de proceso		10,06
Piña residuo de campo		
Plátano residuo de campo	8,41	
Plátano residuos de campo		

Fuente: (Atlas Bioenergético del Ecuador, 2014).

5.4.1.4 Análisis de dispersión / producción superficial de biomasa

Este análisis está basado en la ubicación de las fuentes puntuales o superficiales generadoras de biomasa residual. Este análisis permite obtener la densidad superficial de la masa de cascarilla. Puede efectuarse de manera aproximada considerando las piladoras como puntos de aporte de biomasa.

$$Densidad_i = \frac{Biomasa_{Total_i}}{Área_{municipal_i}} \quad \text{Ec. (3)}$$

Donde:

$Densidad_i$ = Densidad superficial de la biomasa de cascarilla de arroz.

$Biomasa_{Total_i}$ = Biomasa de cascarilla de arroz en cada punto de generación.

$Área_{municipal_i}$ = Área del cantón Macará.

5.4.1.5 Análisis de estacionalidad

Este análisis se basa en las fechas propias de las labores agrícolas generadoras de biomasa de cascarilla de arroz.

Basado en las pautas de producción y mantenimiento de las actividades agrarias e industriales generadoras de biomasa (recolección, poda, otros).

- Para el análisis de estacionalidad de la cascarilla de arroz se realizó una encuesta a los propietarios de las piladoras para conocer la cantidad procesada de arroz, los meses de operación y el porcentaje de pilado por mes.

Para obtener este análisis se realizará una encuesta a los propietarios de las piladora.

5.4.2 Módulo de logística de transporte de biomasa de cascarilla de arroz.

El objetivo es evaluar todas las ubicaciones posibles de la planta de biomasa desde el punto de vista de, tiempo y, sobre todo, costes de transporte. Las herramientas utilizadas se definen a continuación.

- Para conocer los costos aproximados del transporte de la biomasa de cascarilla de arroz se ejecutará una encuesta a los propietarios de transporte de carga pesada en el cantón Macará.
- Para determinar el tamaño de la muestra se evaluará en base a la ecuación descrita continuación.

$$n = \frac{z^2(p * q)}{e^2 \frac{(z^2(p * q))}{N}} \quad \text{Ec. (4)}$$

Donde:

n = Tamaño de la muestra.

z = Nivel de confianza deseado.

p = Proporción de la población con la característica deseada (éxito).

q = Proporción de la población sin la característica deseada (fracaso).

e = Nivel de error dispuesto a cometer.

N = Tamaño de la población.

La encuesta aplicada en el lugar de estudio nos permitirá conocer la siguiente información:

- Tipo de Transporte de carga pesada.
- Capacidad volumétrica de carga del transporte pesado (m^3).
- Costo por viaje (\$).
- Labores de carga y descarga.
- Tiempo empleado en labores de carga y descarga.
- Personas empleadas para realizar el transporte de carga y descarga.

5.4.2.1 Matriz de Distancia

Contiene las distancias recorridas entre cada pareja origen-destino de biomasa posible, son las distancias unitarias (correspondientes a un solo viaje). Estos orígenes y destinos son puntos que pueden corresponder al centro de un cuadrante de superficie conocida (normalmente 1 km^2) o centroide del perímetro de un municipio concreto.

La distancia entre dos puntos i, j (pareja origen-destino) puede calcularse mediante EL siguiente método:

- Método basado en Sistemas de Información Geográfica: método SIG: La distancia recorrida se obtendrá directamente y corresponderá a la distancia real que recorrería la unidad de transporte siguiendo la red de carreteras incluida en la cartografía digital. En caso de utilizar software GIS los orígenes y destinos serán cuadrantes de 1 km^2 , obtenidos tras superponer una malla de cuadrantes de 1 km de lado sobre la zona analizada.

5.4.2.2 Transporte necesario para el suministro de biomasa

El tipo de transporte y de las operaciones de carga y descarga de los cultivos energéticos se diferencian en función de la forma de biomasa que se debe transportar. Por otro lado, para todos los escenarios se puede establecer una metodología de cálculo común que considere la masa transportada, su densidad, y los tiempos de carga y descarga. Para determinar la logística

necesaria para cada caso de estudio, en primer lugar, se debe determinar la capacidad de carga real de un camión.

Este cálculo considera los límites legales sobre peso y volumen transportados por un camión determinado, así como la densidad de la carga. Para todos los tipos de biomasa evaluados, el factor que limita la capacidad de transporte del camión no es el peso (Carga Útil) si no el volumen máximo autorizado. El número de camiones requeridos diariamente para el suministro de cada planta dependerá de la capacidad de transporte diario de cada uno de ellos. La capacidad de transporte depende del tiempo que emplea cada camión en el recorrido por carretera, y del tiempo de carga y descarga de la biomasa, (Martinez Lozano , 2009).

En función de las características de volumen de los camiones que se encuentran en la zona de estudio y de la densidad del recurso biomasa disponible se obtendrá la carga real que transportará en camión y en base a la Tabla Nacional de Pesos y Dimensiones se determina si la carga de biomasa transportada cumple con los límites de carga permitida.

5.4.2.3 Costo de Transporte por Km

El límite inferior de la tarifa para el transporte terrestre de vehículos comerciales pesados se determina de acuerdo con el “Método para determinar el límite inferior de las tarifas para vehículos comerciales pesados” emitido por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas. En la **Tabla 8**, se muestra los componentes de la metodología para la definición del límite inferior tarifario.

Tabla 8

Componentes de la metodología para la definición del límite inferior tarifario.

COMPONENTE	TIPO	RUBRO/CONSIDERACIÓN
Costos Operacionales	Costos Fijos	Mano de obra
		Seguros
	Costos Variables	Legalización
		Gastos Administrativos
Costos Depreciación	Costos Imprevistos	Gastos Operativos
		Combustible
Utilidad	Utilidad sobre el costo total por kilómetro	Rodamiento
		Mantenimiento Preventivo
Costos complementarios al viaje	Carga y descarga	Mantenimiento Correctivo
		Se calcula en función del valor residual y el tiempo en el que el mismo se desprecia
		Se considera un 5% de los costos variables
		En función de los límites superior e inferior establecidos en la metodología, se considera un valor promedio para la rentabilidad, correspondiente al 16%
		Costo por hora de tiempo de espera
		Costo por hora de tiempo de carga y descarga

Fuente: (Acuerdo Ministerial no. 23-2022 Ministerio de Transporte y Obras Públicas).

Al aplicar este método se toman en cuenta las especificidades de operación con cargas pesadas, en cierto sentido pueden existir viajes denominados “one way”, que corresponden al viaje de ida del vehículo cargado o al viaje de regreso del vehículo cargado; es decir, se consideran viajes independientes, cada uno con una carga. Pero también existen viajes de "falsa carga", donde el vehículo va cargado a la ida, pero vacío a la vuelta, o viceversa. En este caso, obviamente es necesario que el valor del apartamento cubra los gastos correspondientes a los costes variables del vehículo, en los que incurre, independientemente de que el vehículo se conduzca con carga o no. La **Tabla 9** se observa el costo por km para cada categoría y tipo de viaje.

Tabla 9

Costo por km para cada categoría y tipo de viaje.

Tipo de viaje	Tarifa mínima por km recorrido (Tr)		
	Categoría 1	Categoría 2	Categoría 3
One Way	\$ 1,08	\$ 1,29	\$ 1,59
Falso Flete	\$ 1,74	\$ 2,02	\$ 2,54

Fuente: (Resolución 019 DIR 2022 ANT Definición de pisos tarifarios de la modalidad de transporte terrestre comercial de carga pesada en el Ecuador, 2022).

5.4.2.4 Costos Fijos

Son los rubros monetarios que el propietario de una unidad incurre de manera obligatoria e independientemente del nivel de operaciones del vehículo, para poder realizar la prestación del servicio. A continuación, se detalla la fórmula de cálculo de los costos fijos, así como una tabla con los diferentes costos fijos y sus componentes:

$$CF = MO + SEG + LEG + GA + GO \quad \text{Ec. (5)}$$

Donde:

CF: Costos fijos mensuales.

MO: Gastos mensuales de mano de obra (incluido afiliación y beneficios establecidos por Ley).

SEG: Gastos en seguros para el vehículo mensualizados.

LEG: Gastos de legalización mensualizados.

GA: Gastos administrativos mensualizados.

GO. Gastos operativos mensualizados.

Costos fijos mensuales

En la **Tabla 10** Se muestra el sueldo y beneficios mensual para un conductor de camiones de más de 3.5 toneladas.

Tabla 10*Salario mensual de conductor para camiones pesados y extrapesados de más de 3.5 toneladas.*

SUELDOS Y BENEFICIOS	CONDUCTOR
Sueldo Sectorial	\$ 653,27
Décimo Tercer Sueldo	\$ 54,44
Décimo Cuarto Sueldo	\$ 35,42
Remuneración Sectorial Unificada	\$ 743,13
TOTAL SUELDO Y BENEFICIOS	743,13

*Fuente: (Tablas sectoriales Ministerio de Trabajo, 2022).***Gastos de legalización**

En la **Tabla 11** Se puede apreciar el costo de la revisión técnica vehicular para vehículos pesados, este valor se lo cubre anualmente.

Tabla 11*Costo de la Revisión Técnica Vehicular de vehículos pesados.*

Parámetro	Costo
RTV vehículos pesados	\$ 45,78

*Fuente: (ATM, 2022).***Gastos Operativos**

En la **Tabla 12** Se presenta el costo promedio de la emisión del certificado de la operación vehicular anual.

Tabla 12*Costos promedio de la emisión del certificado de la operación vehicular anual.*

CATEGORÍA	COSTOS PROMEDIO
3,5 a 10 Ton	\$ 21,33
10 a 15 Ton	\$ 37,33
15 Ton en adelante	\$ 55,43

*Fuente: (MTOPE, 2022).***Gastos Administrativos**

En la **Figura 16**, se aprecia los gastos administrativos correspondiente al pago de valor de la matrícula.

DETALLE PAGO DEL VALOR DE LA MATRÍCULA

Placa, RAMV o CPN actual LCK0186	Institución financiera BANCO DE LOJA S.A.	Fecha pago 2022-07-08 03:14
Placa, RAMV o CPN de pago LCK0186	Tipo deuda PAGO DEL VALOR DE LA MATRÍCULA	Comprobante 2508072022277809021

Detalle de pagos - 4 registros

Rubro	Componente	Año	Valor
IMPUESTO A LA PROPIEDAD	Exoneración por Servicio Público	2022	-\$50.82
IMPUESTO A LA PROPIEDAD	Impuesto	2022	\$63.52
TASA SPPAT	Tasa	2022	\$92.89
TASAS ANT	Tasa	2022	\$41.00
Total:			\$146.59

Cerrar

Figura 16. Detalle de Pago del Valor de la Matricula (SRI, 2022).

Gastos de seguro para el vehículo

En la Figura 17 Se aprecia el costo mensualizado de seguro de vehículo pesado mayor a 7 toneladas.



Latina Pesado

- Responsabilidad Civil: \$ 30,000 Límite Único Combinado
- Muerte e invalidez permanente \$ 5,000
- Gastos Médicos: \$ 2,000
- Accidentes Personales ocupantes según la capacidad del vehículo detallada en la matricula, máximo 2 personas,

[Ver coberturas ?](#) [Ver deducible ?](#)

\$ 133.35

12 cuotas mensuales
Pago con tarjeta de crédito

\$ 1600.21

Valor total
Incluido impuestos

ELEGIR PLAN

Figura 17. Costo mensualizado de seguro de vehículo pesado (Seguros Latina, 2022).

5.4.2.5 Determinación del Costo de los Componentes Complementarios al viaje

Los tiempos de espera, los tiempos de carga y descarga deben ser considerados en el análisis de piso tarifario, estos, multiplicados por sus respectivos costos y sumados entre ellos corresponden a un factor ϕ que estará en función del costo de la tarifa mínima por km recorrido (Tr):

5.4.2.5.1 Costo por hora de tiempo de espera

$$CT_e = \frac{CF}{720} \tag{Ec. (6)}$$

Donde:

CF= Costos fijos mensuales.

5.4.2.5.2 Costos por hora de tiempo de carga y descarga

$$CT_c = CT_D = \frac{CF}{720} + \frac{E_2}{720} \tag{Ec. (7)}$$

Donde:

CF=Costos fijos mensuales.

E_2 = Costo de estibador por hora. Ver **Anexo 3**

$$\phi = [(T_{e1} * CT_e) + (T_c * CT_c) + (T_{e2} * CT_e) + (T_D * CT_D)] \quad \text{Ec. (8)}$$

Donde:

ϕ = Valor de los costos de los componentes complementarios al viaje.

T_{e1} = Tiempo de espera previo a la carga (5min=0.083h).

CT_e = Costo por hora de tiempo de espera.

T_c = Tiempo de carga (20min=0.333h).

$CT_c = CT_D$ = Costo por hora de tiempo de carga y descarga.

T_{e2} = Tiempo de espera previo a la descarga (5min=0.083h).

T_D = Tiempo de descarga (5min=0.083h).

5.4.2.6 Cálculo de la tarifa mínima por viaje

Una vez determinados los cálculos de los costos operacionales por kilómetro y los componentes complementarios al viaje del transporte comercial de carga pesada se determina el piso tarifario a través de la siguiente expresión:

$$T = [(T_r * k_v) * (1 + \%R)] + \phi \quad \text{Ec. (9)}$$

Donde:

T : Tarifa mínima por viaje.

T_r : Tarifa mínima por km recorrido.

k_v : Numero de kilómetros recorrido en un viaje.

ϕ : Valor de los costos de los componentes complementarios al viaje.

$\%R$: Porcentaje de rentabilidad determinado para la operación de carga pesada.

5.4.2.7 Costo total de transportación de biomasa

Para obtener el costo total de la biomasa a transportar debemos primeramente conocer la cantidad total de biomasa a transportar, la capacidad de carga de la unidad de transporte y el costo por cada viaje.

El costo total se realizará con la unidad de transporte que posea costos por viaje más económicos.

$$Costo_{TT} = \frac{Biomasa}{Cap_{carga}} * T \quad \text{Ec. (10)}$$

Donde:

$Costo_{TT}$ = Costo total de transporte.

Biomasa = Cuantificación de la biomasa disponible.

Cap_Carga = Capacidad de carga de transporte.

T = Tarifa mínima por viaje.

5.4.2.8 Costo de transporte con cascarilla compactada

Para el cálculo de los costes de transporte de carga con la biomasa de cascarilla compactada se realizará el mismo proceso, pero se considerará un valor de densidad de 671.32 kg/m³, como se observa en la **Tabla 13**, tomando los parámetros técnicos de la compactadora presentados en el **Anexo 6**.

Tabla 13

Densidad cascarilla de arroz compactada.

Dimensiones de la bolsa compactada (mm)	Volumen (m ³)	Peso de la bolsa (kg)	Densidad (kg/m ³)
700*280*380	0,07448	50	671,32

Fuente: (Made in China, 2023).

5.4.3 Módulo de aprovechamiento de biomasa residual

Para definir el método de aprovechamiento apropiado para la conversión energética de la biomasa, se tomó en consideración los datos obtenidos en los análisis: elemental, próximo, y de los componentes y las propiedades energéticas de los residuos de arroz, (McKnedry, 2002b).

La **Figura 18** se presenta los usos y aprovechamientos de biomasa húmeda y biomasa seca.

