



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción

**“Huella de Carbono de un sistema conceptual de generación de
electricidad a partir de biomasa con captura y almacenamiento de
carbono”**

PROYECTO DE TITULACIÓN

Previo a la obtención del título de:

MAGÍSTER EN ECOEFICIENCIA INDUSTRIAL

Presentado por:

Martha Rafaela Nemer Montesdeoca

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2021

AGRADECIMIENTO

Gracias a Dios, que me ha protegido siempre y me permitió llegar a la conclusión de mi maestría, a pesar de las dificultades presentadas.

Al director de este proyecto, el Dr. Ángel Ramírez por su gran compromiso académico y al vocal, Msc. Jorge Duque por sus aportes.

Gracias a mis padres, hermanas y enamorado; por ayudarme de diferentes maneras, cuidarme y acompañarme incondicionalmente.

A Gaba Torres, mi gran amiga que ha sido parte de mis vivencias desde 2002 y me ha apoyado en todas ellas.

Finalmente gracias a la ESPOL, por ser mi espacio de aprendizaje, orgullo y alegría desde 2008.

DEDICATORIA

A Fawas y Marta; mis padres, les dedico todo mi esfuerzo. Ustedes son la definición de perseverancia, fe y amor que me ha inspirado cada día.

A Samara, Daniel, Clarisse y Fabiana; quisiera que éste proyecto les sirva de ejemplo para que no se rindan en el cumplimiento de sus anhelos y responsabilidades; por difícil que parezcan. Ustedes son poderosos y lo lograrán.

A Beto y sus hermanitos.

Los amo siempre.

TRIBUNAL DE TITULACIÓN

Ana Rivas F., Ph.D.
SUBDECANA
PRESIDENTE

Ángel Ramírez M., Ph.D.
DECANO & DIRECTOR DE
PROYECTO

Jorge Duque R., MSc.
VOCAL

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de este Proyecto de Titulación, me corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual del mismo a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

Martha Rafaela Nemer Montesdeoca

RESUMEN

Se ha realizado la conceptualización de un sistema de generación eléctrica, con capacidad de 20 MWh, y se ha determinado la huella de carbono del mismo. Se presentan las especificaciones técnicas de los equipos y procesos necesarios para llevar a cabo la operación in situ, y además los procesos para la obtención de sus insumos principales que son; combustible (eucaliptus globulus) oxígeno (>90%) y agua ablandada.

Se prevé que las instalaciones estén ubicadas en Pichincha, en donde contribuiría con un 3,5% del total de necesidad energética de la provincia. El eucalipto sería provisto de las de Cotopaxi, Imbabura y Pichincha, por facilidad geográfica y mayor concentración de suelos cosechables, que suman el 56%.

El proyecto se trata de un sistema de bioenergía con captura y almacenamiento de carbono, por lo que el combustible y el comburente ha sido seleccionados para atrapar dióxido de carbono de los gases de combustión, luego comprimirlo y acondicionarlo para finalmente inyectarlo en yacimientos de petróleo del Oriente ecuatoriano.

La eficiencia global de generación eléctrica sin considerar consumos internos de equipos, es de 31%, y 14% si se consideran todos los consumos. Los procesos que mayor demanda de electricidad tienen, son los de generación de oxígeno y el de captura y almacenamiento de carbono; con 55,54 y 42,98 % respectivamente.

Mediante la conceptualización de todos estos procesos, se logró determinar datos cuantitativos basados en experiencias previas con tecnologías similares; ya que fue imperioso obtener los valores de entradas y salidas de todos los procesos, para elaborar un análisis de ciclo de vida de la cuna a la puerta enfocado únicamente en la determinación de la huella de carbono del sistema.

Para determinar la huella de carbono, se hizo uso del software OPEN LCA y de la base de datos ECOINVENT 3.1.7; el resultado fue de $-0,62 \frac{kg CO_2}{kWh}$; con esto se demuestra que el sistema es carbono negativo como se presumió inicialmente.

En contrapunto a éste resultado, las termoeléctricas que operan con combustibles fósiles, tienen una huella de carbono en promedio de $0,83 \frac{kg CO_2}{kWh}$, lo que significaría una remoción de 75% de estas emisiones, si se pone en práctica la tecnología propuesta en éste proyecto.

Las proyecciones se han realizado para un año de operaciones y 1 kWh como unidad funcional. Con la conceptualización del sistema y los resultados obtenidos; el proyecto daría soporte al cumplimiento de los siguientes Objetivos del Desarrollo Sostenible:

- Uso de energía asequible y no contaminante.
- Industria, innovación e infraestructura.
- Ciudades y comunidades sostenibles.
- Producción y consumo responsable.
- Acción por el clima

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	I
ÍNDICE GENERAL.....	II
ABREVIATURAS.....	V
SIMBOLOGÍA.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	IX
CAPÍTULO 1.....	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 Planteamiento del problema.....	1
1.2 Justificación del problema	2
1.3 Objetivos.....	3
1.3.1 Objetivo General.....	3
1.3.2 Objetivos Específicos	3
1.4 Alcance	3
CAPÍTULO 2.....	2
MARCO TEÓRICO	2
2.1 Cambio Climático	2
2.1.1 Definición de Cambio Climático	2
2.1.2 Efecto Invernadero.....	2
2.1.3 Calentamiento Global.....	5
2.2.1 Estado de la Generación de energía en el Ecuador	5
2.2.2 Generación de Energía Renovable	6
2.3 Sistemas de Generación de energía a partir de biomasa con CAC	8
2.3.1 Biomasa Seca.....	8

2.3.2	Biomasa húmeda	9
2.3.3	Procesos Termoquímicos	9
2.3.4	Pirólisis	10
2.3.5	Central termoeléctrica con biomasa	11
2.4	Recursos de biomasa	13
2.4.1	Cultivos Energéticos	13
2.4.2	Eucaliptus Globulus	13
2.4.3	Disponibilidad del Eucaliptus Globulus en Ecuador	14
2.5	Métodos de captura de carbono	16
2.5.1	Pre-Combustión	16
2.5.2	Oxi-Combustión	17
2.5.3	Post-Combustión	17
2.6	Almacenamiento Geológico de Carbono	17
2.7	Fundamentos Teóricos de Operaciones Unitarias Involucradas	18
2.7.1	Compresión	18
2.7.2	Adsorción	18
2.7.5	Combustión	19
2.7.6	Vaporización	19
2.7.7	Condensación	19
2.8	Análisis de Ciclo de vida	20
2.9	Huella de Carbono	21
CAPÍTULO 3		2
DESCRIPCIÓN CONCEPTUAL DE LA PLANTA		2
3.1	Elección y disponibilidad de biomasa	2
3.2	Elección de tecnología de captura de carbono	24
3.3	Ubicación de la planta	25
3.4	Cálculos para diseño	25
3.4.1	Cálculos Termodinámicos	26
3.4.2	Cálculos de combustión	29
3.5	Esquema Físico de la planta	32
3.5.1	Procesamiento de biomasa para combustión	33
3.5.2	Sistema de purificación de oxígeno	35

3.5.3 Sistema de Combustión	36
3.5.4 Sistema de Generación Eléctrica	37
3.5.5 Sistema de Captura y Almacenamiento de Carbono	38
3.6 Características técnicas de equipos de consumo energético del sistema	40
CAPÍTULO 4	42
Determinación de huella de carbono del sistema	42
4.1 Análisis de ciclo de vida	42
4.1.1 Definición de objetivo y alcance	42
4.1.2 Análisis de Inventario	43
4.2 Determinación de Huella de carbono	49
4.2.1 Análisis de Contribución	49
CAPÍTULO 5	51
Resultados y Discusión	51
5.1 Resultados	51
5.2 Discusión	52
CAPÍTULO 6	54
Conclusiones y Recomendaciones	54
6.1 Conclusiones	54
6.2 Recomendaciones	55

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

.