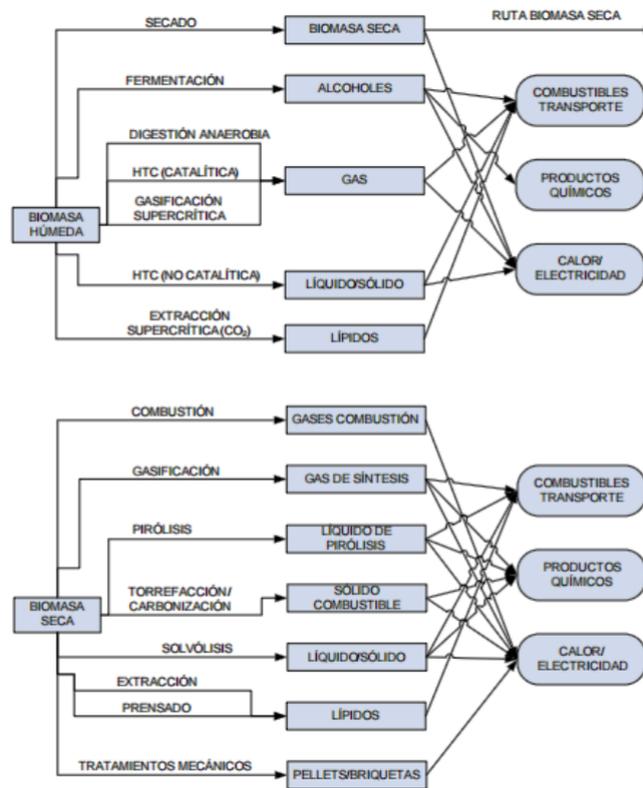


Figura 18. Usos y aprovechamiento de biomasa húmeda y biomasa seca (McKendry, 2002a).

5.4.3.1 Tecnologías de aprovechamiento energético

En este apartado se realizarán consideraciones técnico-económicas sobre las tecnologías de aprovechamiento energético de biomasa. Estas consideraciones permitirán identificar la mejor tecnología según la aplicación energética deseada y las características del residuo disponible, (Afonso, 2013).

Las aplicaciones energéticas pueden dividirse en producción de biocombustibles, aplicaciones eléctricas y aplicaciones de cogeneración. Las distintas aplicaciones requieren tecnologías específicas, el amplio rango de alternativas se ha reducido a un grupo de tecnologías que están disponibles a nivel comercial, han demostrado su viabilidad técnica y económica y tienen una eficiencia aceptable, son las llamadas Mejores Tecnologías Disponibles (MTD's), (Afonso, 2013).

5.4.3.2 Caracterización de las tecnologías aplicables y restricciones técnico-económicas

Este punto se dividirá en dos apartados a y b, en el primero se realizará propiamente la descripción y caracterización de las tecnologías. En el apartado b se realizarán una serie de consideraciones proporcionadas por los fabricantes acerca de las restricciones o

recomendaciones para garantizar la viabilidad técnica y económica de las aplicaciones, (Afonso, 2013).

Los tipos de planta de aprovechamiento energético de biomasa considerados son:

- **Plantas tipo A:** Planta de producción de pellets.
- **Plantas tipo B:** Planta de generación de electricidad (ciclos de vapor y motor de combustión interna).
- **Plantas tipo C:** Plantas de cogeneración.

Las plantas tipo B y C se presentarán de manera conjunta debido a que la opción de cogeneración implica pequeños cambios frente a la de sólo generación de electricidad.

a) Caracterización de las tecnologías aplicables.

El objetivo de este punto es caracterizar las tecnologías aplicables mediante funciones matemáticas o histogramas que relacionan la potencia instalada o biomasa tratada con los costes de instalación específicos y la eficiencia. Para la caracterización de las tecnologías se ha utilizado información de fabricantes y distribuidores de los equipos, (Afonso, 2013).

b) Restricciones técnicas y económicas de las plantas

En la toma de decisiones acerca de qué tipo de planta es la mejor alternativa es necesario tener en cuenta algunas restricciones básicas, estas son suficientes para descartar a algunas aplicaciones y están basadas en la calidad y propiedades de la biomasa que alimentará la planta en cuestión, (Afonso, 2013).

5.4.3.3 Estudio del potencial bioenergético técnico

En esta sección se analizará en detalle el potencial bioenergético técnico, el cual está ligado directamente con la tecnología a emplear para el aprovechamiento energético de la cascarilla de arroz en Ecuador. En este caso de estudio la tecnología a emplear es un Ciclo Rankine Orgánico, que genere energía eléctrica. La adición de calor al ciclo termodinámico se da en una caldera donde se combustiona la cascarilla de arroz. Para la adecuada implementación de esta tecnología se debe considerar el análisis termodinámico, (Criollo & Pinzón, 2018).

5.4.3.4 Requerimientos para el funcionamiento de la planta ORC

5.4.3.4.1 Alimentación de cascarilla de arroz.

El calor aportado por la cascarilla de arroz debe ser un tanto mayor que el calor que se requiere suministrar en el evaporador y esto se debe a las pérdidas de energía térmica. Este valor se determina mediante ecuación (11).

$$Q_{in} = PCI * m_{cascarilla} \quad \text{Ec. (11)}$$

5.4.3.4.1 *Cascarilla de arroz requerida por año*

La cantidad de cascarilla de arroz requerida anualmente para operar el ciclo ORC se determina mediante la consideración del factor de disponibilidad. Este factor expresa el número de horas de operación de una planta a lo largo del año. La ecuación (12) determina el factor de disponibilidad del sistema ORC.

$$f_a = \frac{\text{horas de funcionamiento de la planta}}{\text{horas totales del año}} \quad \text{Ec. (12)}$$

La producción anual de cascarilla de arroz requerida para el funcionamiento de la planta de ORC se determina mediante la ecuación (13).

$$m_{\text{cascarilla}} \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] = \frac{\text{Producción} \left[\frac{\text{ton}}{\text{año}} \right]}{f_a} \quad \text{Ec. (13)}$$

5.4.3.4.2 *Eficiencia del ciclo ORC*

La eficiencia térmica del ciclo ORC se define como el cociente entre el trabajo neto del ciclo termodinámico ORC y el calor suministrado al evaporador.

5.4.3.4.3 *Eficiencia de la planta ORC*

La eficiencia de la planta ORC se define como el cociente entre la potencia eléctrica del ciclo ORC y la potencia de combustión mostrada en la ecuación (14).

$$\eta_{\text{planta}} = \frac{P_{\text{eléctrica}}}{P_{\text{combustión}}} \quad \text{Ec. (14)}$$

5.4.3.4.4 *Potencia de la planta ORC (MWe)*

La potencia de la planta ORC se expresa en MWe y se obtiene mediante la ecuación (14), presentada para proyectos de generación eléctrica usando biomasa como fuente de energía, donde el factor de planta expresa las horas de operación del sistema ORC.

$$P = \frac{0,278 * m_{\text{biomasa}} * PCI_{\text{biomasa}} * \eta_{\text{planta}}}{\text{Horas de funcionamiento de la planta}} \quad \text{Ec. (15)}$$

Mediante la ecuación (16) se obtiene la energía eléctrica generada anualmente.

$$E_g = P * f_a \quad \text{Ec. (16)}$$

5.4.3.5 Análisis económico de la tecnología

Todas las propuestas de proyectos requieren de un análisis para verificar su rentabilidad y de esa manera determinar cuán viable y factible resultaría su implementación. Para determinar el costo de inversión inicial del proyecto se debe conocer el costo por cada kilovatio de potencia a instalarse.

5.4.3.5.1 Costo de inversión inicial

Los costes de inversión de la tecnología ORC se determina mediante la ecuación (17). Este costo de determina en base al valor de 1580 USD/kW instalado, (Tartière & Astolfi, 2017).

$$Costo_{Inv} = P * Costo_{kW} \quad \text{Ec. (17)}$$

Donde:

$Costo_{Inv}$ = Costo de Inversión [USD].

P = Potencia de la Planta [kW].

$Costo_{kW}$ = Costo de potencia unitario [USD/kW] .

5.4.3.5.1 Costos fijos de operación y mantenimiento (O&M)

Los costos fijos de operación y mantenimiento incluyen: mano de obra, seguros, mantenimiento programado y reemplazo de rutina de la planta, componentes (por ejemplo, calderas y gasificadores), equipos de manipulación de materias primas y otros elementos. (IRENA, 2023).

Los costos de operación y mantenimiento representan entre 0.9 a 1.8 cents/kWh, (U.S DEPARTMENT OF ENERGY, 2021).

Para el cálculo de costos de operación y mantenimiento se tomará el mayor valor de 1.8 cents/kWh. Se emplea la ecuación (18).

$$Costo_{O\&M} = E_g * Costo_{kWh} \quad \text{Ec. (18)}$$

Donde:

$Costo_{O\&M}$ = Costos fijos de operación y mantenimiento [USD].

E_g = Energía eléctrica generada al año [kWh/año].

$Costo_{kWh}$ = Costo unitario por kWh [USD/kWh].

5.4.3.5.2 Costos variables

Las piezas de repuesto y los costos incrementales de servicio son los componentes principales de costos variables de operación y mantenimiento, aunque estos también incluyen costos de combustibles distintos de la biomasa, como la eliminación de cenizas.

Los costos variables de operación y mantenimiento, con un promedio de USD 0,005/kWh, suelen ser bajos para las plantas de energía de bioenergía cuando en comparación con los costos fijos de operación y mantenimiento, (IRENA, 2023). Empleará la ecuación (19).

$$Costo_{variables} = E_g * Costo_{kWh} \quad \text{Ec. (19)}$$

Donde:

$Costo_{variables}$ = Costos variables de operación y mantenimiento [USD].

E_g = Energía eléctrica generada al año [kWh/año].

$Costo_{kWh}$ = Costo unitario por kWh [USD/kWh].

5.4.3.6 Ingresos

En este apartado se determina los ingresos obtenidos mediante la implementación del sistema ORC. Para ello, es posible obtener ingresos por ahorro en consumo eléctrico, por venta de energía eléctrica y venta de certificados por reducción de emisiones.

5.4.3.6.1 Ahorro por consumo eléctrico

El ahorro por consumo eléctrico se obtendrá mediante la revisión del consumo eléctrico anual y el costo de la demanda mensual del año 2022. La ARCERNNR califica a la Piladora Macareñito en la sección de BT- Industrial con Demanda por tal razón, el costo por cada kilovatio-hora, es de 0.08 (USD) y el costo de la demanda es de 4.79 (USD/kW-mes), estos valores se muestran en la **Tabla 14**.

Tabla 14

Cargos Tarifarios.

RANGO DE CONSUMO	DEMANDA (USD/kW-mes)	ENERGÍA (USD/kWh)	COMERCIALIZACIÓN (USD/Consumidor)
CATEGORÍA	GENERAL		
NIVEL VOLTAJE	BAJO VOLTAJE CON DEMANDA		
	INDUSTRIAL		1,414
	4,79	0,08	

Fuente: Resolución (ARCERNNR, 2022)

Mediante la ecuación (20) se determina el consumo anual de energía con respecto consumo de energía anual por el costo de cada kilovatio-hora.

$$Costo_E = E_C * Costo_{kWh} \quad \text{Ec. (20)}$$

Donde:

$Costo_E$ = Coste consumo de energía [USD/año].

E_C = Energía consumida al año [kWh/año].

$Costo_{kWh}$ = Costo unitario por kilovatio-hora [USD/kWh].

Mediante la ecuación (21) se determina el costo de la demanda se obtendrá mediante la demanda de potencia requerida por cada mes.

$$Costo_D = Consumo_D * Costo_{kW} \quad \text{Ec. (21)}$$

Donde:

$Costo_D$ = Coste demanda anual [USD/año].

$Consumo_D$ = Consumo potencia [kW-mes].

$Costo_{kW}$ = Costo unitario demanda [USD/kW-mes].

5.4.3.6.2 Ingresos por venta de energía

El principal ingreso que tiene una central generadora de energía eléctrica se debe a la venta de energía eléctrica al Sistema Nacional Interconectado y/o al uso de energía eléctrica generada como autoconsumo en la piladora. Este último representa un ingreso expresado en ahorro económico en la piladora debido a que no se debe incurrir en el pago de electricidad ya que se usa la misma energía eléctrica generada. Mediante la ecuación (22) se determina el ingreso por venta de energía.

$$I_{energía} = (E_g - E_C) * P_{VE} \quad \text{Ec. (22)}$$

Donde:

$I_{energía}$ = Ingreso por venta de energía [USD/año].

E_g = Energía generada [kWh/año].

E_C = Energía consumida [kWh/año].

P_{VE} = Precio preferencial de venta de la energía eléctrica [USD/kWh].

5.4.3.6.3 Venta de certificado de reducción de emisiones (CERs)

La ecuación (23) expresa la reducción de emisiones anuales de CO₂, que es función del factor de emisión y de la cantidad total de biomasa de cascarilla de arroz.

Por cada kilogramo de cascarilla se puede obtener, teóricamente, hasta 1,43 kilogramos de dióxido de carbono, (Prada & Cortés, 2010). En base a esta constante se puede estimar la cantidad de CO₂ evitadas por la combustión de la cascarilla de arroz a cielo abierto.

$$T_{CO2eq} = F_E * B_g \quad \text{Ec. (23)}$$

Donde:

T_{CO2eq} = Toneladas de CO2 equivalente [$T_{CO2eq}/año$].

F_E = Factor de emisión [$\frac{T_{CO2eq}}{ton}$].

B_g = Biomasa generada [ton/año].

La ecuación (24) se utiliza para determinar los ingresos generados por la venta de certificados de reducción de emisiones de CO2. Se considera que el precio de los CERs tiene un valor de 8,64 USD/tCO2. (Mendoza, 2023).

$$I_{CO2} = T_{CO2eq} * CERs \quad \text{Ec. (24)}$$

Donde:

I_{CO2} = Ingreso por venta de certificado de reducción de emisiones de CO2 [USD].

T_{CO2eq} = Toneladas de CO2 equivalente [$T_{CO2eq}/año$].

CERs = Costo de cada tonelada equivalente de CO2 [USD/ T_{CO2eq}].

5.4.3.7 Rentabilidad del proyecto.

Usamos la ecuación (25) con la cual se determina el VAN y la ecuación (26) para determinar la TIR.

VAN

$$VAN = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+k)^t} \quad \text{Ec. (25)}$$

Donde:

I_0 = Costos de inversión [USD].

F_t = Flujos de caja correspondientes a cada periodo [USD].

k = Tipo de descuento [%].

n = Vida útil o número de años de la planta.

t = Año en el que se genera el flujo efectivo.

La TIR:

$$\sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+TIR)^t} - I_0 = 0 \quad \text{Ec. (26)}$$

Donde:

I_0 = Costes de Inversión [USD].

F_t = Representa el beneficio del flujo en el periodo [USD].

TIR = Tasa interna de retorno [%].

n = Numero de periodos sobre el cual se requiere capitalizar la inversión inicial.

El Pay-Back:

Para el cálculo del Pay-Pack se empleará (27), la ecuación muestra el tiempo de recuperación del capital donde **A** representa el último período con flujo acumulado negativo, **B** representa el valor absoluto del último flujo acumulado negativo y **C** representa el valor del flujo de caja en el siguiente periodo, (Criollo & Pinzón, 2018).

$$T_r = (A) + \left(\frac{B}{C}\right) \quad \text{Ec. (27)}$$

6. Resultados

6.1 Módulo de Fuentes de Biomasa

6.1.1 Estimación de superficie agrícola de cascarilla de arroz

Para la estimación de la superficie agrícola sembrada de arroz en el cantón se consideró los reportes de relacionados al arroz (2017-2021) del primer y segundo periodo de siembra, observar **Tabla 15**.

Tabla 15

Estimación de superficie agrícola cantonal de arroz (2017-2021).

ESTIMACIÓN DE SUPERFICIE AGRÍCOLA DE ARROZ EN EL CANTÓN					
MACARÁ					
PROVINCIA	CANTÓN	PRODUCCIÓN AGRÍCOLA	AÑO	SUPERFICIE SEMBRADA (ha)	
				Primer Periodo	Segundo Periodo
			2017	534	541
			2018	735	229
			2019	524	519
			2020	530	567
LOJA	MACARÁ	ARROZ	2021	540	566
			Promedio	572,6	484,4
			TOTAL (ha/año)		1057

Fuente: (Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) – Coordinación General de Información Nacional Agropecuaria (CGINA).

6.1.2 Producción agrícola de arroz en cantón Macará

En Macará, la producción promedio es de 145 quintales y se quiere incrementar hasta 170 quintales. los rendimientos y producción de arroz fueron similares a los ciclos agrícolas de trimestres anteriores; debido a que las tierras dedicadas a este cultivo se encontraban totalmente copadas, (Banco Central del Ecuador, 2021). Los valores en quintales (qq), son la producción de los productos agrícolas listos para comercializar. Se considera que el quintal es igual a 100lb. La **Tabla 16**, muestra la producción de arroz en el cantón Macará.

Tabla 16*Producción de arroz en el cantón Macará.*

Producción	Arroz
qq/ha	145
Superficie Anual (ha/año)	1057
qq/año	153265
ton/año	6952
ton/ha	6,58

*Fuente: (Autor).***6.1.3 Generación de biomasa de cascarilla de arroz**

Para obtener la biomasa total de cascarilla de arroz se debe conocer la producción de arroz en cascarilla. Se emplea la ecuación (1). Conociendo que el CR_{MP} es 0,2.

$$Arroz_{En\ cascarilla} = \frac{153265\ qq/año}{0.8} = 191581,25\ qq/año$$

$$Arroz_{En\ cascarilla} = 8708,24\ ton/año$$

$$Biomasa\ total = Consumo\ materia\ prima\ \left(\frac{ton}{año}\right) * CR_{MP} i1\ \left(\frac{ton}{ton}\right)$$

$$Biomasa\ total = 8708,24\ \left(\frac{ton}{año}\right) * 0,2\ \left(\frac{ton}{ton}\right)$$

$$Biomasa\ total = 1741,65\ \left(\frac{ton}{año}\right)$$

6.1.4 Cuantificación de biomasa de cascarilla de arroz

En este apartado se muestra la cuantificación de cascarilla de arroz obtenidos en base a la encuesta realizada a los propietarios de las piladoras del cantón Macará.

Como se aprecia en la **Tabla 17** la biomasa de cascarilla de arroz es de 5318.18 ton/año, valor superior al obtenido en base a la superficie agrícola del arroz en el apartado anterior, y esto se debe a que ciertas piladoras procesan el arroz proveniente del cantón Zapotillo.

Tabla 17*Cuantificación de cascarilla de arroz.*

Piladora	Arroz		Cascarilla de arroz			
	Limpio	Arroz en cascara	(qq)	(lb)	(kg)	(ton)
Del Pueblo	48000	60000	12000	1200000	545454,5	545,45
Macará	60000	75000	15000	1500000	681818,2	681,82
Carmita	100000	125000	25000	2500000	1136363,6	1136,36
Gallo & Rosillo Cia. Ltda	116000	145000	29000	2900000	1318181,8	1318,18
El Macareñito	144000	180000	36000.0	3600000	1636363,6	1636,36
Cascarilla de arroz (ton/año)						5318.18

Fuente: (Entrevista).**6.1.5 Caracterización de Biomasa de cascarilla de arroz.**

La composición de la biomasa constituye un papel preponderante en el proceso de conversión energética, por esta razón a continuación se presenta la caracterización de la biomasa residual agrícola en base a los análisis: elemental, próximo y de los componentes, tomando como referencia datos de investigaciones realizadas en Ecuador.

6.1.5.1 Análisis Elemental

El análisis elemental de la biomasa residual de cascarilla de arroz, presentan proporciones de azufre y nitrógeno menores a 2%, existiendo la posibilidad de la generación de óxidos (SOx y NOx) que reducen la eficiencia de aprovechamiento energético; mientras que el valor de contenido de carbono es de 39,60%, lo que favorece a la generación de energía. (Salazar, 2019). Análisis elemental de la biomasa residual de cascarilla se presenta en la **Tabla 18**.

Tabla 18*Análisis elemental de la biomasa de cascarilla de arroz.*

RESIDUO	ANÁLISIS ELEMENTAL				
	Carbono	Oxígeno	Hidrógeno	Nitrógeno	Azufre
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
ARROZ (cascarilla)	39,60	37,52	4,97	1,83	0,40

Fuente: (Tipanluisa, Moreno, Guasumba, Celi, & Molina, 2015).

6.1.5.2 Análisis Próximo

El análisis próximo indica que la biomasa residual agrícola de arroz presenta una humedad menor al 50% favoreciendo su aprovechamiento energético por métodos termoquímicos, (Salazar, 2019). En la **Tabla 19**, se muestra los valores del análisis próximo de la cascarilla de arroz.

Tabla 19

Análisis Próximo de la biomasa de cascarilla de arroz.

RESIDUO	ANÁLISIS PRÓXIMO			
	Volátiles	Carbono	Cenizas	Humedad
	(%)	(%)	(%)	(%)
ARROZ (cascarilla)	59,00	16,12	19,30	7,40

Fuente: (Tipanluisa, Moreno, Guasumba, Celi, & Molina, 2015).

6.1.5.3 Análisis de los componentes

La biomasa de cascarilla de arroz registra un contenido de celulosa y hemicelulosa, lo que facilita la generación de calor al oxidar a materia orgánica, siendo una fuente potencial de aprovechamiento energético, (Salazar, 2019). En la **Tabla 20**, se observa los valores del análisis de los componentes de la cascarilla de arroz.

Tabla 20

Análisis de los componentes de la biomasa de cascarilla de arroz

RESIDUO	ANÁLISIS DE LOS COMPONENTES		
	Celulosa	Hemicelulosa	Lignina
	ARROZ (cascarilla)	34,40	29,30

Fuente: (Tipanluisa, Moreno, Guasumba, Celi, & Molina, 2015)

6.1.6 Potencial de generación eléctrica de biomasa de cascarilla de arroz en Macará

Con la ecuación (2), se determina el potencial de generación de energía eléctrica.

$$P_E = \frac{R_S * PCI * C_F}{3600} * 1000$$

$$P_E = \frac{5'318.180 \frac{kg}{año} * 14,951 \frac{MJ}{Kg} * 0,199}{3600} * 1000$$

$$P_E = \frac{5'318.180 \frac{kg}{año} * 14,951 \frac{MJ}{Kg} * 0,199}{3600} * 1000$$

$$P_E = 4'395.451 \text{ kWh/año}$$

En la **Tabla 21** se presenta un resumen con los valores del potencial de generación eléctrica de algunas tecnologías de aprovechamiento energético utilizando la cascarilla de arroz.

Tabla 21

Potencial de generación eléctrica de la biomasa de cascarilla de arroz.

PROCESO	RENDIMIENTO GLOBAL DE PLANTA (n)	Residuos de Biomasa	Potencial Calorífico Inferior	Potencial de Generación Eléctrica
			Cascarilla arroz	
	%	kg	MJ/kg	GWh/año
Combustión Directa	19,9			4,16
Gasificación y Turbina de Gas (GTG)	25-28			5,54
Gasificación y Ciclo Combinado (GCC)	35-40	5318,180	14,951	7,84
Pirolisis Y Ciclo Combinado (PCC)	31			6,48

Fuente: (Autor).

6.1.7 Dispersión y Producción Zonal

El objetivo es evaluar todas las ubicaciones posibles de la planta de biomasa desde el punto de vista de, tiempo y, sobre todo, costes de transporte.

6.1.7.1 Dispersión

Se utilizó datos de cantidad de biomasa de cada piladora y las coordenadas UTM del centroide de cantón Macará para ubicar de manera puntual esa biomasa y poder estimar distancias de transporte.

La densidad de la biomasa de cascarilla de arroz de cada piladora se obtiene con la ecuación (3). La **Tabla 22**, muestra la densidad en base la biomasa generada por las piladoras y el área municipal del cantón Macará.

$$Densidad_i = \frac{Biomasa_{total_i}}{Area_{municipal_i}}$$

$$Densidad_i = \frac{1636.36 \text{ ton}}{575 \text{ km}^2}$$

$$Densidad_i = 2.85 \frac{\text{ton}}{\text{km}^2}$$

Tabla 22

Densidad superficial de la biomasa de cascarilla en cada piladora.

Piladora	Biomasa de cascarilla de arroz (ton)	Área Superficial del cantón Macará (km²)	Densidad (ton/km²)
Del Pueblo	545.45		0.94
Macará	681.82		1.186
Carmita	1136.36	575	1.97
Gallo & Rosillo Cia. Ltda	1318.18		2.29
El Macareñito	1636.36		2.85

Fuente: (Autor).

6.1.7.2 Producción Zonal

Con la finalidad de conocer la ubicación de las piladoras y la distancia que existe entre ellas se procede a realizar un mapa **Figura 19** y un cuadro con las respectivas coordenadas de cada piladora **Tabla 23**.

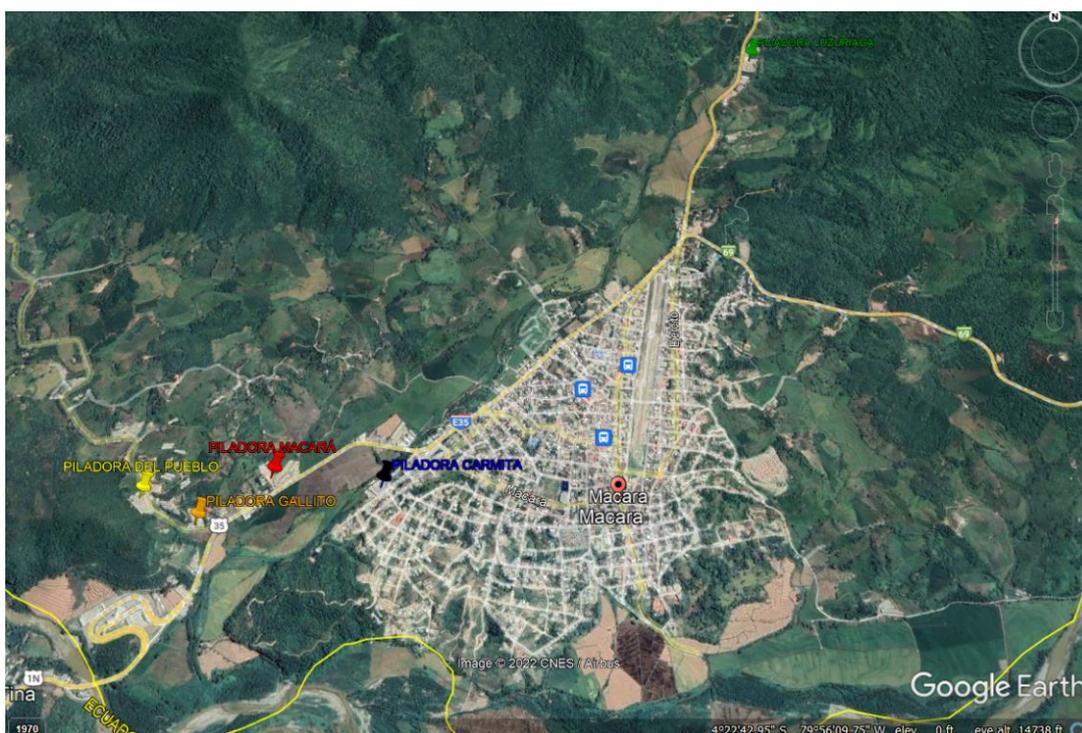


Figura 19. Mapa con la ubicación de la Piladoras de arroz (Google Earth, 2022).

En la **Tabla 23** se puede observar las coordenadas de la piladoras.

Tabla 23*Coordenadas de ubicación de la piladoras.*

PILADORA	COORDENADAS	DECIMAL	GRADOS
Piladora del Pueblo	Latitud	-4.385409°	4°23'04" S
	Longitud	-79.963461°	79°57'46" O
	UTM	95115226 614961 17M	
Piladora Macará	Latitud	-4.3814122°	4°22' 03" S
	Longitud	-79.959862°	79° 57' 28" O
	UTM	9516086.23 617278.39 17M	
Piladora Carmita	Latitud	-4.386214°	4°23'03" S
	Longitud	-79.958544°	79°57' 11" O
	UTM	9516000 617253.93 17M	
Piladora Macareñito	Latitud	-4.363845°	4°21' 35" S
	Longitud	-79.936692°	79° 56' 04" O
	UTM	9518019 618197 17M	
Piladora Gallo y Rosillo	Latitud	-4.363845°	4°23' 05.85" S
	Longitud	-79.936692°	79° 57' 38.73" O
	UTM	9518019 618197 17M	
Piladora Don Lucho	Latitud	-4.389225°	4°23' 21.21" S
	Longitud	-79.961142°	79° 57' 40.11" O
	UTM	9514769.30 615268.40 17M	

Fuente: (Google Earth, 2022).**6.1.8 Estacionalidad de la biomasa de cascarilla de arroz**

Este análisis se basa en las fechas propias de las labores agrícolas generadoras de biomasa de cascarilla de arroz. Con este análisis se obtuvo una distribución anual de los aportes de biomasa de cascarilla de arroz. La **Tabla 24** muestra el porcentaje de residuos de biomasa de cascarilla de arroz generados en cada mes.

Tabla 24*Porcentaje de residuos de biomasa de cascarilla de arroz generado por mes (%).*

Piladora	PORCENTAJE DE RESIDUOS AL MES (%)											
	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	agos	sep	oct	nov	dic
Del Pueblo	16,67				16,67	16,67	16,67				16,67	16,67
Gallito	15				15	15	15	10			15	15
Macara	16,67				16,67	16,67	16,67				16,67	16,67
Carmita	12,5	10			15	12,5	12,5	10			15	12,5
Luzuriaga	10	10	10		10	10	10	10	10		10	10

Fuente: (Autor).

En la **Tabla 25** se observa la cantidad de residuos de cascarilla de arroz generados por las piladoras en cada mes (ton).

La estacionalidad de la biomasa de cascarilla de arroz se concentra mayormente en los meses de enero, junio, julio, noviembre y diciembre.

Tabla 25
Residuos de biomasa de cascarilla de arroz generados por mes (ton).

Residuos generados por mes (ton/mes)												
Piladora	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Del Pueblo	90,93				90,93	90,93	90,93				90,93	90,93
Gallito	102,27				102,27	102,27	102,27	68,18			102,27	102,27
Macará	189,43				189,43	189,43	189,43				189,43	189,43
Carmita	164,77	131,82			197,43	164,77	163,64	131,82			197,73	163,64
Luzuriaga	163,64	163,64	163,64	0	163,64	163,64	163,64	163,64	163,64	0	163,64	163,64
Residuos totales cascarilla de arroz	711,04	295,45	163,64	0	744	711,04	711,04	363,64	163,64	0	744	711,04
	13,37%	5,56%	3,08%	0%	13,99%	13,37%	13,37%	6,84%	3,08%	0%	13,99%	13,37%

Fuente: (Autor).

6.1.9 Accesibilidad a los centros de generación de biomasa de cascarilla de arroz

Mediante la utilización del software QGIS se obtuvo el tiempo aproximado que conllevaría transportar los residuos agrícolas del arroz desde el lugar de recolección hasta el punto de procesamiento.

Como se logra apreciar en la **Figura 20**, En las parcelas ubicadas a los lados del centro poblado del cantón Macara se emplean tiempos aproximados de entre 0 a 5 minutos en transportar el arroz en cascarilla hacia el centro de acopio como las Piladoras de arroz, ya que están se encuentran en la parte urbana del cantón.

Para las parcelas de arroz más alejadas del centro poblado el tiempo empleado por los transportes de carga pesada hacia las piladoras es de alrededor de 5 a 15 minutos y de 15 a 30 minutos para las parcelas de arroz ubicadas en el sector rural del cantón Macará.