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica de Litoral
EPA	Environmental Protection Agency
GEI	Gases de efecto invernadero
ONU	Organización de Naciones Unidas
ODS	Objetivos del Desarrollo Sostenible
BECCS	Bioenergy Systems with Carbon capture and storage
CMNUCC	CONVENCIÓN Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
CELEC	Corporación Eléctrica del Ecuador
ORC	Organic Rankine Cycle
CAC	Captura y Almacenamiento de Carbono
PSA	Adsorción Por Oscilación de Presión
ACV	Análisis de Ciclo de Vida
SHL	Modelo Caldera
HEI WESP	Modelo Precipitador electrostático
CDR	Marca Bombas
XTS	Modelo Bombas
OPEN LCA	Software libre para el Análisis de Ciclo de vida
VAN	Valor actual neto

SIMBOLOGÍA

>	Mayor a
%	Por ciento
Kg	kilogramos
CO ₂	Dióxido de Carbono
kWh	Kilo Watt hora
MWh	Mega Watt hora
MW	Mega Watt
kW	Kilo Watt
km	Kilómetro
Kg	kilogramos
CO ₂	Dióxido de Carbono
kWh	Kilo Watt hora
MWh	Mega Watt hora
MW	Mega Watt
CO	Monóxido de Carbono
H ₂	Hidrógeno Molecular
kcal	Kilo Caloría
MWh	Mega Watt hora
MW	Mega Watt
CO	Monóxido de Carbono
°C	Grados centígrados
Ha	Hectárea
TON	Tonelada
"	Pulgada
MJ	Mega Joules
kPa	Kilo Pascal
mm	milímetros
S	Entropía
h	Entalpía
W	Trabajo
P	Presión
Q	Calor
η	Eficiencia
°K	Grados Kelvin
kJ	kilo Joules
m ³	Metros cúbicos
TON	Toneladas
s	Segundos
g	Gas
v	Vapor
w	Agua
O ₂	Oxígeno molecular

N_2	Nitrógeno molecular
Kmol	Kilomol
\dot{m}	Flujo Másico
m	Metros
mm	milímetros
min	Minutos
PSI	Unidad de Presión
m ²	Metros cuadrados
GPM	Galones por minuto
RPM	Revoluciones por minuto
MPa	Mega Pascal
BAR	Unidad de Presión
E	Energía
Σ	Sumatoria
m ²	Metros cuadrados
GPM	Galones por minuto
RPM	Revoluciones por minuto

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Clasificación de la biomasa según porcentaje de humedad.....	9
Figura 2.2: Gasificación y sus productos.	10
Figura 2.3: Pirólisis y sus productos	11
Figura 2.4: Esquema de una central termoeléctrica con biomasa.....	11
Figura 2.5: Aspectos a considerar en el ciclo de vida de la generación de energía con biomasa.	12
Figura 2.6: Fotografía de un árbol de Eucalipto	14
<i>Figura 2.7: Almacenamiento geológico de CO₂.</i>	<i>18</i>
Figura 3.1: Esquema de ciclo Rankine simple.....	27
Figura 3.2: Fronteras del sistema de combustión en caldera.....	29
Figura3.3: Esquema de entradas y salidas del horno de caldera.....	31
Figura3.4: Diagrama de Flujo sistema conceptualizado.	32
Figura 3.5: Pasos del procesamiento de biomasa para combustión	33
Figura 3.6: Diagrama de flujo de proceso de generación de oxígeno para combustión.	35
Figura 3.7: Diagrama de flujo de proceso de captura y almacenamiento de carbono. .	39
Figura 4.1: Esquema de entradas y salidas del sistema estudiado.....	44
Figura 4.2: Contribución Porcentual de huella de carbono por proceso.....	50

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Potencia Efectiva y Potencia Nominal a nivel nacional	6
Tabla 2: Potencia de centrales de generación con fuentes de energía renovable	7
Tabla 3: Cultivos de Biomasa adecuados para áreas marginales:	14
Tabla 4: Provincias productoras de Eucalipto y el área disponible	15
Tabla 5: Energía Disponible por especie de árbol.	23
Tabla 6: Cantidad de hectáreas disponibles para plantar eucalipto globulus por provincias del Ecuador.....	24
Tabla 7: Características de métodos de captura de carbono en sistemas de combustión	25
Tabla 8: Características Iniciales de diseño conceptual.	26
Tabla 9: Características termodinámicas de ciclo Rankine estudiado.....	28
Tabla 10: Características elementales de eucalipto globulus.	30
Tabla 11: Flujos de entrada y salida de la caldera.....	31
Tabla 12: Datos cuantitativos de biomasa a procesar.....	34
Tabla 13: Especificaciones técnicas equipos de los procesos del sistema.	40
Tabla 14: Entradas y Salidas de proceso de astillaje y trituración de biomasa.....	45
Tabla 15: Entradas y salidas de proceso de tratamiento de agua para caldera.	46
Tabla 16: Entradas y Salidas de proceso de generación de oxígeno.....	46
Tabla 17: Entradas y salidas de proceso de generación de vapor.	47
Tabla 18: Entradas y Salidas de proceso de generación de energía eléctrica.	48
Tabla 19: Entradas y salidas de proceso de almacenamiento y captura de carbono.	48
Tabla 20: Resultados de huella de carbono por procesos del sistema.	49
Tabla 21: Resultados del estudio.....	51
Tabla 22: Contribución porcentual de consumo energético por proceso.	52
Tabla 23: Huella de carbono por tipo de tecnología de generación eléctrica en el Ecuador.	53

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del problema

Desde la década del 70 el término cambio climático empezó a discutirse en la comunidad científica, se consensó en que las actividades humanas para potenciar las actividades modernas y sus emisiones de gases de efecto invernadero, son los causantes del calentamiento global. (National Geographic, 2017)

En muchas regiones del planeta, se están sufriendo las consecuencias catastróficas del cambio climático; entre ellas las sequías, tormentas tropicales, incendios forestales, olas de calor, entre otros acontecimientos que se registran localmente. Por lo que se hace imperioso la sustitución de los combustibles fósiles no renovables, por otras fuentes de energía alternativas que sean menos contaminantes y de alta disponibilidad.

Según la (EPA, 2019); en su inventario de emisiones de gases de efecto invernadero realizado desde 1990 hasta 2019; en ése último año de la totalidad de GEI generados en los Estados Unidos, un 80% correspondió a generación de dióxido de carbono y el otro 20% se reparte entre metano, óxidos de nitrógeno y gases fluorados. En cuanto a las fuentes de contribución para el mismo año 2019, el 25% se le atribuye a la generación eléctrica del país del Norte, porcentaje únicamente superado por el sector de la transportación con un 29%. Dada su vital importancia como insumo y como generador de contaminación, se debe prestar atención a formas alternativas de generación eléctrica, que mitiguen o anulen el impacto negativo sobre el medio ambiente.

En Septiembre de 2015, varios de los líderes mundiales, se acogieron a un conjunto de objetivos con el fin de erradicar la pobreza, asegurar la prosperidad para toda la población y salvaguardar al planeta; estos son los 17 objetivos de desarrollo sostenible (Naciones Unidas, 2019); varios organismos; públicos, privados, académicos, gubernamentales; a nivel mundial están implementando los ODS, como medidores de desempeño de sus actividades para contribuir al bien común y también como ventaja competitiva.

En el contexto nacional, según el estudio proyectivo de Ramírez et al. (2020); para el período de 2020 a 2050 se contemplan los 3 escenarios de generación eléctrica en el Ecuador; como siguen: continuidad en las tecnologías de generación actual, aumento de la participación de hidroeléctricas y mejoras en las tecnologías de generación con gas natural y otros combustibles fósiles. Los resultados muestran que aunque estos escenarios presenten disminución en los impactos ambientales estudiados, la demanda de electricidad en el país va a aumentar de manera tal, que dichas disminuciones resultarán insignificantes.

Es así que es necesario incluir en los escenarios futuros otras formas de obtención de energía eléctrica, como la biomasa forestal y conocer su balance de emisiones de gases de efecto invernadero. Por lo que se requiere generar información de las características principales de una planta de ésta tecnología; esto incluye su ubicación, las implicaciones de la cercanía o

lejanía del suministro de biomasa y de la población a la que se dotará del insumo energético, tipo de biomasa que se utilizará, entre otros aspectos ingenieriles.

1.2 Justificación del problema

Según datos del Atlas 2018 de energía eléctrica de Arconel (última actualización) En el Ecuador la generación de energía eléctrica de fuentes renovables corresponde a un 60.57% repartido entre los recursos hidráulico, fotovoltaico, eólico, biogás y biomasa; éste último con un 2.74% del total. El 39.24% restante, corresponde a centrales que operan con fuentes no renovables que contribuyen al calentamiento global, mediante la generación de gases de efecto invernadero. (Electricidad, 2018)

A pesar de que en el Ecuador el desarrollo de energía hidroeléctrica está muy bien posesionado, la demanda de la energía va en aumento; con ello y en caso de seguir utilizando las fuentes actuales, para 2050 en el Ecuador el potencial de calentamiento global, sería de 12 a 20 veces mayor que lo que fue en 2016. (Ramirez et al., 2020).

Por éste motivo, se propone otro tipo de energía renovable, como parte de las líneas de investigación del Laboratorio de Ingeniería Sostenible y Economía Circular. En particular la generación de electricidad a partir de biomasa con sistemas de captura de carbono.

Se conceptualizará una planta de generación eléctrica cuya fuente de energía sea la biomasa, y que el dióxido de carbono generado, principal gas de efecto invernadero sea capturado e inyectado a la tierra. Así se lograría un sistema carbono negativo, ya que el CO_2 disponible de la biomasa para generar energía, es el que se ha extraído de la atmósfera durante su crecimiento.

A pesar de que en el Ecuador existe gran cantidad de extensión de área disponible para plantaciones de biomasa destinada a distintos fines, sólo el 1.66% de la totalidad de generación de energía eléctrica corresponde a biomasa. En los ingenios azucareros, utilizan bagazo de caña de azúcar como combustible, que es un tipo de biomasa agrícola, para consumo interno de energía; más no existe una planta de generación que suministre a sectores mayores.

Según la bibliografía revisada, los sistemas de bioenergía con captura y secuestro de carbono (BECCS por sus siglas en inglés) tienen un potencial energético global de 100 Exajoules por año, valor prometedor para sustituir paulatinamente a combustibles fósiles, sin embargo, frente a ello se debe estudiar tópicos como soberanía alimentaria, costos de almacenamiento de CO_2 , madurez tecnológica, impactos ambientales de la operación. (Kemper, 2015)

Los desafíos de implementar sistemas BECCS son elevados, sin embargo las ambiciones climáticas globales que conllevan procesos eficientes de captura y almacenamiento de carbono son el aliciente para su estudio conceptual en países en vías de desarrollo y la implementación paulatina en países desarrollados. (Fajardy, 2018)

En el marco del cumplimiento de los objetivos del desarrollo sostenible, el presente proyecto daría soporte al cumplimiento de 5 de estos:

- Uso de energía asequible y no contaminante.
- Industria, innovación e infraestructura.
- Ciudades y comunidades sostenibles.
- Producción y consumo responsable.
- Acción por el clima.

Es de notar que aun cuando la tecnología de BECCS parece ser prometedora como una fuente de energía de base carbono negativa, existen interrogantes al respecto al balance de emisiones de gases de efecto invernadero de ésta.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Cuantificar las emisiones de gases de efecto invernadero en el ciclo de vida de un sistema conceptual de generación de electricidad a partir de biomasa con captura de carbono en Ecuador.

1.3.2 Objetivos Específicos

- i. Realizar un diseño conceptual de un sistema de generación de electricidad a partir de biomasa con captura de carbono.
- ii. Determinar la eficiencia energética global del sistema.
- iii. Cuantificar entradas y salidas ambientalmente relevantes, del sistema propuesto.

1.4 Alcance

Se prevé realizar el diseño conceptual de las operaciones unitarias, sistemas auxiliares para la generación de energía eléctrica mediante el uso de biomasa, agua blanda y oxígeno de pureza >90%, como insumos principales.

Consiguientemente se realizará una descripción de las etapas del ciclo de vida del sistema conceptualizado; todos estos datos llevados a la unidad funcional de 1 MWh y tomando como límite temporal un año de 296 días laborales.

Adicionalmente se determinará cuantitativamente la huella de carbono mediante el uso del software OPEN LCA.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 Cambio Climático

2.1.1 Definición de Cambio Climático

Variación del estado del clima identificable (por ejemplo, mediante pruebas estadísticas) en las variaciones del valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante largos períodos de tiempo, generalmente decenios o períodos más largos.

El cambio climático puede deberse a procesos internos naturales o a forzamientos externos tales como modulaciones de los ciclos solares, erupciones volcánicas o cambios persistentes de la composición de la atmósfera o del uso del suelo.

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), en su artículo 1, define el cambio climático como “cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables”. La CMNUCC diferencia, pues, entre el cambio climático atribuible a las actividades humanas que alteran la composición atmosférica y la variabilidad climática atribuible a causas naturales. (IPCC, 2013)

2.1.2 Efecto Invernadero

Efecto radiactivo infrarrojo de todos los componentes de la atmósfera que absorben en el infrarrojo. Los gases de efecto invernadero y las nubes y, en menor medida, los aerosoles absorben la radiación terrestre emitida por la superficie de la Tierra y por cualquier punto de la atmósfera. Esas sustancias emiten radiación infrarroja en todas las direcciones, pero, a igualdad de condiciones, la cantidad neta de energía emitida al espacio es generalmente menor de la que se habría emitido en ausencia de esos absorbedores debido a la disminución de la temperatura con la altitud en la troposfera y el consiguiente debilitamiento de la emisión. Una mayor concentración de gases de efecto invernadero aumenta la magnitud de este efecto, y la diferencia generalmente se denomina efecto invernadero intensificado. La modificación de la concentración de los gases de efecto invernadero debida a emisiones antropógenas contribuye a un aumento de la temperatura en la superficie y en la troposfera inducido por un forzamiento radiactivo instantáneo en respuesta a ese forzamiento, que gradualmente restablece el balance radiactivo en la parte superior de la atmósfera. (IPCC, 2013)

2.1.3 Calentamiento Global

El calentamiento global se refiere al aumento gradual de la temperatura de la tierra (incluyendo la atmósfera y los océanos). Esto, como resultado del incremento de gases de efectos invernadero que se caracterizan por retener el calor. (Roldán, 2017)

2.2 Generación Eléctrica en Ecuador

En sus inicios la generación eléctrica en el Ecuador, comenzó con proyectos pequeños, de poca potencia llegando a tener 1200 centrales eléctricas y una capacidad de 120 MW. En la década de los años 60, se promulgó la Ley Básica de Electrificación y se dio una responsabilidad primaria al Estado en cuanto a la generación de energía, con esto en el año 1966 se establecieron empresas eléctricas regionales en conjunto con el Sistema Nacional Interconectado, éste formado por 1300 km de redes de transmisión a 138 kV con 25 subestaciones.