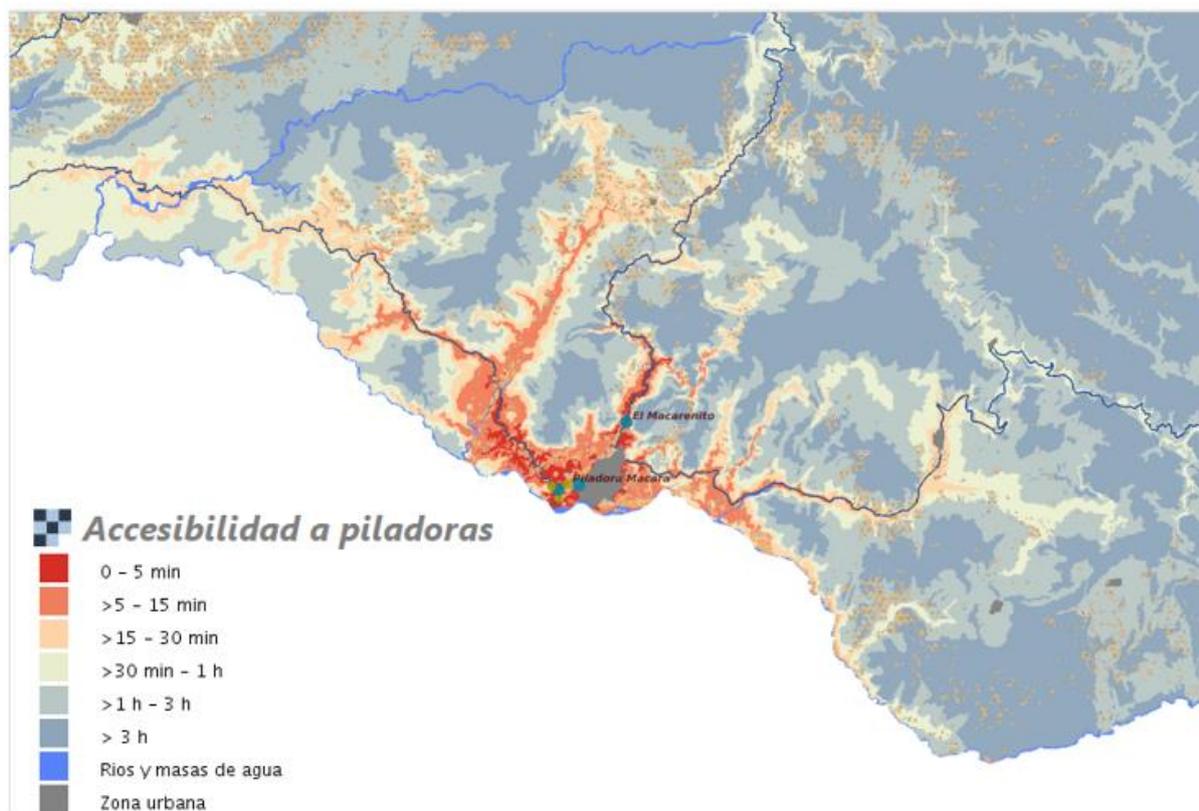


Figura 20. Accesibilidad a las piladoras de arroz (SIPA, s.f.).

6.2 Resultados del módulo de logística de transporte de biomasa

6.2.1 Distancia entre Piladoras

A continuación, en la **Tabla 26**, se aprecia la matriz de distancias entre las piladoras del cantón Macará, la cual muestra las distancias por carretera.

Tabla 26. Matriz de Distancias entre Piladoras (km).

Matriz de distancias entre piladoras (km)					
Piladora	Del Pueblo	Gallo & Rosillo	Macara	Carmita	El Macareñito
Del Pueblo	0	0,4	0,8	1,8	4,9
Gallo & Rosillo	0,4	0	0,4	1,4	4,5
Macará	0,8	0,4	0	1	4,1
Carmita	1,8	1,4	1	0	3,1
El Macareñito	4,9	4,5	4,1	3,1	0

Fuente: (Google Earth, 2022).

6.2.2 Transporte de carga disponible en la localidad

Para obtener el número de encuestas se realizó en cálculo del tamaño de la muestra con un margen de error del 5% y un nivel de confianza del 95%, valor de la población se consideró a los propietarios de transportes de carga pesada que se dedican a prestar sus servicios de transporte al sector agrícola arrocero. En la **Figura 21** es observa el tamaño de la muestra.

Margen: 5% Nivel de confianza: 95% Poblacion: 8 Tamaño de muestra: 8

Figura 21. Tamaño de la muestra.

En base a la consulta realizada a los propietarios del transporte de carga se pudo determinar la capacidad volumétrica de los camiones disponibles y en base a la densidad de la cascarilla se obtuvo la carga real de cascarilla de arroz.

En la **Tabla 27** se observa los 8 transportes de carga con su respectiva capacidad volumétrica, en costo por viaje se puede observar que la volqueta tiene un costo de 30\$ por viaje, en este costo se incluye el trabajo de carga y descarga, así como el costo de combustible y el operador de dicho transporte.

Tabla 27

Costos por viaje de transporte de carga pesada subcontratado.

Tipo Transporte	Capacidad Volumétrica (m ³)	Costo por viaje (USD)	Carga y descarga	Personas
Volqueta	12	30	SI	1
Camion1	12	45	NO	1
Camion2	13	65	SI	2
Camioneta1	3	35	SI	2
Camioneta2	3	35	SI	2
Camion3	12	55	SI	2
Camion4	14	65	SI	2
Camion5	13	60	SI	2

Fuente: Encuesta a propietarios de transporte de carga.

En base a la Tabla de Pesos y Dimensiones (**Anexo 2**), se constató que la carga real a transportar por los transportes de carga pesada cumple con la carga máxima permitida. Ver **Tabla 28**.

Tabla 28*Carga real del transporte subcontratado.*

Código Nacional	Tipo Transporte	Capacidad Volumétrica (m3)	Densidad Cascarilla de arroz (ton/m3)	Carga máxima Permitida (ton)	Carga real de transporte (ton)
V3A	Volqueta	12	0.125	18	1,5
2DB	Camion1	12		18	1,5
2DB	Camion2	13		18	1,625
2D	Camioneta1	3		7	0,375
2D	Camioneta2	3		7	0,375
2DB	Camion3	12		18	1,5
2DB	Camion4	14		18	1,75
2DB	Camion5	13		18	1,625

Fuente: (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2016).**6.2.3 Costos Total anual de Transporte de biomasa (Subcontratado)**

Aplicando la ecuación (10) se calculó el costo total requerido para transportar toda la biomasa disponible en el cantón, realiza el mismo proceso para cada transporte de carga.

$$Costo_{TotalTransporte} = \frac{Biomasa}{Cap_{carga}} * T$$

$$Costo_{TotalTransporte} = \frac{5318,18 \frac{ton}{año}}{1,5 ton} * 30 USD$$

$$Costo_{TotalTransporte} = 106.364 \frac{USD}{año}$$

En la **Tabla 29**, se muestra el costo total anual de transporte de carga pesada para movilizar la biomasa de cascarilla de arroz, además se aprecia el número de viajes necesarios al año, finalmente se observa el costo que de cada tonelada transportada. Se determina también que el costo más económico de transporte es el del camión volqueta.

Tabla 29*Costo de transporte de biomasa total (Subcontratado).*

Tipo Transporte	Carga real de transporte (ton)	Costo por Viaje (USD/viaje)	Costo por tonelada (USD/ton)	VIAJES (viajes/año)	COSTO TOTAL (USD/año)
Volqueta	1.5	30	20	3545.47	106364
Camion1	1.5	45	30	3545.47	159546
Camion2	1.625	62	38	3272.74	202909.78
Camioneta1	0.375	35	93	14181.87	496365.33
Camioneta2	0.375	35	93	14181.87	496365.33
Camion3	1.5	55	37	3545.47	17727.33
Camion4	1.75	65	37	3038.97	197533.14
Camion5	1.625	60	37	3272.74	196364.31

Fuente: (Autor).

6.2.4 Costo de transporte de carga (camión propio)

En este apartado se estima los costos totales de transportar la biomasa de cascarilla de arroz considerando un camión propio. Para esto determina primeramente la ubicación más favorable para la planta de generación a partir de la biomasa de cascarilla de arroz debe ser en las instalaciones de la Piladora Macareñito, considerando que:

- Se procesa la mayor cantidad de cascarilla de arroz.
- Posee transporte de carga propio.
- Mayor densidad de generación de biomasa en base a la superficie cantonal.
- Cercanía con la subestación eléctrica S/E Macará para una posible venta de energía.

Una vez determinada la ubicación propicia de la planta, se obtuvo los costos de transporte generados de transportar la biomasa de las piladoras hasta la piladora Macareñito.

6.2.4.1 Costos Fijos

Los costos fijos de transporte de carga se determinan con la ecuación (5).

$$CF = MO + SEG + LEG + GA + GO$$
$$CF = 743.13 \frac{USD}{mes} + 133.35 \frac{USD}{mes} + \left(\frac{45.78 USD}{12 meses} \right) + \left(\frac{146.59 USD}{12 meses} \right) + \left(\frac{37.33 USD}{12 meses} \right)$$
$$CF = 743.13 \frac{USD}{mes} + 133.35 \frac{USD}{mes} + \left(3.82 \frac{USD}{mes} \right) + \left(12.21 \frac{USD}{mes} \right) + \left(3.11 \frac{USD}{mes} \right) +$$
$$CF = 895.62 USD/mes$$

6.2.4.2 Determinación del costo de los componentes complementarios al viaje

6.2.4.2.1 Costos por hora de tiempo de espera

Los costos por hora de tiempo de espera se determinan utilizando la ecuación (6).

$$CT_e = \frac{CF}{720}$$
$$CT_e = \frac{895,62 USD}{720}$$
$$CT_e = \$1,24 USD/h$$

6.2.4.2.2 Costos por hora de tiempo de carga y descarga

Los costos por hora de tiempo de espera se determinan utilizando la ecuación (7).

$$CT_c = CT_D = \frac{895,62 USD}{720} + \frac{2,86 USD}{176}$$
$$CT_c = CT_D = 1,26 USD/h$$

Para determinar los costos de los componentes complementarios al viaje se utiliza la ecuación (8).

$$\phi = [(T_{e1} * CT_e) + (T_c * CT_c) + (T_{e2} * CT_e) + (T_D * CT_D)]$$

$$\phi = [(0,083h * 1,24 USD/h) + (0,333h * 1,26 USD/h) + (0,083h * 1,24 USD/h) + (0,083h * 1,26USD/h)]$$

$$\phi = 0,73 USD/viaje$$

6.2.4.3 Cálculo de la tarifa mínima por viaje

Para determinar la tarifa mínima por viaje a realizar se emplea la ecuación (9).

- Desde Piladora del Pueblo hasta Piladora Macareñito.

$$T = [(T_r * k_v) * (1 + \%R)] + \phi$$

$$T = \left[\left(\frac{2,02 USD}{km} * 4,9 km \right) * (1 + 0,16) \right] + 0,73 USD/viaje$$

$$T = 12,21 \$/viaje$$

- Desde Piladora Gallo y Rosillo hasta Piladora Macareñito.

$$T = [(T_r * k_v) * (1 + \%R)] + \phi$$

$$T = \left[\left(\frac{2,02 USD}{km} * 4,5 km \right) * (1 + 0,16) \right] + 0,73 USD/viaje$$

$$T = 11,27 USD/viaje$$

- Desde Piladora Macará hasta Piladora Macareñito.

$$T = [(T_r * k_v) * (1 + \%R)] + \phi$$

$$T = \left[\left(\frac{2,02 USD}{km} * 4,1 km \right) * (1 + 0,16) \right] + 0,73 USD /viaje$$

$$T = 10.34 USD/viaje$$

- Desde Piladora Carmita hasta Piladora Macareñito.

$$T = [(T_r * k_v) * (1 + \%R)] + \phi$$

$$T = \left[\left(\frac{2,02 USD}{km} * 3,1 km \right) * (1 + 0,16) \right] + 0,73 USD/viaje$$

$$T = 8.0 \$/viaje$$

6.2.4.4 Costos totales de transporte desde los centros de generación de biomasa de cascarilla de arroz (camión propio)

Para obtener los costos totales de transporte por centros de generación se determina con la ecuación (10).

- Desde Piladora del Pueblo hasta Piladora Macareñito.

$$Costo_{TotalTransporte} = \frac{Biomasa}{Cap_{carga}} * T$$

$$Costo_{TotalP_1} = \frac{545,5 \text{ ton/año}}{1,5 \text{ ton/viaje}} * 12,21 \text{ USD/viaje}$$

$$Costo_{TotalP_1} = 4436,3 \text{ USD/año}$$

- Desde Piladora Macará hasta Piladora Macareñito.

$$Costo_{TotalP_2} = \frac{681,8 \text{ ton/año}}{1,5 \text{ ton/viaje}} * 10,34 \text{ USD/viaje}$$

$$Costo_{TotalP_2} = 4699,87 \text{ USD/año}$$

- Desde Piladora Carmita hasta Piladora Macareñito.

$$Costo_{TotalP_3} = \frac{1090,9 \text{ ton/año}}{1,5 \text{ ton}} * 8,0 \text{ USD/viaje}$$

$$Costo_{TotalP_3} = 5818,13 \text{ USD/año}$$

- Desde Piladora Gallo y Rosillo hasta Piladora Macareñito

$$Costo_{TotalP_4} = \frac{1136,4 \text{ ton/año}}{1,5 \text{ ton}} * 11,27\$$$

$$Costo_{TotalP_4} = 8538,15 \text{ \$/año}$$

6.2.4.5 Costo total anual de transporte de carga (camión propio)

Para determinar el costo total de transporte se realizó la sumatoria de los costos de transporte por cada centro de generación.

$$\text{Costo Total Transporte} = Costo_{TotalP_1} + Costo_{TotalP_2} + Costo_{TotalP_3} + Costo_{TotalP_4}$$

$$\text{Costo Total Transporte} = 4436,3 \frac{\text{USD}}{\text{año}} + 4699,87 \frac{\text{USD}}{\text{año}} + 5818,13 \frac{\text{USD}}{\text{año}} + 8538,15 \frac{\text{USD}}{\text{año}}$$

$$\text{Costo Total Transporte} = 23492,45 \text{ \$/año}$$

6.2.4.6 Costo de transporte con biomasa de cascarilla de arroz compactada

En la **Tabla 30**, se muestra los resultados del número de viajes que debe realizar el transporte en relación con la nueva densidad de 671.32 kg/m³, la nueva carga real que transportada es de alrededor de 8.1 toneladas, dando como resultado un número de viajes de 660,2 al año, reduciendo notablemente en comparación con el número de viajes de cascarilla sin compactación.

Tabla 30

Cuadro de resumen con las propiedades de la cascarilla de arroz compactada.

Piladora	Biomasa de cascarilla de arroz	Capacidad Volumétrica a Transporte	Densidad a granel cascarilla de arroz compactada	Carga real transportada		Numero de Viajes
	(ton)	(m ³)	(kg/m ³)	(kg)	(ton)	
Del Pueblo	545,5					67,7
Macará	681,8					84,6
Carmita	1136,4					141,1
Gallo & Rosillo Cia. Ltda	1318,2	12	671,32	8055,84	8,1	163,6
El Macareñito	1636,4					203,1
Total Anual	5318,3					660,2

Fuente: (Autor).

6.2.4.7 Costo de transporte de biomasa de cascarilla de arroz compactada (Subcontratado).

En la **Tabla 31** se observa el costo total de transporte con cascarilla de arroz compacta, solo se consideró la volqueta ya presento valor más bajo en el apartado de transporte subcontratado.

El costo total de transporte es de 19814,46 USD.

Tabla 31

Costo total de transporte subcontratado con biomasa compactada.

Tipo Transporte	Cap. Volumétrica (m ³)	Densidad Cascarilla de arroz (Compactada) (ton/m ³)	Carga real de transporte (ton)	Biomasa de cascarilla de arroz disponible (ton/año)	VIAJES (viajes/año)	Costo por Viaje (USD/viaje)	Costo por tonelada (USD/ton)	COSTO TOTAL (USD/año)
Volqueta	12	0,671	8,052	5318,18	660,48	30	3,7	19814,46

Fuente: (Autor).

6.2.4.8 Costo de transporte de biomasa de cascarilla de arroz compactada (Camión Propio).

En este apartado se muestra el costo de transporte de carga con camión propio y cascarilla de arroz compactada. El proceso es el mismo que del apartado de camión propio sin comparación, con la diferencia de que la capacidad de carga es de 8,052 ton, valor obtenido con relación a la capacidad volumétrica de 12m³ y la densidad de cascarilla de arroz compactada de 0,671 ton/m³. Se utiliza la ecuación (10).