En la red se conectan 18 empresas distribuidoras mediante un sistema de subtransmisión de 3200 KW. Estas empresas disponen de 23000 km de redes primarias de distribución.

Aproximadamente el 65% de la electricidad mundial se genera a partir de combustibles fósiles, el 10% utiliza energía nuclear, y el resto proviene de fuentes renovables.

La hidroelectricidad, siendo una tecnología madura, es la principal fuente de energía renovable para la generación de electricidad. Suministra más de 60% de la electricidad renovable total y aproximadamente 16% de la electricidad global cuando se contabilizan todas las fuentes.

A partir de la década de los 80, se esperaba que la mayor parte del crecimiento de la generación hidroeléctrica ocurriera en los países en desarrollo. (Ramírez, 2020)

En 2018, la potencia nominal a nivel nacional fue 8676,89 MW; de los cuales, 5271,74 MW (60,75 %) corresponden a centrales con fuentes de energía renovable y 3405,14 MW (39,24 %) a centrales con fuentes de energía no renovable.

2.2.1 Estado de la Generación de energía en el Ecuador

Como se mencionó anteriormente en el año 2018, se registró la capacidad de generación nacional en 8676,89 MW de potencia nominal y 8062,58 MW de potencia efectiva, en la Tabla 1, se incluyen las generadoras, autogeneradoras y distribuidoras con generación.

Tabla 1: Potencia Efectiva y Potencia Nominal a nivel nacional

Tipo de Fuente	Tipo de Central	Tipo de Unidad	Potencia Nominal (MW)	Potencia Efectiva (MW)
No Renovable	Térmica	MCI	2011,44	1613,60
		Turbogás	921,85	775,55
		Turbovapor	461,87	431,74
Total No Renovable			3395,15	2820,89
Renovable	Hidráulica	Hidráulica	5066,40	5036,43
	Biomasa	Turbovapor	144,30	136,40
	Fotovoltaica	Fotovoltaica	27,63	26,74
	Eólica	Eólica	21,15	21,15
	Biogás	MCI	7,26	6,50
Total Renovable			5266,74	5227,22
Total general			8661,90	8048,11

Fuente: Parra; 2020

2.2.2 Generación de Energía Renovable

Las fuentes de energía renovable que aprovechó el país para la generación de electricidad en 2018 fueron: **hidráulica, biomasa, fotovoltaica, eólica y biogás**. La capacidad instalada de las centrales hidroeléctricas destaca mayoritariamente (96,2 %) entre las de tipo renovable.

La Tabla 2, muestra la potencia nominal y efectiva de centrales de generación con fuentes de energía renovable por provincia. Azuay presenta la mayor concentración de potencia nominal, conformada principalmente por los 1.075 MW de la central hidroeléctrica Paute de CELEC EP Unidad de Negocio Hidropaute. En segundo lugar, se encuentra Napo, con el aporte de 1.500 MW de la central Coca Codo Sinclair de CELEC EP Unidad de Negocio Coca Codo Sinclair. (Electricidad, 2018)

Tabla 2: Potencia de centrales de generación con fuentes de energía renovable

Tipo de Central	Provincia	Potencia Nominal (MW)	Potencia Efectiva (MW)
Biogás	Azuay	1,06	1,00
	Pichincha	6,20	5,5
Total Biogás		7,26	6,50
Biomasa	Cañar	29,8	27,6
	Guayas	114,5	108,8
Total Biomasa		144,3	136,40
Eólica	Galápagos	4,65	4,65
	Loja	16,50	16,50
Total Eólica		21,15	21,15
Fotovoltaica	Cotopaxi	2,00	2,00
	El Oro	5,99	5,99
	Galápagos	2,60	2,60
	Guayas	3,98	3,98
	Imbabura	4,00	3,99
	Loja	5,99	5,12
	Manabí	1,50	1,49
	Morona Santiago	0,37	0,37
	Pastaza	0,20	0,20
	Pichincha	1,00	1,00
Total Fotovoltaica		27,63	26,74
Hidráulica	Azuay	2.042,49	2067,39
	Bolívar	8,00	8,00
	Cañar	32,33	32,33
	Carchi	4,82	4,15
	Chimborazo	16,33	15,65
	Cotopaxi	47,39	45,27
	Guayas	213,00	213,00
	Imbabura	75,45	76,61
	Los Ríos	57,57	56,20
	Morona Santiago	138,01	137,52
	Napo	1557,50	1532,65
	Pichincha	146,10	144,60
	Sucumbíos	49,71	49,71
	Tungurahua	495,30	470,96
	Zamora Chinchipe	182,40	182,40
Total Hidráulica		5066,40	5036,43
Total General		5266,74	5227,22

Fuente: Parra;2020

2.3 Sistemas de Generación de energía a partir de biomasa con CAC

La biomasa, tal y como se define en la Especificación Técnica Europea CEN/TS 14588, puede ser catalogada como “todo material de origen biológico excluyendo aquellos que han sido englobados en formaciones geológicas sufriendo un proceso de mineralización”. (Eseficiencia, 2012)

También la biomasa es referida principalmente a la energía solar convertida por la vegetación en más vegetación o materia orgánica y posteriormente dicha materia orgánica puede ser convertida en diferentes tipos de energía, acorde al uso que se le quiera dar. En el contexto energético, el término biomasa se emplea para denominar a una fuente de energía renovable basada en la utilización de la materia orgánica formada por vía biológica o de los productos derivados de ésta. (Fernández, 2003)

Si se hace un enfoque en el aprovechamiento energético, la biomasa se destaca por su bajo contenido de carbono, un alto contenido de oxígeno y compuestos volátiles. Estos compuestos volátiles con los que concentran en gran parte el poder calorífico de la biomasa (al estar formados por cadenas tipo C_nH_m y presencia de CO_2 , CO e H_2), sin embargo, el poder calorífico de la biomasa depende en gran medida del tipo de biomasa y de la humedad, por lo que los valores de poder calorífico de la biomasa se pueden dar en base seca o base húmeda.

Generalmente se estima que el poder calorífico de la biomasa fluctúa entre los 3000 – 3500 kcal/kg para los residuos ligno - celulósicos, los 2000 – 2500 kcal/kg para los residuos urbanos y finalmente las 10000 kcal/kg para los combustibles líquidos provenientes de cultivos energéticos. Estas características, juntamente con el bajo contenido de azufre de la biomasa, la convierten en un producto especialmente atractivo para ser aprovechado energéticamente. (Secretaría de energía de Argentina , 2008)

Se resalta en gran medida que, ambientalmente hablando, la generación de energía a partir de biomasa, no contribuye al aumento de los gases de efecto invernadero, puesto que el balance de CO_2 a la atmósfera es neutro. Gracias a la fotosíntesis de las plantas, el CO_2 es reabsorbido por lo que la carga es neutra, lo contrario de combustibles fósiles, el carbono producido es el que está fijo a la tierra hace millones de años.