Desde Piladora del Pueblo hasta Piladora Macareñito.

$$Costo_{TotalTransporte} = \frac{Biomasa}{Cap_{carga}} * T$$

$$Costo_{TotalP_1} = \frac{545,5 \text{ ton/año}}{8,052 \text{ ton}} * 12,21 \text{ USD/viaje}$$

$$Costo_{TotalP_1} = 827,19 \text{ USD/año}$$

Desde Piladora Macará hasta Piladora Macareñito.

$$Costo_{TotalP_2} = \frac{681,8 \text{ ton/año}}{8,052 \text{ ton}} * 10,34 \text{ USD/viaje}$$

$$Costo_{TotalP_2} = 875,54 \text{ \$/año}$$

Desde Piladora Carmita hasta Piladora Macareñito.

$$Costo_{TotalP_3} = \frac{1090,9 \text{ ton/año}}{8,052 \text{ ton}} * 8,0 \text{ USD/viaje}$$

$$Costo_{TotalP_3} = 1083,85 \text{ USD/año}$$

Desde Piladora Gallo y Rosillo hasta Piladora Macareñito.

$$Costo_{TotalP_4} = \frac{1136,4 \text{ ton/año}}{8,052 \text{ ton}} * 11,27 \text{ USD/viaje}$$

$$Costo_{TotalP_4} = 1590,56 \text{ USD/año}$$

Finalmente se realiza la sumatoria del costo de transporte de las piladoras.

$$\text{Costo Transporte Anual} = Costo_{TotalP_1} + Costo_{TotalP_2} + Costo_{TotalP_3} + Costo_{TotalP_4}$$

$$\text{Costo Transporte Anual} = 827,19 \frac{\text{USD}}{\text{año}} + 875,54 \frac{\text{USD}}{\text{año}} + 1083,85 \frac{\text{USD}}{\text{año}} + 1590,56 \frac{\text{USD}}{\text{año}}$$

$$\text{Costo Transporte Anual} = 4377,14 \text{ \$/año}$$

En la **Tabla 32**, se aprecia los costos totales anuales de transporte, sin compactación y con compactación.

Tabla 32

Cuadro de resumen con los costos de transporte totales al año.

Costo anual de transportación de biomasa de cascarilla de arroz			
Sin Compactación		Compactada	
Transporte Subcontratado	Transporte Propio	Transporte Subcontratado	Transporte Propio
(USD/año)			
106364	23492,45	19814,46	4377,14

Fuente: (Autor).

6.3 Resultados del módulo de tecnologías de aprovechamiento de biomasa de cascarilla de arroz.

6.3.1 Caracterización de las tecnologías aplicables y restricciones técnico-económicas

En este apartado se realizarán consideraciones técnico-económicas sobre las tecnologías de aprovechamiento energético de biomasa. Estas consideraciones permitirán identificar la mejor tecnología según la aplicación energética deseada y las características del residuo disponible.

6.3.1.1 Caracterización de las tecnologías aplicables.

En la **Tabla 33**, se observa la caracterización de los tipos de planta de aprovechamiento energético de biomasa en los que se puede emplear los recursos biomásicos de la cascarilla de arroz.

Tabla 33

Tipos de planta de aprovechamiento energético de biomasa MTD's (mejores tecnologías disponibles).

Planta	Descripción
<p>Tipo A: Planta de pre-tratamiento (Trituración, secado y peletización).</p> <p>Productos: biocombustibles sólidos.</p>	<p>En estas plantas <u>se producirá biocombustible sólido</u> y puede consumirse parte de la biomasa para las necesidades térmicas de proceso. El producto final puede tener varios formatos:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Material triturado / astillado de diferentes granulometrías. Planta de astillado - Material peletizado. Planta de pellets
<p>Tipo B: Central térmica de generación de electricidad</p> <p>Productos: Electricidad.</p>	<p>En estas plantas se generará electricidad y se podrán utilizar los siguientes sistemas:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Ciclos de vapor (turbina a condensación, ciclo de rankine clásico) - Ciclos ORC (ciclo de rankine orgánico) - Sistemas de gasificación acoplados a motor de combustión interna (principalmente)
<p>Tipo C: Central térmica de cogeneración.</p> <p>Productos: Electricidad y calor.</p>	<p>En esta planta <u>se generará electricidad y calor</u> (en caso de ubicar la central en o junto a una empresa o centro con importantes necesidades térmicas). Se utilizará la biomasa para suministrar al sistema de cogeneración. La potencia térmica disponible se utilizará parcialmente para el secado previo.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Ciclos de vapor (turbina a condensación-extracción, vapor como principal aplicación térmica) - Ciclos ORC (para aplicaciones de agua caliente y calefacción únicamente) - Sistemas de gasificación acoplados a motor de combustión interna (aplicaciones de agua caliente, calefacción ó vapor)

Fuente: (Afonso, 2013).

6.3.1.2 Restricciones técnicas y económicas de las tecnologías de aprovechamiento energético de biomasa

En la **Tabla 34**, se estableció las restricciones técnicas de las tecnologías de aprovechamiento energético, descartando ciertas tecnologías en base al contenido de cenizas y a la producción mínima requerida para poder obtener beneficios de la implementación.

Tabla 34. Restricciones técnicas de las tecnologías.

Planta	Restricciones técnicas
<p>Tipo A: Planta de pre-tratamiento (Trituración, secado y peletización).</p> <p>Productos: biocombustibles sólidos.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - En estas aplicaciones el usuario final serán, principalmente, calderas, que pueden abarcar desde el sector doméstico hasta aplicaciones industriales. El contenido en ceniza debe ser bajo para un correcto funcionamiento de las calderas, se considerará la restricción de no superar el <u>5% de contenido en cenizas</u> promedio (en base seca.) - En el caso de producción de pellets se observa una fuerte economía de escala que obliga a tener una producción mínima de <u>10.000 – 20.000 t/año</u> de pellets (con 8-10% humedad).
<p>Tipo B: Central térmica de generación de electricidad</p> <p>Productos: Electricidad.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - <u>Ciclos de vapor (turbina a condensación).</u> La potencia mínima de estas centrales suele estar en torno a 1 – 2 MW y se aconseja un funcionamiento continuo (24 h día). Esto supone una disponibilidad de biomasa de más de 15.000 - 20.000 t/año. La viabilidad económica es todavía mayor y aconseja potencias superiores a los 5 MW (>50.000 t biomasa / año). Estos sistemas pueden aceptar residuos con alto contenido en ceniza. - <u>Ciclos ORC (ciclos de Rankine orgánicos)</u> Esta tecnología se suele presentar en módulos de 0.5 a 2 MW pudiendo alcanzar potencias totales de 5 a 10 MW. La viabilidad económica aconseja potencias superiores a 1 MW (>10.000 t biomasa /año) y puede soportar contenidos en ceniza elevados. - <u>Sistemas de gasificación acoplados a motor de combustión interna.</u> Esta tecnología presenta para potencias bajas (< 1MW_e) los reactores de lecho fijo y para potencias más elevadas (> 0.5 MW_e) los reactores de lecho fluidizado. En este tipo de aplicación se aconseja un contenido en ceniza inferior al 5%. En cuanto a la viabilidad económica, los gasificadores de lecho fijo suelen aconsejarse para potencias por encima de los 100 kW_e. Los gasificadores de lecho fluidizado, aunque más eficientes, presentan mayor complejidad y costes y se aconsejan para potencias superiores a 1 – 2 MW_e, siendo óptimos para potencias superiores a 3 – 4 MW_e.
<p>Tipo C: Central térmica de cogeneración con biomasa</p> <p>Productos: Electricidad y calor.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - En estas aplicaciones las restricciones generales son las mismas que las consideradas en las plantas de tipo B. Se pueden realizar las siguientes consideraciones adicionales. <ul style="list-style-type: none"> ✓ Las necesidades térmicas del proceso marcarán la potencia térmica y eléctrica instalable. ✓ Los ciclos de vapor con condensación-extracción pueden presentar una viabilidad económica aceptable para potencias menores, plantas de menor tamaño. Se requiere una ubicación con elevadas necesidades de vapor. ✓ En los ciclos ORC la potencia térmica sólo es aprovechable para generación de agua caliente y calefacción

Fuente: (Afonso, 2013).

6.3.1.3 Selección de la Tecnología de Aprovechamiento Energético.

En base a las restricciones técnicas de las tecnologías de aprovechamiento energético se puede definir que la mejor alternativa son los procesos térmicos de cogeneración, tomando las siguientes consideraciones:

- Se puede implementar para planta de aprovechamiento a pequeña escala o microgeneración.
- Acepta mayor variedad de recursos biomásicos.
- No existe restricción en el porcentaje de generación de cenizas.

6.3.2 Tecnología de aprovechamiento energético sistema ciclo Rankine orgánico

6.3.2.1 Selección del fluido de trabajo

En la **Tabla 35**, se observa las características de trabajo de los fluidos R134a, R600 y R245fa. Se descarta el fluido R134a ya que presenta un título de vapor menor al 100% a la salida de la turbina, situación que podría generar inconvenientes; por otro lado, el fluido R600 es descartado por ser un fluido inflamable, siendo seleccionado como fluido de trabajo el R245fa, ya que asegura que a la salida de la turbina se cuente con vapor saturado, por lo que se refleja en un mayor rendimiento del ciclo OCR, (Criollo & Pinzón, 2018).

Tabla 35. Parámetros de los fluidos de trabajo

Fluido	P3 [kPa]	P1 [kPa]	T3 [°C]	T.critica [°C]	Título de vapor [%]	Rendimiento [%]
R134a	3.247	1.017	91	101	93,06	5
R245fa	2.815	249,6	150	154	100	9,59
R600	3.250	379,2	150	152	100	9,33

Fuente: (Criollo & Pinzón, 2018).

6.3.2.2 Estudio de las tecnologías ORC

La selección de la tecnología ORC se desarrolla en función de las principales características: potencia eléctrica [kWe], rango de temperatura de aplicación, eficiencia eléctrica, fluido orgánico empleado en ORC.

6.3.2.3 Selección de los equipos

6.3.2.3.1 Sistema OCR

El sistema ORC es un sistema mediante el cual se aprovecha el calor residual de un proceso industrial previo, por ejemplo, el uso de los gases de combustión de una caldera, gases de escape de motores en una central térmica, entre otros, para la generación de energía eléctrica mediante la conversión de la energía remaneciente en los gases. Este sistema consta de varios equipos (turbina, generador, evaporador, condensador, bomba, economizador), y su selección no se lo hace por separado, con la única excepción de la caldera a biomasa. La caldera es el equipo encargado de entregar calor al circuito de aceite térmico que posteriormente entregará

calor al evaporador del sistema ORC. Para seleccionar adecuadamente la tecnología a emplearse se debe conocer los parámetros de selección del sistema ORC. Para ello se tomó datos proporcionados por empresas representativas dedicadas al desarrollo de la tecnología ORC, mostrados en la **Tabla 36**.

Tabla 36.
Parámetros de selección del sistema OCR.

Fabricante	Turboden	Maxxtec	Ormat	Calnetix Power
Parámetros				
Potencia [kWe]	200-15.000	300-2400	250-20.000	125
Rendimiento eléctrico	17%-23%	15%-18%		
Fluido de aporte				
Tipo	Aceite térmico	Aceite térmico	Aceite térmico	Aceite térmico
Tin [°C]	310	300	95-315	190
Tsalida [°C]	250	245-250		
Condensación				
Tipo	Agua	Agua	Agua	Agua
Tentrada [°C]	60	60		15
Tsalida [°C]	80	80-90		21
Fluido orgánico				
Tipo	R245fa	OMTS	n-pentano	R245fa
Tevaporación [°C]		287	36	121
Tcondensación [°C]		90	-129	35
T crítica [°C]	154			154
Vida útil	20 años	20 años	20 años	20 años

Fuente: (Criollo & Pinzón, 2018).

En base a los parámetros de trabajo de las tecnologías ORC, se establece que la tecnología seleccionada es Turboden que está en el rango de 200 a 15000 kWe.

6.3.2.3.2 *Caldera*

La selección de la caldera se la hace por separado (no junto con el sistema ORC seleccionado en el apartado anterior, que no incluye la caldera a biomasa). Para la selección de la caldera se debe cumplir con parámetros de diseño en función del fluido orgánico de trabajo, la biomasa disponible, presión y temperatura de trabajo. La **Tabla 37**, muestra los parámetros de diseño de la caldera a biomasa con circuito de aceite térmico. Estos datos fueron tomados a partir de la selección del fluido de trabajo y cantidad de biomasa disponible estudiada.

Tabla 37
Parámetros de selección de caldera.

Parámetros	Descripción
Capacidad biomasa [kg/h]	729
Temperatura salida [°C]	<154
Presión [kPa]	<2815
Biomasa	Cascarilla de arroz
Fluido que aporta energía al fluido de trabajo	Aceite térmico

Fuente: (Autor).

En el mercado existen varios tipos de calderas, en particular las calderas a biomasa queman el combustible en la cámara de combustión y el calor generado por la combustión es transmitido al circuito de vapor o aceite térmico en el intercambiador de calor (evaporador). Es importante

seleccionar adecuadamente la caldera a biomasa con el circuito de aceite térmico o agua. En la **Tabla 38**, se muestran las características que presentan las calderas con circuito de vapor y aceite térmico.

Tabla 38

Características con circuito de vapor y aceite térmico.

Caldera con circuito de vapor	Caldera con circuito de aceite térmico
Alta presión para conseguir altas temperatura	Temperatura de trabajo menor a 340°C a bajas presiones
Alto costo de mantenimiento	Bajos costos de mantenimiento
Requiere de equipos adicionales	No requiere equipos adicionales
Eficiencia energética baja	
Problemas de corrosión	No presenta problemas de corrosión

Fuente: (Pirobloc, n.d.).

Con las características del circuito de aporte de calor mostrado en la **Tabla 38**, se determina que la caldera con circuito de aceite térmico presenta menos restricciones en relación con el circuito de vapor, por tal razón se empleará una caldera con circuito de aceite térmico para el desarrollo de este trabajo. A partir de esta esta información se selecciona la tecnología adecuada de la caldera con circuito de aceite térmico.

6.3.2.4 Análisis termodinámico

En esta sección se presenta el análisis termodinámico del sistema ORC empleado en este trabajo.

El sistema ORC es un proceso irreversible donde el fluido de trabajo afectará directamente la eficiencia del sistema. Por ello es indispensable seleccionar adecuadamente el fluido de trabajo para el sistema ORC. En el caso de estudio se seleccionó el fluido R245fa por sus propiedades termodinámicas favorables para la aplicación en el ciclo ORC. La fuente de calor es una caldera alimentada con cascarilla de arroz. (Criollo & Pinzón, 2018).

En **Tabla 39**, se muestran los datos iniciales del sistema OCR y la **Tabla 40**, muestra los parámetros del sistema ORC.

Tabla 39

Datos iniciales del Sistema ORC.

Parámetros iniciales	Valores
T [4]	<154 C
P [4]	< 2815 [kPa]
T [1]	40 [C]
P [1]	Patm<101,325 [kPa]
Fluido de trabajo	R245fa

Fuente: (Criollo & Pinzón, 2018).

Tabla 40

Parámetros del sistema ORC.

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
T [4]	116 [°C]	Eficiencia bomba	78%
P [4]	1519 [kPa]	Eficiencia turbina	70%
T [1]	30 [°C]	Potencia eléctrica	348 [kWe]
P [1]	180 [kPa]	Eficiencia del generador	95%
CP aceite	1,97 [KJ/kg °C]		

Fuente: (Criollo & Pinzón, 2018).

En la **Figura 22**, se muestra el esquema del Ciclo Rankine Orgánico del sistema.