En la Figura 2.1, se muestra la clasificación de la biomasa en dos grandes grupos, dependiendo del porcentaje presente de humedad.

2.3.1 Biomasa Seca

La biomasa que pueda ser obtenida con un valor de humedad menor al 60%, como la leña, paja, etc. Este tipo, es de mayor utilidad energética mediante procesos TERMOQUÍMICOS O FISÍCOQUÍMICOS, que producen directamente energía térmica o productos secundarios en la forma de combustibles sólidos, líquidos o gaseosos.

2.3.2 Biomasa húmeda

Se denomina así cuando el porcentaje de humedad supera el 60%, como por ejemplo en los restantes vegetales, residuos animales, vegetación acuática, etc. Resulta especialmente adecuada para su tratamiento mediante

PROCESOS QUÍMICOS, o en algunos casos particulares, mediante simples PROCESOS FÍSICOS, obteniéndose combustibles líquidos y gaseosos.

Hay que aclarar que esta clasificación es totalmente arbitraria, pero ayuda a visualizar mejor la siguiente caracterización de los procesos de conversión.

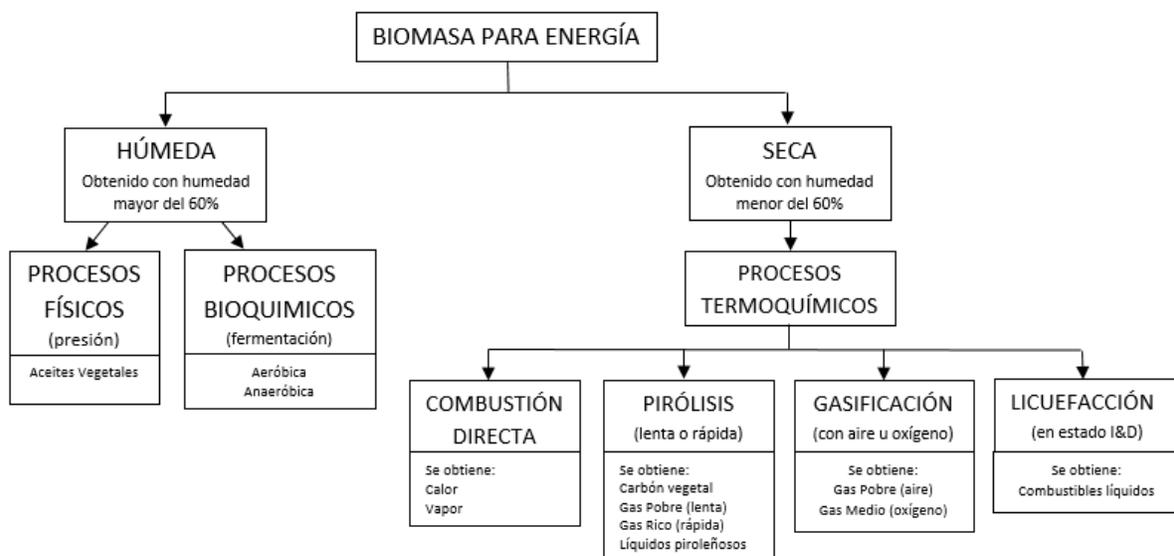


Figura 2.1: Clasificación de la biomasa según porcentaje de humedad.
Fuente: Elaboración Propia; 2021

2.3.3 Procesos Termoquímicos

Se clasifican en Combustión, gasificación y pirolisis, existe además la licuefacción directa en etapa de desarrollo. Ver Figura 2.1.

La combustión tradicionalmente ha sido el mayor método utilizado debido a la sencillez del proceso. Permite obtener energía térmica ya sea desde usos domésticos o industriales

Es el más sencillo y más ampliamente utilizado, tanto en el pasado como en el presente. Permite obtener energía térmica, ya sea para usos domésticos (cocción, calefacción) o

industriales (calor de proceso, vapor mediante una caldera, energía mecánica utilizando el vapor de una máquina).

La quema de la biomasa en este proceso se desarrolla en presencia de oxígeno, de forma controlada con el objetivo de producir un gas combustible denominado “gas pobre” por su bajo contenido calórico.

El proceso de gasificación se realiza en un gasógeno, que es un recipiente cerrado, en el cual se introduce combustible y una cantidad de aire menor a la que se requeriría para su combustión completa.

El gas obtenido puede utilizarse en un quemador para obtener energía térmica, en una caldera para producir vapor o ser enfriado y acondicionado en un motor de combustión interna.

Ver Figura 2.2, donde se clasifican los procesos de gasificación

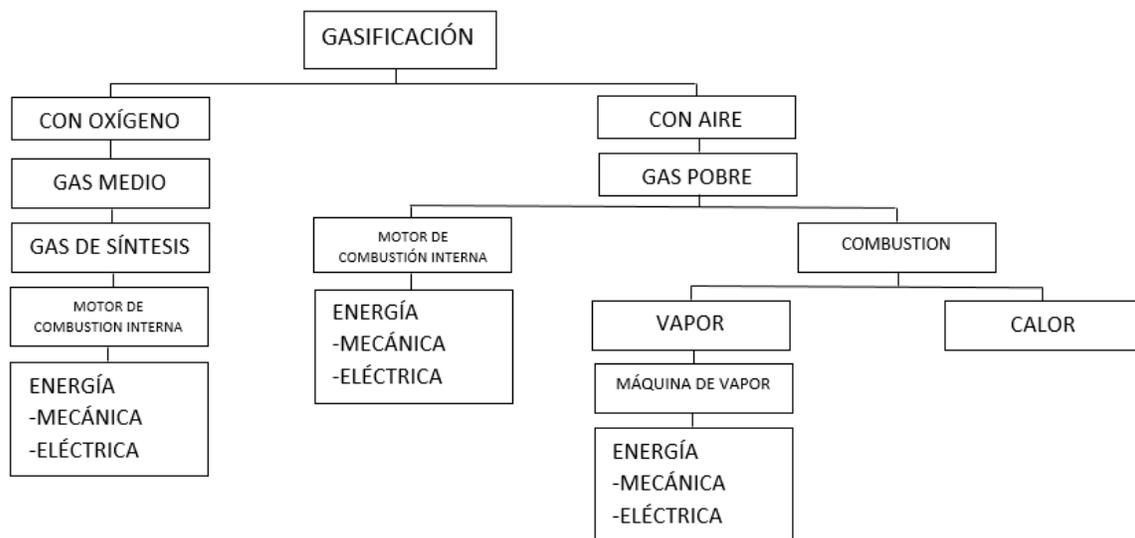


Figura 2.2: Gasificación y sus productos. Fuente: Elaboración propia; 2021

2.3.4 Pirólisis

A manera similar de la Gasificación, en la pirólisis se realiza una oxigenación parcial y controlada de la biomasa, con el fin de obtener una combinación variable de combustibles sólidos (carbón vegetal), líquidos (efluentes piroleñosos) y gaseosos (gas pobre).

El producto principal de la pirólisis es el carbón vegetal, por lo que se considera a los líquidos y gases como subproductos del proceso.