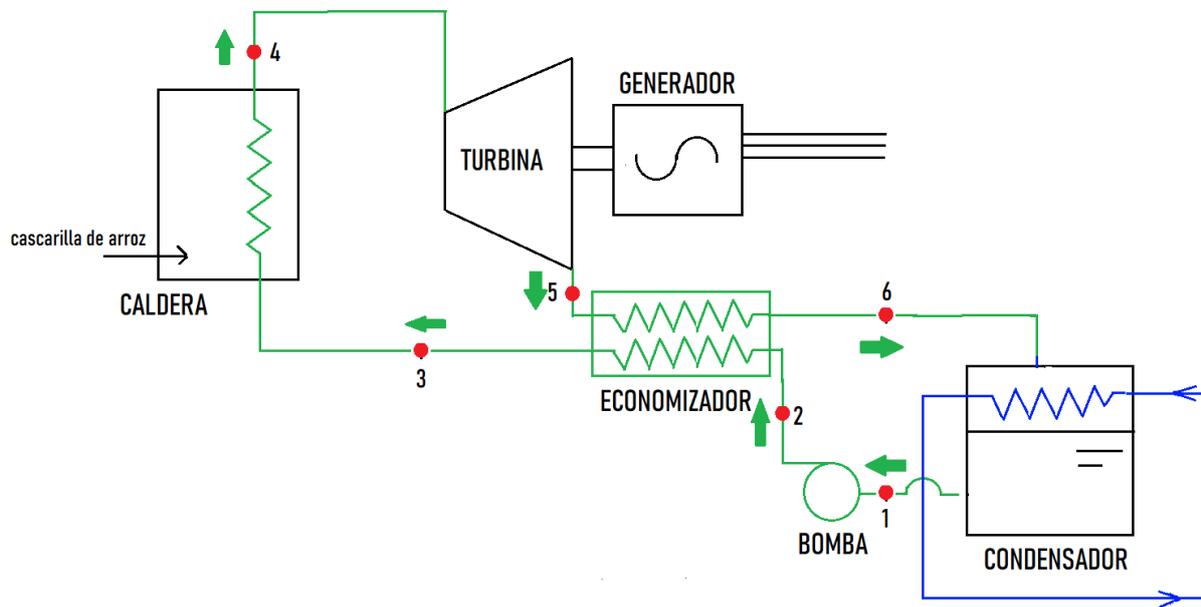


Figura 22. Esquema del Ciclo Rankine Orgánico (Autor).

En la **Figura 23**, se observan los resultados obtenidos del análisis termodinámico de sistemas OCR mediante el Software EES Professional.

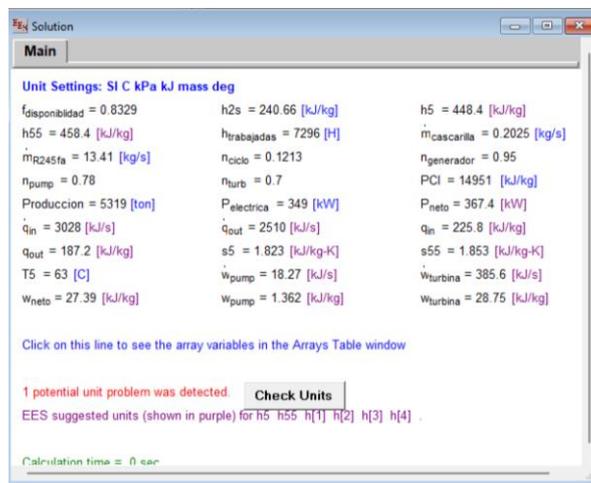


Figura 23. Resultados del análisis termodinámico del sistema OCR (Autor).

6.3.2.4.1 Alimentación de cascarilla de arroz

Para determinar el flujo másico de cascarilla de arroz necesaria, que se debe combustionar en la caldera para elevar la temperatura del aceite térmico a una temperatura de 190 [°C], se debe tener en cuenta el PCI (Poder Calórico Inferior). Este parámetro característico determina la cantidad de energía liberada por unidad de masa del biocombustible durante la combustión. Para la cascarilla de arroz se utilizará un valor de 14,951 MJ/kg.

Este valor se determina mediante ecuación (11).

$$Q_{in} = PCI * m_{cascarilla}$$

$$m_{cascarilla} = \frac{Q_{in}}{PCI}$$

$$m_{cascarilla} = \frac{3028 \text{ kW}}{14951 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} * \frac{1 \text{ kJ}}{\text{kW} * \text{s}} = 0,2025 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

6.3.2.4.2 Cascarilla de arroz requerida por año

La cantidad de cascarilla de arroz requerida anualmente para operar el ciclo ORC se determina mediante la consideración del factor de disponibilidad. Este factor expresa el número de horas de operación de una planta a lo largo del año. La ecuación (12) determina el factor de disponibilidad del sistema ORC.

$$f_a = \frac{\text{horas de funcionamiento de la planta}}{\text{horas totales del año}}$$

$$f_a = \frac{7296 \text{ h}}{8760 \text{ h}} = 0,8328$$

El factor de disponibilidad indica que el sistema ORC estará en funcionamiento 7296 horas de las 8760 horas de año.

La producción anual de cascarilla de arroz requerida para el funcionamiento de la planta de ORC se determina mediante la ecuación (13).

$$m_{cascarilla} \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] = \frac{\text{Producción} \left[\frac{\text{ton}}{\text{año}} \right]}{f_a}$$

$$\text{Producción} \left[\frac{\text{ton}}{\text{año}} \right] = m_{cascarilla} \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] * f_a$$

$$\text{Producción} \left[\frac{\text{ton}}{\text{año}} \right] = 0,2025 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * (0,8328) = 0,1686 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$\text{Producción} \left[\frac{\text{ton}}{\text{año}} \right] = 0,1686 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}} * \frac{1 \text{ ton}}{1000 \text{ kg}} * \frac{8760 \text{ h}}{1 \text{ año}}$$

$$Producción = 5316,9 \left[\frac{ton}{año} \right]$$

Como se observa la producción requerida de cascarilla de arroz para el correcto funcionamiento de la planta de ORC es de 5316,9 ton/año.

6.3.2.4.3 Eficiencia del ciclo ORC

La eficiencia térmica del ciclo ORC se define como el cociente entre el trabajo neto del ciclo termodinámico ORC y el calor suministrado al evaporador. Este valor se lo obtuvo mediante el software EES siendo de 12,13%.

6.3.2.4.4 Eficiencia de la planta ORC

La eficiencia de la planta ORC se define como el cociente entre la potencia eléctrica del ciclo ORC y la potencia de combustión mostrada en la ecuación (14).

$$\eta_{planta} = \frac{P_{eléctrica}}{P_{combustión}}$$

La potencia de combustión se muestra en la ecuación.

$$P_{combustión} = m_{combustible} * PCI_{combustible}$$

$$P_{combustión} = 0,2025 \frac{kg}{s} * 14951 \frac{kJ}{kg} = 3027,57 kWt$$

$$\eta_{planta} = \frac{349 kW}{3027,57 kWt} * 100 = 11,53\%$$

6.3.2.4.5 Potencia de la planta ORC (MWe)

La potencia de la planta ORC se expresa en MWe y se expresa mediante la ecuación (15), presentada para proyectos de generación eléctrica usando biomasa como fuente de energía (16), donde el factor de planta expresa las horas de operación del sistema ORC.

$$P = \frac{0,278 * m_{biomasa} * PCI_{biomasa} * \eta_{planta}}{horas funcionamiento de planta}$$

$$P = \frac{0,278 * 5316,9 \frac{t}{año} * 14,951 \frac{Mj}{kg} * 0,1154}{7296} = 0,348 MWe$$

Energía eléctrica generada anualmente.

$$E_g = P * f_a$$

$$E_g = 348 kW * 8760 \left(\frac{h}{año} \right) * 0,8328 = 2538774,14 \frac{kWh}{año} = 2538,77 \frac{MWh}{año}$$

6.3.3 Estudio de viabilidad económica

El análisis económico es una parte complementaria del estudio técnico, el principal objetivo en este apartado es analizar la viabilidad económica del proyecto con el fin de determinar si el

proyecto se puede implementar o no, para el efecto se analizará los ingresos, egresos y viabilidad económica del proyecto.

6.3.3.1 Coste de biomasa

Para el análisis, se asume que la cascarilla de arroz no tiene costo, por tratarse de un desecho. (Silva, 2017).

6.3.3.2 Costo de inversión inicial

Para calcular el costo de inversión inicial se emplea la ecuación (17).

Los costos de capital de ORC 1580 USD/kW.

$$Costo_{Inversión} = Potencia\ generada * Costo_{capital}$$

$$Costo_{Inversión} = 348\ kW * 1580\ \frac{USD}{kW}$$

$$Costo_{Inversión} = 549840\ USD$$

Costo total de inversión

$$Costo_{Total_Inversión} = Costo_{Inversión} + Costo_{compactadora}$$

$$Costo_{Total_Inversión} = 549840\ USD + 15000\ USD$$

$$Costo_{Total_Inversión} = 564840\ USD$$

6.3.3.3 Egresos

6.3.3.3.1 Costos fijos de operación y mantenimiento (O&M)

Los costos fijos de operación y mantenimiento incluyen: mano de obra, seguros, mantenimiento programado y reemplazo de rutina de la planta, componentes (por ejemplo, calderas y gasificadores), equipos de manipulación de materias primas y otros elementos. (IRENA, 2023).

Los costos de operación y mantenimiento representan entre 0,9 a 1,8 cents/kWh, (U.S DEPARTMENT OF ENERGY, 2021).

Para el cálculo de costos de operación y mantenimiento se tomará el mayor valor de 1.8 cents/kWh.

Para calcular los costos fijos se emplea la ecuación (18).

$$Costo_{O\&M} = Energía\ anual * 0,018\ USD/kWh$$

$$Costo_{O\&M} = 2547309,9\ kWh/año * 0,018\ USD/kWh$$

$$Costo_{O\&M} = 45851,58\ USD/año$$

En la **Tabla 41**, muestra los costos fijos de operación y mantenimiento.

Tabla 41

Costos Fijos.

Concepto	Costos variables (USD/año)
Arrendo del terreno	0
Costo de O&M	45851,58
TOTAL	45851,58

Fuente: (Autor).

6.3.3.3.2 Costos Variables

Las piezas de repuesto y los costos incrementales de servicio son los componentes principales de costos variables de operación y mantenimiento, aunque estos también incluyen costos de combustibles distintos de la biomasa, como la eliminación de cenizas.

Los costos variables de operación y mantenimiento, con un promedio de USD 0,005/kWh, suelen ser bajos para las plantas de energía de bioenergía cuando en comparación con los costos fijos de operación y mantenimiento, (IRENA, 2023). Para obtener los costos variables se emplea la ecuación (19).

$$\begin{aligned}
 \text{Costo}_{\text{variables}} &= \text{Energía anual} * \text{Costo promedio} \\
 \text{Costo}_{\text{variables}} &= 2547309,9 \text{ kWh/año} * 0,005 \text{ USD/kWh} \\
 \text{Costo}_{\text{variables}} &= 12736,55 \text{ USD/año}
 \end{aligned}$$

Los resultados se presentan en la **Tabla 42**, para el análisis se asume que la cascarilla de arroz no tiene costo por tratarse de un desecho, también se asume que el costo de transporte es de 4377,1 USD/año, debido a que este es el valor más económico con relación a los demás costos de transporte.

Tabla 42

Costos Variables.

Concepto	Costos variables (USD/año)
Cascarilla de arroz	0
Costo de transporte	4377,14
Costos Variables	12736,55
TOTAL	17113,69

Fuente: (Autor).

6.3.3.4 Ingresos

En este apartado se determina los ingresos obtenidos mediante la implementación del sistema ORC. Para ello, es posible obtener ingresos por ahorro en consumo eléctrico, por venta de energía eléctrica y venta de certificados por reducción de emisiones.

6.3.3.4.1 Ahorro por consumo eléctrico

La piladora “MACAREÑITO”, en el año 2022 tuvo un consumo de energía anual de 356053 kWh. En la siguiente **Tabla 43**, se especifica el consumo mensual de energía.

Tabla 43

Consumo eléctrico mensualizado de la Piladora Macareño.

Consumo Eléctrico Piladora Macareño	
MES	CONSUMO (kWh)
Enero	51054
Febrero	48965
Marzo	18141
Abril	7009
Mayo	27544
Junio	50741
Julio	50233
Agosto	36859
Septiembre	21911
Octubre	5340
Noviembre	11243
Diciembre	27013
Consumo Anual	356053

Fuente: (EERSSA).

La ARCERNNR califica a la Piladora Macareño en la sección de BT- Industrial con Demanda por tal razón, el costo por cada kilovatio-hora, es de \$0,08 por los tanto, el costo anual de energía se calcula con la ecuación (20).

$$Costo_E = E_C * Costo_{kWh}$$

$$Costo_E = 356053 \left[\frac{kWh}{año} \right] * 0,08 \frac{USD}{kWh}$$

$$Costo_E = 28484,24 \text{ USD/año}$$

Mediante la ecuación (21) se determina el costo de la demanda se obtendrá mediante la demanda de potencia requerida por cada mes.

$$Costo_D = Consumo_D * Costo_{kW}$$

$$Costo_D = 183 \text{ kW} * 4,79 \frac{USD}{kW}$$

$$Costo_D = 876,57 \text{ USD}$$

En la **Tabla 44**, se muestra el valor de la demanda máxima mensual y su costo.

Tabla 44*Resumen de la demanda eléctrica anual.*

Mes	Demanda Max. (kW)	Valor Demanda (USD)
Enero	183	876,57
Febrero	196	938,84
Marzo	191	914,89
Abril	179	857,41
Mayo	190	910,1
Junio	163	780,77
Julio	199	953,21
Agosto	195	934,05
Septiembre	187	895,73
Octubre	180	862,2
Noviembre	117	560,43
Diciembre	185	886,15
Total	2165	10370,35

Fuente: (EERSSA).**6.3.3.4.2 Venta de energía**

El principal ingreso que tiene una central generadora de energía eléctrica se debe a la venta de energía eléctrica al Sistema Nacional Interconectado y/o al uso de energía eléctrica generada como autoconsumo en la piladora. Este último representa un ingreso expresado en ahorro económico en la piladora debido a que no se debe incurrir en el pago de electricidad ya que se usa la misma energía eléctrica generada. Se calcula con la ecuación (22).

- **Tarifas preferenciales de energías renovables no convencionales**

Para conocer el ingreso obtenido por venta de energía utilizaremos las tarifas dadas por el ARCONEL.

$$I_{energía} = (E_g - E_c) * P_{VE}$$

$$I_{energía} = \left(2538774,14 \frac{kWh}{año} - 356053 \frac{kWh}{año} \right) * 0,0586 \frac{USD}{kWh}$$

$$I_{energía} = 127907,46 USD$$

6.3.3.4.1 Venta de certificado de reducción de emisiones (CERs)

Para calcular las reducciones de emisiones en cada año se considera la ecuación (23) para obtener las toneladas equivalentes de CO₂ y el costo del certificado de emisiones con la ecuación (24).

$$T_{CO2eq} = F_E * B_g$$

$$T_{CO2eq} = 1,43 \frac{tCO2}{MWh} * 5318,18 \frac{ton}{año}$$

$$T_{CO2eq} = 7604,9 \frac{tCO2}{año}$$

La ecuación (24) se utiliza para determinar los ingresos generados por la venta de certificados de reducción de emisiones de CO2. Se considera que el precio de los CERs tiene un valor de 8,64 USD/tCO2. (Mendoza, 2023).

$$I_{CO2} = T_{CO2eq} * CERs$$

$$I_{CO2} = 7604,9 \frac{tCO2}{año} * 8,64 \frac{USD}{tCO2}$$

$$I_{CO2} = 65706,34 \frac{USD}{año}$$

6.3.4 Rentabilidad económica

Considerando que vida útil de los sistemas de generación eléctrica que emplean biomasa es de 20 años. (ANEXO 3)

En el Ecuador, al igual que en otros países de América Latina, se emplea una tasa fija de descuento, por lo general del 12%, (Castillo & Zhangallimbay, 2021).

Tabla 45

Determinación de la rentabilidad del proyecto

Periodo	Inversión Inicial (USD)	Costos (USD)	Ingresos (USD)	Flujo (USD)	Flujo Acumulativo (USD)	VAN	TIR	Pay-Back (Años)
0	-564840			-564840	-564840			
1		-62965,27	232465,65	169499,73	-395340,27			
2		-62965,27	232465,65	169499,73	-225840,54			
3		-62965,27	232465,65	169499,73	-56340,80			
4		-62965,27	232465,65	169499,73	113158,93			
5		-62965,27	232465,65	169499,73	282658,66			
6		-62965,27	232465,65	169499,73	452158,39			
7		-62965,27	232465,65	169499,73	621658,12			
8		-62965,27	232465,65	169499,73	791157,86			
9		-62965,27	232465,65	169499,73	960657,59			
10		-62965,27	232465,65	169499,73	1130157,32	701228,69	30%	3,3
11		-62965,27	232465,65	169499,73	1299657,05			
12		-62965,27	232465,65	169499,73	1469156,78			
13		-62965,27	232465,65	169499,73	1638656,52			
14		-62965,27	232465,65	169499,73	1808156,25			
15		-62965,27	232465,65	169499,73	1977655,98			
16		-62965,27	232465,65	169499,73	2147155,71			
17		-62965,27	232465,65	169499,73	2316655,44			
18		-62965,27	232465,65	169499,73	2486155,18			
19		-62965,27	232465,65	169499,73	2655654,91			
20		-62965,27	232465,65	169499,73	2825154,64			

Fuente: (El autor).