El carbón vegetal como combustible sólido presenta la ventaja frente a la biomasa que le dio origen, de tener un poder calórico mayor o, lo que es lo mismo, un peso menor para igual

cantidad de energía, lo que permite un transporte más fácil. No obstante, debe hacerse notar que la carbonización representa una pérdida muy importante de la energía presente en la materia prima, ya que en el proceso consume gran cantidad de ella. (Secretaría de energía de Argentina , 2008)

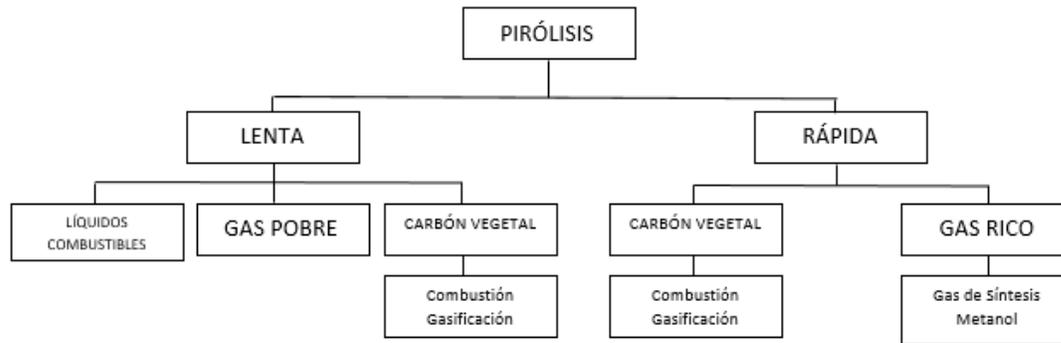


Figura 2.3: Pirólisis y sus productos. Fuente: Elaboración propia

2.3.5 Central termoeléctrica con biomasa

Una de las tecnologías para generar vapor mediante biomasa es la de ORC (Organic Rankine Cycle) que se basa en un desarrollo a largo plazo con el fin de utilizar eficientemente la energía solar, energía geotérmica, así como la energía a partir de biomasa en las unidades descentralizadas. El principio de la generación de electricidad por medio de un proceso ORC se corresponde con el proceso de Rankine convencional. La diferencia sustancial es que se utiliza un medio orgánico de trabajo (tales como hidrocarburos iso - pentano, iso-octano, tolueno o aceite de silicona) con propiedades termodinámicas favorables a temperaturas y presiones más bajas en lugar de agua - de ahí el nombre de ciclo de Rankine orgánico (ORC). La elección correcta del medio de trabajo orgánico utilizado es muy importante para un funcionamiento optimizado del proceso. Algunas veces es necesario combinar la biomasa con otro combustible para potenciar su poder calorífico. El aceite de silicio es uno de los fluidos de trabajo más adecuados. (Ostargi, 2021)

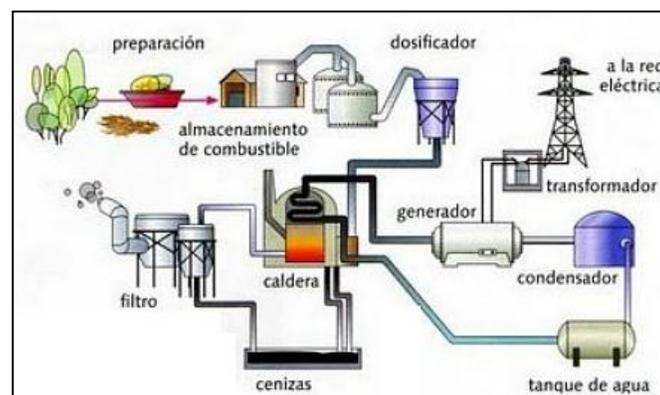


Figura 2.4: Esquema de una central termoeléctrica con biomasa. Fuente: Ostargi; 2021.

Sin embargo, a pesar de considerarse que la generación de electricidad a partir del uso de biomasa como fuente de energía no posee huella de carbono, esto no es del todo cierto ya que si bien, el CO_2 expulsado al ambiente es utilizado por los cultivos al desarrollar la fotosíntesis, la gran parte de emisiones de gases de efecto invernadero son producidas indirectamente en el proceso como los mencionados a continuación.

- La producción de los fertilizantes empleados en los cultivos energéticos.
- La producción de los fertilizantes empleados en los cultivos energéticos.
- La cosecha de los productos agrícolas y la explotación forestal.
- El secado y el transporte de la biomasa.

Hay que considerar que los combustibles procedentes de la biomasa tienen menos densidad y poder calorífico que los combustibles fósiles por ende es necesario cultivar y recoger grandes cantidades de biomasa para disponer de suficiente combustible para este tipo de centrales. El transporte de estas grandes cantidades de biomasa aumenta las emisiones de CO_2 a considerar en el ciclo de vida.

Para tener una visión general, se resume en la Figura 2.5, el ciclo de vida de la operación de una central de biomasa, en el que no contemplamos la fase de construcción de la propia central.

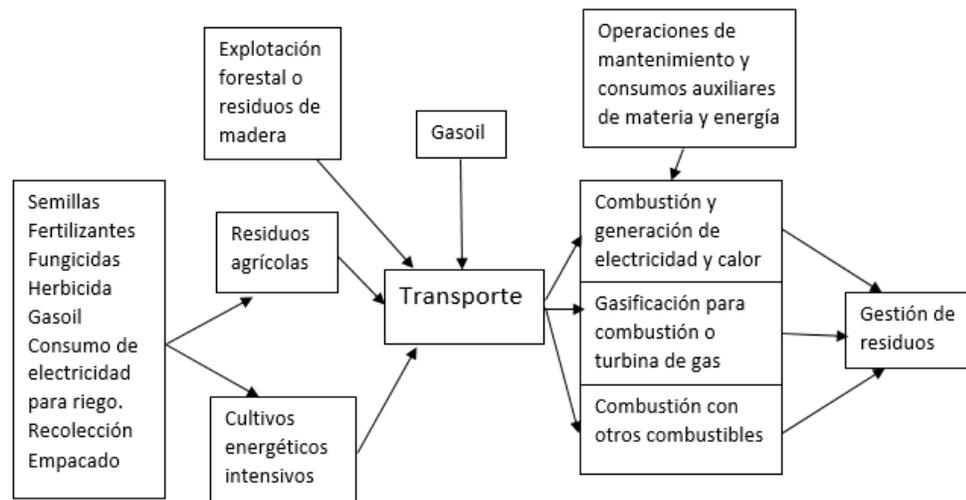


Figura 2.5: Aspectos a considerar en el ciclo de vida de la generación de energía con biomasa. Fuente: Elaboración Propia; 2021.

Con la finalidad de que la huella de carbono sea amigable con el ambiente, existen tecnologías que permiten la captura del carbono antes de que éste sea expulsado.

Captura y almacenamiento de carbono

La bioenergía con captura y almacenamiento de carbono (BECCS) es una técnica de eliminación de carbono que depende de dos tecnologías. La biomasa (material orgánico) se

convierte en calor, electricidad o combustibles líquidos o gaseosos (el paso de "bioenergía"), y las emisiones de carbono de esta conversión de bioenergía se capturan y almacenan en formaciones geológicas o se integran en productos duraderos (el "captura y almacenamiento de carbono" paso).

Debido a que la biomasa extrae carbono de la atmósfera a medida que crece, BECCS puede ser una tecnología de emisiones negativas cuando es implementada. Es decir, BECCS podría servir para reducir la concentración de dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera. Sin embargo, se debe tener cuidado para garantizar que las emisiones del cultivo, la recolección, el transporte y el procesamiento de la biomasa no superen el carbono capturado, y que el almacenamiento del carbono capturado sea confiable durante períodos de tiempo prolongados.

2.4 Recursos de biomasa

2.4.1 Cultivos Energéticos

Se denominan cultivos energéticos a aquellos que son sembrados con el objetivo específico de producir materia energética, entre estos se tienen plantaciones de caña de azúcar o remolacha azucarera para la obtención de alcohol combustible o una plantación de girasol para la obtención de aceite vegetal combustible.

Aquí se presenta una competencia directa entre la producción de alimentos y de energía, dado que las tierras a utilizar en un cultivo energético deben ser de calidad análoga a las agrícolas. De todos modos, a nivel local puede existir una conveniencia en la implantación de este tipo de cultivos. El proceso a emplear para la producción de energía, depende fundamentalmente del cultivo de que se trate. (Secretaría de energía de Argentina , 2008)

2.4.2 Eucaliptus Globulus

Eucalipto, *Eucalyptus globulus*, familia Myrtaceae, es un candidato principal para plantaciones de biomasa. Crece rápidamente, supuestamente acumulando 40 toneladas métricas de materia seca por hectárea por año una amplia gama de sitios en lugares tropicales. El material cosechado es en su mayoría herbáceas, con sólo 24% a 33% de peso seco. Los eucaliptos son relativamente profundamente arraigados y podría obtener agua y nutrientes por debajo de las profundidades alcanzadas por la mayoría cultivos herbáceos perennes. (Parra, 2020)



Figura 2.6: Fotografía de un árbol de Eucalipto. Fuente: Parra 2020.

Según la Tabla 3, el eucalipto, en comparación con otras opciones de cultivos disponibles en el Ecuador es el mejor, por cumplir con las características necesarias para la generación de energía. (Parra, 2020)

Tabla 3: Cultivos de Biomasa adecuados para áreas marginales:

Cultivos	Adecuado para clima tropical y subtropical	Bajo contenido de Humedad	Rendimiento (t/ha/año) DM	Poder calorífico bruto (MJ/kg) DB	Potencial energético bruto (GJ/Ha.year)
Eucalipto (<i>Eucalyptus globulus</i>)	x	x	22,0	18,0	396,0
Álamo (<i>populus tremula</i>)		x	4,30	19,13	82,27
Sauce (<i>Salix spp.</i>)		x	7,80	19,33	15,77
Pino (<i>Pinus Patula</i>)	x	x	17,0	19,30	330,03

Fuente: Parra; 2021

2.4.3 Disponibilidad del Eucalyptus Globulus en Ecuador

De acuerdo a los resultados de la zonificación agroecológica, existe la disponibilidad de 39.550,53 hectáreas en Ecuador para producir eucalipto. (Tabla 4)

Los requisitos agroecológicos para el cultivo de eucalipto son: suelos con pendientes que van del 0% al 25%, franco arenoso, franco, franco limoso, franco arcilloso-arenoso, franco arcilloso, franco arcillo limoso, arcillo-arenoso, arcillo-limoso, arcilloso, texturas, profundidad moderada a profunda, pocos pedregosos a cálculos frecuentes, buen drenaje a moderado, no salino, ácido a pH neutro; y temperaturas que oscilan entre 10,8 y 18 ° C, con precipitaciones medias anuales de 500 a 1500 mm. (Parra, 2020)

La provincia de Pichincha tiene la mayor superficie disponible con 10.804,46 ha en Pichincha, Mejía, Cantones Pedro Moncayo y Cayambe. Los siguientes cultivos y vegetación son representantes del uso del suelo de estos cantones: vegetación herbácea seca muy alterada, bosque húmedo medianamente alterado, matorral seco medianamente alterado, pino, flores andinas de verano, cereales varios, maíz, pastos cultivados con presencia de maíz, medio alterado matorral húmedo, matorral húmedo muy alterado, pastos cultivados, eucalipto, ciclo corto varios y rosas. (Parra, 2020)

Cotopaxi con 13.148,68 hectáreas es la segunda provincia más grande con disponibilidad de tierra para el cultivo. Los principales cantones son Latacunga, Pujilí, Salcedo, Saquisilí y Sigchos. En estos cantones, el uso de suelo predominante es herbáceo seco medianamente alterado, vegetación herbácea húmeda medianamente alterada, herbácea húmeda muy alterada vegetación, matorral húmedo medianamente alterado, pastos cultivados, pinos, rosales, ciclo corto misceláneos, maíz, eucalipto, maíz y pastos cultivados. (Parra, 2020)

La tercera provincia con mayor superficie disponible para el cultivo es Azuay, con 5.297,75 ha en Cuenca, cantones Girón, Gualaceo, Paute, Chordeleg, El Pan y Guachapala, en los que la corriente 100 el uso de la tierra es: páramo arbustivo medianamente alterado, bosque húmedo medianamente alterado, muy alterado bosque húmedo, maíz, pino, flores andinas de verano, herbácea húmeda muy alterada, vegetación herbácea húmeda medianamente alterada, eucalipto, severamente alterada matorral húmedo, cultivo misceláneo de maíz, pastos cultivados, húmedo medio alterado maleza. (Parra, 2020)

Esta vegetación es característica de climas fríos y templados, escasas precipitaciones y amplios rangos de suelo. Estas áreas están presentes principalmente en la cordillera interandina. (Parra, 2020)

Tabla 4: Provincias productoras de Eucalipto y el área disponible

Provincia	Área Óptima (Ha)
Azuay	5.297,75
Bolívar	856,26
Cañar	1.531,19
Carchi	647,76
Chimborazo	3.393,71
El Oro	210,21
Imbabura	4.794,79
Loja	1.211,44
Morona Santiago	47,32
Napo	27,49
Pichincha	10.804,4
Tungurahua	1.153,34
Zamora Chinchipe	3.132,47
Total	39.550,53

Fuente: Parra; 2020

2.5 Métodos de captura de carbono

La captación y el almacenamiento de dióxido de carbono (CAC) constituyen un proceso consistente en la separación del CO_2 emitido por la industria y fuentes relacionadas con la energía, su transporte a un lugar de almacenamiento y su aislamiento de la atmósfera a largo plazo, se considera la CAC como una de las opciones de la cartera de medidas de mitigación para la estabilización de las concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero.

La finalidad de la captación de CO_2 es producir un flujo concentrado de CO_2 a alta presión que pueda ser fácilmente transportado a un lugar de almacenamiento. Si bien, en principio, la totalidad del flujo de gas con bajas concentraciones de CO_2 podría ser transportada e inyectada bajo tierra, por lo general, los costos de la energía y otros gastos conexos hacen que este método sea poco práctico. Por tanto, es preciso producir un flujo casi puro de CO_2 para su transporte y almacenamiento. (IPCC, 2005)

Los posibles métodos técnicos de almacenamiento son los siguientes:

- **Almacenamiento geológico** (en formaciones geológicas, como los yacimientos de petróleo y gas, las capas de carbón inexplotables y las formaciones salinas profundas)
- **Almacenamiento oceánico** (liberación directa en la columna de agua oceánica o en el fondo oceánico) y la
- **Fijación industrial** de CO_2 en carbonatos inorgánicos.

Dependiendo del proceso o la aplicación de la central eléctrica de que se trate, hay tres métodos principales para captar el CO_2 generado por un combustible fósil primario (carbón, gas natural o petróleo), por la biomasa o por una mezcla de estos combustibles.