Como se demuestra en la **Tabla 45**, a partir del tercer período se puede evidenciar un beneficio rentable, El VAN hasta el período 20 es de -USD 722807,15 siendo superior al 0; la TIR es de

30% que es mayor al 12% de la tasa de descuento, se determina que la inversión es rentable en el período estimado.

7. Discusión

El propósito de este proyecto fue elaborar una evaluación económica para el aprovechamiento energético de la cascarilla de arroz en el cantón Macará con el fin de aprovechar este recurso de biomasa, para esto se consideró la cuantificación y caracterización de la cascarilla de arroz, los costos de transporte que intervienen y finalmente se determinó la viabilidad económica.

La caracterización de biomasa en Macará está fundamentada en análisis específicos de (Salazar, 2019), informes sectoriales y base de datos del Sistema de Información Pública Agropecuaria (SIPA). Para la cuantificación se realizó mediante datos directos de estudios precedentes, estimaciones basadas en coeficientes de generación superficial y generación de residuos en función de la producción agrícola, obteniendo que los residuos del procesamiento del arroz son en promedio 20% de su producción, (Peñaranda González, Montenegro Gómez, & Abad, 2017), generándose alrededor de 1741.75 ton/año cascarilla de arroz. Para corroborar esta cantidad obtenida se aplicó una encuesta a los propietarios de las piladoras ya que es donde se concentra este residuo dando como resultado que en realidad la cascarilla acumulada en el cantón Macará es de aproximadamente 5318.18 ton/año de cascarilla de arroz, esto se debe a que en Macará también se procesa el arroz del cantón Zapotillo, los resultados obtenidos por (Afonso, 2013), aplicados a la Comunidad Valencia, difieren mucho del presente estudio debido a que este posee una producción de arroz de 110316 ton/año y considera un coeficiente de generación del 16% obteniendo como resultado una cuantificación de biomasa de cascarilla de arroz de 17650.56 ton/año.

En cuanto a la metodología para estimar el costo de transporte que fue desarrollada por (Afonso, 2013), este presenta costes de transporte situados en el rango de 17.33 – 21.67 USD/ton , que corresponden a unas distancias de transporte en el rango 7 – 32km (distancias promedio de solo ida), por lo contrario en el presente estudio se obtuvo costos de transporte en el rango de 1.29 – 20 USD/ton estos corresponde a distancias en el rango 3.1 – 4.9 km, por tal motivo los costos totales de transporte son más económicos ya que estas distancias corresponden a los puntos de generación de biomasa de cascarilla de arroz (Piladoras) que se encuentran dentro del cantón Macará, a diferencia de las distancias mencionadas en el otro que resultan de las distancias entre comarcas por tal motivo son mayores.

El costo de transporte más económico resultó ser de 4377,14 USD/año que corresponde a coste de transporte con compactación y camión propio, estos costos finales están fundamentos en base al “Método para determinar el límite inferior de las tarifas para vehículos comerciales

pesados”, emitido por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas en su Acuerdo Ministerial no. 23-2022.

Para el análisis de rentabilidad se determinó un periodo de 20 años de vida útil con una inversión inicial estimada de USD 564840, este costo se determina en base al valor de 1580 USD/kW instalado, obtenido de (Tartière & Astolfi, 2017), se considera este costo debido a que en nuestro país no existen valores que determinen la inversión inicial. Los gastos anuales son de USD 62965,27 e ingresos de USD 232465 teniendo en cuenta una tasa de descuento del 12% se obtiene un VAN de USD 701228,15 y una TIR del 30%, se determina que el presente estudio resulta viable. En comparación al estudio realizado por parte de (Criollo & Pinzón, 2018), los resultados de su análisis de rentabilidad para un período de 20 años, con una inversión de USD 334.232 y una tasa de interés del 12% obtiene como resultado un VAN de -USD 68448 y una TIR de 9%, considerándose en este caso no viable.

8. Conclusiones

- La cuantificación de cascarilla de arroz en el cantón Macará considerando el área superficial de cultivo de arroz de aproximadamente 1057 ha/año, teniendo una producción de arroz de 145 quintales/ha de arroz limpio y tomando un factor de generación agrícola de 20% se obtiene como resultado 1741.75 ton/año de cascarilla de arroz al año, pero al aplicar encuestas a los propietarios de las piladoras resulta ser que la cantidad total de cascarilla de arroz generada es de 5318.18 ton/año debido a que en las piladoras también se procesa la producción de arroz del cantón Zapotillo.
- Para la estimación de los costos de transporte se obtuvo que para el coste de transporte subcontratado es de 106364 USD/año, un costo de transporte subcontratado con compactación de 19814.46 USD/año, estos dos primeros costos se determinaron mediante encuestas realizadas a propietarios de transporte de carga en la zona de estudio; los costos restantes son los costos de transporte con camión propio sin compactación y con compactación donde se obtuvo 23492.45 USD/año y 4377,14 USD/año respectivamente, siendo este último el costo de transporte más económico
- La tecnología de aprovechamiento energético de biomasa que se adapta al proyecto es la planta de Ciclo Rankine Orgánico debido a la cuantificación y caracterización físico-química de la cascarilla de arroz. El análisis económico realizado al proyecto arrojó un resultado favorable bajo las condiciones que se plantean, obteniendo un beneficio de USD 113158,93 a partir del periodo tres, un VAN de USD 701228,69 y TIR de 30%, considerándose para este análisis viable.

9. Recomendaciones

- Para futuras investigaciones sería interesante aplicar la metodología en cantones con alta productividad agrícola (bagazo, maíz, cacao, café).
- Desarrollar una aplicación con la metodología realizada para facilitar la actualización de datos para evaluar los distintos módulos y su uso por parte de otros usuarios.
- Realizar el análisis del ciclo de vida para evaluar el impacto ambiental y económico de las diferentes tecnologías de aprovechamiento energético de la cascarilla de arroz en comparación con las alternativas convencionales.
- Investigar el desarrollo de políticas y regulaciones que promuevan el aprovechamiento energético sostenible de la biomasa agrícola, incluyendo incentivos fiscales para la producción y uso de biocombustibles, estándares de sostenibilidad y certificación, y programas de apoyo a la investigación y desarrollo en este campo.

Estas son solo algunas sugerencias para futuras líneas de investigación en este campo. La colaboración entre investigadores, empresas, instituciones gubernamentales y la comunidad agrícola será crucial para avanzar en el aprovechamiento energético sostenible de la cascarilla de arroz.

10. Bibliografía

- Afonso, D. (2013). Metodología para la optimización del aprovechamiento energético de los recursos de biomasa Aplicación a la comunidad Valenciana. 420. Valencia, España.
- Álvarez, A. (2013). Caracterización Química de Bioamasa y su relación con el Poder Calorífico. España: Universidad de Oviedo.
- ARCERNNR. (2022). *Resolución Nro. ARCERNNR 009/2022*. Obtenido de https://www.controlrecursosyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2022/05/Pliego-Tarifario-Servicio-Publico-de-Energia-Elctrica_-Ano-2022.pdf
- ARCERNNR. (2023). *Regulación Nro. ARCERNNR-008/2023*. Obtenido de https://www.controlrecursosyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2021/06/res_nro__arcernnr-013-2021.pdf
- Atlas Bioenergético del Ecuador* (Primera ed.). (2014).
- Barragan, E. (2012). Implementación del Mecanismo de Desarrollo Limpio en el Sector Eléctrico Ecuatoriano. *Energía*, 132-151.
- Barrangan, R., & Llanes, E. (11 de Septiembre de 2020). THE GENERATION OF ELECTRICAL ENERGY FOR INDUSTRIAL DEVELOPMENT IN ECUADOR FROM THE USE OF RENEWABLE ENERGY. *Universidad, Ciencia y Tecnología*, 24(104), 11. doi:10.47460/uct.v24i104.364
- Barrera, J. C., Ramírez Contreras, N. E., & García Nuñez, J. A. (2018). Combustión de biomasa: conceptos, tecnologías y aplicaciones en la agroindustria de la palma de aceite. 39(4), 24-44.
- Basu, P. (16 de February de 2006). Combustion and Gasification in Fluidized Beds. 496. doi:<https://doi.org/10.1201/9781420005158>
- Buragohain, B., Mahanta, P., & Moholkar, V. S. (2010). Renewable Sustainable Energy Rev. 73-92.
- Calderon Loor, M., Andrade , F., Lizarzaburu, L., & Masache, M. (2017). *Valoración económica de los cobeneficios del aprovechamiento energético de los residuos agrícolas en el Ecuador*. Santiago: Naciones Unidas.
- Camargo, C., Carvalho, N., Garcia, D., & Sica, E. (2006). “Investments in Clean Development Mechanism Projects in Latin America and Diversification of the Regional Electrical Energy Matrix. *IEEE*, 1-4.

- Carreño, K. L., Rodríguez, M., Macías, T. Y., Vásquez, A., Muñoz, R. F., Menoscal, G. R., & Bravo, T. B. (05 de 03 de 2023). Estudio de biomasa en una finca localizada en la comunidad Naranjal de la parroquia Abdón Calderón. 61-79. Ecuador.
- Castells, X., Cadavid, C., Campos, P. E., Flotats, R. X., Gracia, F. J., Jurado, G. L., . . . Velo, G. E. (2005). Tratamiento y Valorización energética de residuos. España: Ediciones Díaz de Santos.
- Castillo, J. G., & Zhangallimbay, D. (Agosto de 2021). La tasa social de descuento en la evaluación de proyectos de inversión: una aplicación para el Ecuador. *CEPAL*(134), 22. Obtenido de https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/47285/1/RVE134_Castillo.pdf
- CCA. (2014). , *La quema de residuos agrícolas: fuente de dioxinas*. Comisión para la Cooperación Ambiental, Montreal, Canada.
- Criollo, A. E., & Pinzón, E. J. (Junio de 2018). EVALUACIÓN DEL POTENCIAL TÉCNICO Y ECONÓMICO DE PLANTAS DE GENERACIÓN ELÉCTRICAS BASADAS EN CALDERAS A BIOMASA Y CICLO RANKINE ORGÁNICO (ORC) PARA EL APROVECHAMIENTO DE LA CASCARILLA DE ARROZ EN ECUADOR. 122. Quito, Ecuador. Obtenido de <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/19464/1/CD-8859.pdf>
- De Lucas Herguedas, A., & Del Peso, C. (2012). *BIOMASA, BIOCOMBUSTIBLES Y SOSTENIBILIDAD*. Palencia.
- DIRECCIÓN DE REGULACIÓN TÉCNICA DEL SECTOR ELÉCTRICO. (2022). *INFORME DE SUSTENTO REGULACIÓN <<GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE RESIDUOS O DESECHOS SÓLIDOS NO PELIGROSOS MUNICIPALES>>*. Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables. Obtenido de https://www.controlrecursosyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2022/05/informe_de_sustento_version_4_0_vf_suscrito_rev_jpps.pdf
- Echeverría Cruz, M. A., & López Mena, O. A. (Mayo de 2010). Caracterización energética de la cascarilla de arroz para su aplicación en la generación de energía termoeléctrica. 185. Quito, Ecuador.
- ESIN Consultora S.A. (2014). *Atlas solar bioenergético del Ecuador* (Primera ed.). Ecuador.
- Estrada, C., & Arancibia, C. (2010). Las energías renovables: La energía solar sus Implicaciones. *Revista Digital Universitaria*, 1-27.

- Fernández, J. (2003). *Bioamasa*. Iberdola.
- Figuerola Luque, E. (2013). ESTUDIO TÉCNICO-ECONÓMICO PARA LA IMPLANTACIÓN DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE BIOMASA EN ANDALUCÍA. 107. Sevilla, España. Obtenido de <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/70586/fichero/Trabajo+fin+de+M%C3%A1ster+Enrique+Figuerola+Luque.pdf>
- Génesis, Z., García, V., Cedeño, C., & Alcivar, U. (Abril de 2021). Aprovechamiento de la cascarilla de arroz (*Oryza sativa*) para la obtención de fibras de celulosa. *Polo del Conocimiento*, 6(4), 415-437. doi:10.23857/pc.v6i4.2572
- González, A. (Julio de 2014). Estudio de la logística de una planta de biomasa para abastecer de energía térmica a la Universidad de Valladolid. 110.
- Google Earth. (2022). Obtenido de <https://earth.google.com/web/@-4.37505236,-79.95686167,440.69657992a,12077.06010052d,30.00041524y,-0h,0t,0r/data=MikKJwolCiExeTMtY3dYa3VvV19HckhMZEtcHdRdDQxNXhqLUJFN3MgAToDCgEw>
- IDAE. (2007). *Biomasa: Gasificación*. Madrid.
- IDAE. (2007). *Biomasa: Gasificación*. Madrid, España.
- IDAE. (2009). Guía técnica Instalaciones de biomasa térmica en edificios. En I. p. Energía. Madrid.
- IRENA. (2023). *Renewable power generation costs in 2022*. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. Obtenido de www.irena.org
- Lalvay, E. J., & Vidal, J. P. (2013). Estudio técnico-económico de una planta de generación eléctrica a base de biogás. 208. Cuenca, Ecuador. Obtenido de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/4386/3/TESIS.pdf>
- Loja, C. (2017). Optimización de los residuos de cascarilla de arroz mediante pretratamiento por hidrólisis ácida para la obtención de azúcares reductores. 94. Cuenca: Universidad de Cuenca.
- Made in China. (2023). *Made-in-China*. Obtenido de https://es.made-in-china.com/co_wxjianlong/product_Factory-Direct-Rice-Husk-Compactor-Press-Bagging-Baler-Machine-Horizontal-Hydraulic-Baling-Machine_ysiurnunng.html
- MAG. (4 de Abril de 2020). Productores de arroz de Macará y Zapotillo reciben certificados para movilizar su producción. Loja, Loja, Ecuador.
- Martínez Lozano, S. (2009). *EVALUACIÓN DE LA BIOMASA COMO RECURSO ENERGETICO RENOVABLE EN CATALUÑA*. GIRONA.

- McKendry, P. (2002a). Energy Production from biomass (Part 1): Overview of Biomass. *Bioresource Technology*, 37-46.
- McKnedry, P. (2002b). Energy production from biomass (Part 3): gasification technologies. *Bioresource technology*, 83, 55-63.
- Mendoza, I. (24 de Enero de 2023). *Los créditos al carbono iban a ser el caballo de Troya de las emisiones. No han servido de nada*. Obtenido de <https://www.motorpasion.com/futuro-movimiento/creditos-al-carbono-iban-a-ser-caballo-troya-emisiones-no-han-servido-nada>
- Ministerio de Transporte y Obras Públicas. (2016). *Acuerdo Ministerial 018-2016 Tabla Nacional de Pesos y Dimensiones*. Obtenido de https://www.obraspublicas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2016/08/STT_C_AM_MTOP_018_2016_Pesos-y-Dimensiones.pdf
- Mujal Rosas, R. (2003). *Tecnología Eléctrica*. Dediciones Upc.
- Nogués, F. S. (2010). *Energía de la Biomasa* (1era ed., Vol. I). Zaragoza, España: Prensas Universitarias de Zaragoza.
- Nussbaumer, T. (13 de Septiembre de 2003). Combustion and Co-combustion of Biomass: Fundamentals, Technologies, and Primary Measures for Emission Reduction. *Energy Fuels*, 6(17), 1510-1521. doi:<https://doi.org/10.1021/ef030031q>
- Ochoa, O. (2016). Bonos de carbono: desarrollo conceptual y aproximación crítica. *Misión Jurídica*, 9(11), 289-297. doi:DOI: <https://doi.org/10.25058/1794600X.141>
- Peñaranda Gonzáles, L. V., Montenegro Gómez, S. P., & Abad, G. (2017). Aprovechamiento de residuos agroindustriales en Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 141-150. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/6285350.pdf>
- Perera, P. G., Rathnasiri, S., Senerath, A., Sugathapala, S. C., Bhattacharya, P., & Abdul Salam, (2005). Assessment of sustainable energy potential of non-plantation biomass resources in Sri Lanka. , *Biomass* , 199-213.
- Pérez, A. (17 de Agosto de 2017). *OBS Business School*. Obtenido de Transporte y Distribución, ¿propios o subcontrados?: <https://www.obsbusiness.school/blog/transporte-y-distribucion-propios-o-subcontratados>
- Pirobloc*. (s.f.). Obtenido de <https://www.pirobloc.com/>

- Pode, R. (Enero de 2016). Potential applications of rice husk ash waste from rice husk biomass power plant. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 1468-1485. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.051>
- Procordova. (2007). *Manual para Pequeñas y Medianas Empresas (PyMEs)*.
- Red Española de Compostaje. (2014). *Residuos agrícolas I.1. De residuos a recursos. El camino hacia la sostenibilidad*. (J. Moreno, R. Moral, J. L. García-Morales, J. A. Pascual, & M. P. Bernal, Edits.) Madrid: Edit. Cient.
- Rugao Huicheng Hydraulic Machinery Co., L. (2013). *Alibaba*. Obtenido de <https://spanish.alibaba.com/product-detail/Automatic-rice-husk-rice-hull-press-556356262.html>
- Ruiz, U. R. (2016). Desarrollo y caracterización de un tablero de partículas elaborado a partir de la cascarilla de arroz y resina poliéster. 156. Loja, Loja, Ecuador.
- Saidur, A., Abdelaziz, E., Demirbas, A., Hossain, M., & Mekhilef, S. (2011). A review on biomass as a fuel for boilers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(5), 2262-2289. doi:0.1016/j.rser.2011.02.015
- Salinas Catellas, E., & Gasca Quezada, V. (2009). Los Biocombustibles. *El Cotidiano*(157), 75-82.
- Sánchez Lario, A. (Junio de 2017). Diseño de una planta de gasificación con cogeneración para el aprovechamiento energético de la cascarilla de arroz en un proceso industrial. 180. Madrid, España. Obtenido de https://oa.upm.es/47702/1/TFG_ALEJANDRO_SANCHEZ_LARIO.pdf
- Silva, P. E. (Diciembre de 2017). Diseño de una planta de procesamiento de cascarilla de arroz para la producción de óxido de silicio amorfo y de energía eléctrica. 231. Quito, Ecuador. Obtenido de <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/19004/1/CD-8397.pdf>
- SIPA. (s.f.). *Arroz*. Obtenido de <https://sipa.agricultura.gob.ec/index.php/arroz>
- SRI. (2022). *SRI-Sección Vehicular*. Obtenido de <https://srienlinea.sri.gob.ec/sri-en-linea/SriVehiculosWeb/ConsultaValoresPagarVehiculo/Consultas/consultaRubros>
- Tipanluisa, L., Moreno, G., Guasumba, J., Celi, S., & Molina, J. (25 de 3 de 2015). Estudio experimental de la combustión de la combustión de la cascaarilla de arroz en cámara de lecho fijo. 37-43. Ecuador.
- U.S DEPARTMENT OF ENERGY. (2021). *Combined Heat and Power Technology Fact Sheet Series*. Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. Obtenido de

https://betterbuildingsolutioncenter.energy.gov/sites/default/files/attachments/Waste_Heat_to_Power_Fact_Sheet.pdf

- Unidad de Sistemas Informáticos del GAD Macará. (2022). *Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal Del Macará*. Obtenido de <https://www.municipiomacara.gob.ec/gadmacara/joomla-pages-2/menup-macara-canton>
- Urien, A. (Septiembre de 2013). OBTENCIÓN DE BIOCARBONES Y BIOCOMBUSTIBLES MEDIANTE PIRÓLISIS DE BIOMASA RESIDUAL. 83.
- Varón, C. (2005). *Diseño, construcción y puesta a punto de un prototipo de quemador para la combustión continua y ediciente de la cascarilla de arroz. El Hombre y al Máquina* (Vol. 25).
- Voces en el Fenix. ((s.f.)). *Análisis de los costos de capital (o inversión) en la generación de energía y su impacto en los mercados eléctricos de América latina*. Obtenido de <https://vocesenelfenix.economicas.uba.ar/analisis-de-los-costos-de-capital-o-inversion-en-la-generacion-de-energia-y-su-impacto-en-los-mercados-electricos-de-america-latina/>
- Wiest, W. (2004). Transformación termoquímica de la biomasa residual del proceso de extracción del aceite de palma: tecnologías y perspectivas. 25, 388-397.
- Banco Central del Ecuador. (2021). *REPORTE DE COYUNTURA SECTOR AGROPECUARIO BANCO CENTRAL DEL ECUADOR REPORTE DE COYUNTURA*. www.bce.ec
- Koo, J., Park, K., Shin, D., & Yoon, E. (2011). Economic evaluation of renewable energy systems under varying scenarios and its implications to Korea's renewable energy plan. *Applied Energy - APPL ENERG*, 88, 2254–2260. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.12.063>
- Ministerio de Trabajo. (2023). *ESTRUCTURAS OCUPACIONALES-SUELDOS Y SALARIOS MÍNIMOS SECTORIALES Y TARIFAS SALARIOS MÍNIMOS SECTORIALES 2023 ANEXO 1: ESTRUCTURAS OCUPACIONALES-SALARIOS MÍNIMOS SECTORIALES Y TARIFAS*.
- Prada, A., & Cortés, C. E. (2010). *La descomposición térmica de la cascarilla de arroz: una alternativa de aprovechamiento integral* (Vol. 14, Issue 1).
- Salazar, R. (2019). *Propuesta de generación eléctrica a partir de biomasa en la provincia de Loja - Ecuador* [Tesis de Maestría]. Universidad de Buenos Aires.

- States Department of Energy, U. (2021). *Combined Heat and Power Technology Fact Sheet Series: Waste Heat to Power*. https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-07/documents/waste_heat_to_power_systems.pdf.
- Tartière, T., & Astolfi, M. (2017). A World Overview of the Organic Rankine Cycle Market. *Energy Procedia*, 129, 2–9. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.159>

11. Anexos

Anexo 1. Pesos máximos permitidos

TIPO	DISTRIBUCIÓN MÁXIMA DE CARGA POR EJE	DESCRIPCIÓN	PESO MÁXIMO PERMITIDO (Ton.)	LONGITUDES MÁXIMAS PERMITIDAS (metros)		
				Largo	Ancho	Alto
2 D			7	5,00	2,60	3,00
2DA			10	7,50	2,60	3,50
2DB			18	12,20	2,60	4,10
3-A			27	12,20	2,60	4,10
4-C			31	12,20	2,60	4,10
4-0 octopus			32	12,20	2,60	4,10
V2DB			18	12,20	2,60	4,10
V3A			27	12,20	2,60	4,10
VZS			27	12,20	2,60	4,10
T2			18	8,50	2,60	4,10
T3			27	8,50	2,60	4,10
S3			24	13,00	2,60	4,10
S2			20	13,00	2,60	4,10
S1			11	13,00	2,60	4,10
R2			22	10,00	2,60	4,10
R3			31	10,00	2,60	4,10
B1			11	10,00	2,60	4,10
B2			20	10,00	2,60	4,10
B3			24	10,00	2,60	4,10

Fuente: (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2020)

Anexo 2. Ficha Técnica Camión Volquete GH1JMUA - 1726

MODELO	GH1JMUA – 1726
Configuración	4X2
CAPACIDADES	
Capacidad de carga eje delantero	6.500 Kg
Capacidad de carga eje posterior	10.500 Kg
Peso bruto	17.000 Kg
Peso vacío	4.940 Kg.
Capacidad de carga	12.060 Kg.
Neumáticos	12 R 22.5
MOTOR	
Tipo	Diésel turbo Intercooler
Sistema de inyección	Inyección electrónica en riel común
Norma de control de emisiones	Euro 3
Potencia máxima	260 HP @ 2.500 RPM
Torque máximo	76 KgM @ 1.500 RPM
Cilindraje	7.684 cm ³
EMBRAGUE	Monodisco seco
TRANSMISIÓN	
Transmisión / Tipo	Manual (EATON 6109)
Numero de velocidades	9 velocidades + 1 reversa
EJES	
Delantero	Tipo viga elliot "I" inversa reforzada
Trasero	Enteramente flotante reforzado
SUSPENSIÓN	
Delantera	Ballestas semielípticas con amortiguadores
Trasera	Ballestas semielípticas
Dirección	Hidráulica (Bolas recirculantes)

Fuente: Hino

Anexo 3. Tabla de salario mínimo sectorial para estibador o ayudante de piladora E2

CARGO / ACTIVIDAD	ESTRUCTURA OCUPACIONAL	COMENTARIOS / DETALLES DEL CARGO O ACTIVIDAD	CÓDIGO IESS	SALARIO MÍNIMO SECTORIAL 2023
JEFE DE DPTOS. ADMINISTRATIVOS PROPIOS DE LA INDUSTRIA	B1	PILADORAS DE ARROZ	0504153100635	472,12
JEFE DE DPTOS. TÉCNICOS PROPIOS DE LA INDUSTRIA	B1	PILADORAS DE ARROZ	0504153100636	472,12
SUPERVISORES TÉCNICOS DE: CONTROL DE CALIDAD, LABORATORIO, MANTENIMIENTO, PLANTA, PRODUCCIÓN / PROCESOS; Y, DEMÁS SECCIONES PROPIAS DE LA INDUSTRIA	B2	EN EL SECTOR DE PILADORAS DE ARROZ	0520000000066	470,99
ELECTRICISTA, MECÁNICO DE EQUIPOS ESPECIALIZADOS PROPIOS DE LA INDUSTRIA	C2	EN EL SECTOR DE PILADORAS DE ARROZ	0504153100642	467,62
OPERADOR DE SECADORAS / SILOS	C2	PILADORAS DE ARROZ	0504153100643	467,62
AYUDANTE DE ELECTRICISTA, MECÁNICO DE EQUIPOS ESPECIALIZADOS PROPIOS DE LA INDUSTRIA	D2	EN EL SECTOR DE PILADORAS DE ARROZ	0520000000043	463,13
PILADOR	D2	PILADORAS DE ARROZ	0504153100645	463,13
TRABAJADORES DE PRODUCCIÓN PROPIOS DEL SECTOR	E2	PILADORAS DE ARROZ	0504153100652	458,64
AYUDANTE DE PILADOR / ZARANDERO	E2	PILADORAS DE ARROZ	0504153100650	458,64

Fuente:(Ministerio de Trabajo, 2023)

Anexo 4. Costos referenciales de la demanda y energía. Resolución Nro. 009/2022.

PERIODO:
EMPRESAS ELÉCTRICAS:

ENERO - DICIEMBRE



AGENCIA DE REGULACION Y CONTROL
DE ENERGÍA Y RECURSOS NATURALES
NO RENOVABLES

AMBATO - AZOGUES - CNEL BOLÍVAR - CENTROSUR - COTOPAXI - NORTE - RIOBAMBA - SUR

CARGOS TARIFARIOS ÚNICOS

RANGO DE CONSUMO	DEMANDA (USD/kW-mes)	ENERGÍA (USD/kWh)	COMERCIALIZACIÓN (USD/Consumidor)	
CATEGORÍA		RESIDENCIAL		
NIVEL VOLTAJE		BAJO Y MEDIO VOLTAJE		
1-50		0,091	1,414	
51-100		0,093		
101-150		0,095		
151-200		0,097		
201-250		0,099		
251-300		0,101		
301-350		0,103		
351-500		0,105		
501-700		0,1285		
701-1000		0,1450		
1001-1500		0,1709		
1501-2500		0,2752		
2501-3500		0,4360		
Superior		0,6812		
		RESIDENCIAL TEMPORAL		
		0,1285		
CATEGORÍA		GENERAL		
NIVEL VOLTAJE		BAJO VOLTAJE SIN DEMANDA		
		COMERCIAL		
1-300		0,092	1,414	
Superior		0,103		
		E. OFICIALES, ESC. DEPORTIVOS, SERVICIO COMUNITARIO Y ABONADOS ESPECIALES		
1-300		0,082		
Superior		0,093		
		BOMBEO AGUA		
1-300		0,072		
Superior		0,083		
		BOMBEO AGUA SERVICIO PÚBLICO DE AGUA POTABLE		
1-300		0,058		
Superior		0,066		
		INDUSTRIAL ARTESANAL		
1-300		0,073		
Superior		0,089		
		ASISTENCIA SOCIAL, BENEFICIO PÚBLICO Y CULTO RELIGIOSO		
1 - 100		0,034		
101-200		0,036		
201-300		0,038		
Superior		0,063		
NIVEL VOLTAJE		BAJO VOLTAJE CON DEMANDA		
		COMERCIALES		
	4,790	0,090	1,414	
		INDUSTRIALES		
	4,790	0,080		
		ENTIDADES OFICIALES, ESCENARIOS DEPORTIVOS SERVICIO COMUNITARIO Y ABONADOS ESPECIALES		
	4,790	0,080		
		BOMBEO AGUA		
	4,790	0,070		

Resolución Nro. ARCERNNR - 009/2022 (19 de abril de 2022)



Fuente: (ARCERNNR, 2022)

Anexo 5. Vida útil aplicable para cada tecnología de generación eléctrica.

Regulación Nro. 008/2013

Tecnología	Vida Útil (años)
Fotovoltaica	25
Eólica	25
Biomasa	20
Biogás	20
Hidráulica	30

(ARCERNNR, 2023)

Anexo 6. Costo de compactadora de arroz.

Directa de Fábrica del compactador de cascarilla de arroz embolsado Prensa Hidráulica Horizontal máquina empacadora de la máquina de empacado

Cantidad de Compra: (set)	1	2+
Precio FOB de Referencia:	US\$ 15.000,00	US\$ 7.500,00

Puerto: Shanghai, China

Condiciones de Pago: L/C, T/T

Contacta Ahora

Dejar un mensaje

(Made in China, 2023)

Anexo 7. Parámetros técnicos compactadora

El modelo	Dc-5A	El ensilaje	50-80kg/bolsa
El tamaño de la bolsa	700*280*380mm	La capacidad (bolsa/hora)	Bolsa de 100-120/hora
Compatible con la alimentación	15KW-4	La capacidad (ton/hora)	6-7 toneladas/hora
cilindro hidráulico	168	El peso	2.5 ton.
La dimensión	3400*2500*2900mm		
La altura del coleccionista de material	1200mm		

(Made in China, 2023)

Anexo 8. Costos Capital de Instalación, costos de operación y mantenimiento.

Technology	Cost Characteristic	Electric Capacity for WHP Technology				
		50-500kW	500-1000 kW	1-5 MW	5-20MW	>20 MW
Steam Rankine Cycle	O&M Costs, \$/kWh	\$ 0,013	\$ 0,009	\$ 0,008	\$ 0,006	\$ 0,005
Organic Rankine Cycle	O&M Costs, \$/kWh	\$ 0,018	\$ 0,014	\$ 0,012	\$ 0,011	\$ 0,009

Fuente: (States Department of Energy, 2021)

Anexo 9. Certificado de traducción de resumen.

Loja 23 de Julio de 2024

CERTIFICADO DE TRADUCCION

EUROpeek INSTITUTO DE IDIOMAS

CERTIFICA:

Haber realizado la traducción de español a inglés del resumen del Trabajo de Titulación titulado: **"Viabilidad técnica económica del aprovechamiento energético de biomasa de cascarilla de arroz en el Cantón Macará"**. De autoría de Cristhian Alexander Cueva Rentería, portador de la cédula de identidad nro. 1105962599.

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad, facultando al interesado hacer uso del presente documento en lo que creyere conveniente.



Mg.Sc. Noralma Ordóñez Ortega
REPRESENTANTE LEGAL
EUROpeek INSTITUTO DE
IDIOMAS

R.U.C.: 1102404553001