2.5.1 Pre-Combustión

Los sistemas de captación previa a la combustión procesan el combustible primario en un reactor con vapor y aire u oxígeno para producir una mezcla que consiste, principalmente, en monóxido de carbono e hidrógeno (“gas de síntesis”). (IPCC, 2005)

Mediante la reacción del monóxido de carbono con el vapor en un segundo reactor (un “reactor de conversión”) se produce hidrógeno adicional y CO_2 . Entonces, la mezcla resultante de hidrógeno y CO_2 puede separarse en un flujo de gas de CO_2 y un flujo de hidrógeno. (IPCC, 2005)

Si el CO_2 es almacenado, el hidrógeno será un producto energético sin carbono que podrá ser consumido para generar energía eléctrica y/o calor. Si bien las fases iniciales de conversión del combustible son más complejas y onerosas que en los sistemas de captación posterior a la combustión, las altas concentraciones de CO_2 producidas por el reactor de conversión (generalmente, del 15 al 60 por ciento en volumen en seco) y las altas presiones que suelen caracterizar a estas aplicaciones son más favorables para la separación de CO_2 . El sistema de captación previa a la combustión se utilizaría en centrales eléctricas que usan tecnología de ciclo combinado de gasificación integrada. (IPCC, 2005)

2.5.2 Oxi-Combustión

Los sistemas de oxi-combustión utilizan oxígeno en lugar de aire para la combustión del combustible primario con objeto de producir un gas de combustión compuesto principalmente por vapor de agua y CO_2 . Esto da origen a un gas de combustión con altas concentraciones de CO_2 (de más del 80 por ciento en volumen). Entonces, el vapor de agua es sustraído mediante el enfriamiento y la compresión del flujo de gas. La combustión de oxígeno-gas requiere separar inicialmente el oxígeno del aire, adquiriendo, así, el oxígeno un grado de pureza del 95 al 99 por ciento en la mayor parte de los modelos. Podría necesitarse un tratamiento ulterior del gas de combustión para extraer los contaminantes atmosféricos y los gases no condensados (como el nitrógeno) del gas de combustión antes de transportar el CO_2 a su lugar de almacenamiento. (IPCC, 2005)

2.5.3 Post-Combustión

Los sistemas de captación posterior a la combustión separan el CO_2 de los gases de combustión producidos por la combustión del combustible primario en el aire. Normalmente, estos sistemas utilizan un solvente líquido para captar la pequeña fracción de CO_2 (habitualmente, del 3 al 15 por ciento en volumen) presente en un flujo de gas de combustión cuyo componente principal es nitrógeno (del aire). (IPCC, 2005)

En una moderna central eléctrica de carbón pulverizado (CP) o de ciclo combinado de gas natural (CCGN), los sistemas de captación posterior a la combustión existentes utilizarían, por lo general, un solvente orgánico como la monoetanolamina. (IPCC, 2005)

2.6 Almacenamiento Geológico de Carbono

En esta sección se examinan tres tipos de formaciones geológicas que han sido objeto de una amplia consideración para el almacenamiento geológico de CO_2 :

- Yacimientos de petróleo y gas
- Formaciones salinas profundas
- Capas de carbón inexplotables

En cada caso, el almacenamiento geológico de CO_2 se consigue mediante su inyección en forma condensada en una formación rocosa subterránea. Las formaciones rocosas porosas que retienen o que (como en el caso de los yacimientos agotados de petróleo o de gas) han retenido fluidos anteriormente –como gas natural, petróleo o salmuera– son candidatos potenciales para el almacenamiento de CO_2 . Las formaciones aptas para el almacenamiento pueden aparecer en cuencas sedimentarias terrestres y marítimas (depresiones naturales a gran escala situadas en la corteza terrestre que se llenan de sedimentos). (IPCC, 2005)

Las capas de carbón también pueden utilizarse para almacenar CO_2 cuando sea poco probable que el carbón sea explotado posteriormente y siempre que la permeabilidad sea

suficiente. La opción de almacenar CO_2 en capas de carbón y mejorar la producción de metano aún está en la fase de demostración. (IPCC, 2005)

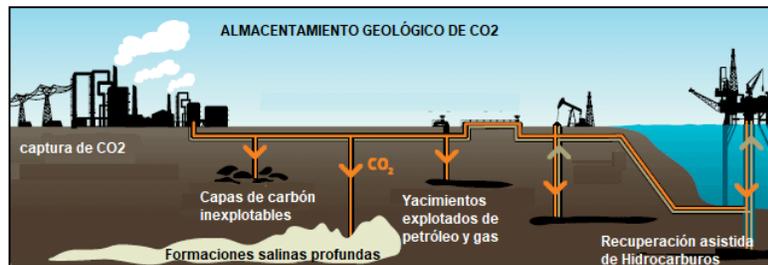


Figura 2.7: Almacenamiento geológico de CO_2 . Fuente: IPCC; 2005.

2.7 Fundamentos Teóricos de Operaciones Unitarias Involucradas

2.7.1 Compresión

En su definición básica la compresión es un proceso en mediante el cual, un cuerpo sometido a la acción de dos fuerzas opuestas, es posible reducir su volumen.

La compresión ocurre en los gases cuando se disminuye su volumen, por lo que la presión que soporta es mayor, a diferencia de los sólidos que no pueden comprimirse y de los líquidos que lo hacen de una manera muy poco apreciable y prácticamente insignificante.

La razón de este fenómeno la encontramos en el modelo cinético de partículas que nos dice que las moléculas de los gases se encuentran muy separadas entre sí por lo que, su fuerza cohesión es baja, de esta forma existe una gran cantidad de espacio vacío entre ellas, al juntar las moléculas del gas el volumen que ocupan disminuye. Esto significará un cambio en la presión del gas.

2.7.2 Adsorción

La adsorción es la adhesión de átomos, iones o moléculas de un gas, líquido o sólido disuelto a una superficie. (Center, 2009)

La adsorción por oscilación de presión (PSA por sus siglas en inglés) es una tecnología que aprovecha la afinidad de un material adsorbente logrando a presión determinada, separar una mezcla de gases en sus diferentes componentes. Puede trabajar a temperaturas aproximadas a la del ambiente.

Se utilizan materiales adsorbentes específicos como zeolitas, carbón activado, tamices moleculares etc. A manera de trampa o filtro para adsorber el compuesto gaseoso requerido. El proceso entonces se balancea a baja presión para desorber el gas adsorbido.

Este tipo de procesos se basan en la propiedad de que a una alta presión los gases tienden a ser atraídos a superficies sólidas, o “adsorbidos”. Conforme la presión sea mayor existe mayor adsorción de gas; cuando la presión disminuye el gas se libera o es desorbido. El proceso de PSA se puede utilizar para separar los componentes de una mezcla de diferentes gases, porque éstos tienden a ser atraídos a diferentes superficies sólidas, de una manera más o menos fuerte.

Tomando como ejemplo el aire, que es una mezcla de gases, en un recipiente que contiene zeolita se ingresa aire a alta presión, el nitrógeno es atraído por la zeolita ya que tiene una mayor afinidad con éste que con el oxígeno, la mayor parte o todo el nitrógeno se quedará en la zeolita, permitiendo que el oxígeno sea liberado y posteriormente almacenado, una vez terminado este proceso se disminuye la presión y el nitrógeno es liberado al ambiente o a otro proceso de envasado.

2.7.5 Combustión

El proceso de combustión se produce por la oxidación rápida de una sustancia, acompañado de un aumento de calor, es la reacción química entre una sustancia oxidante (comburente) y otra reductora (combustible). Estas reacciones químicas liberan energía produciendo aumentos locales de temperatura, lo que origina un flujo de calor hacia el exterior. (EcuRed, 2021)

2.7.6 Vaporización

El proceso de combustión se produce por la oxidación rápida de una sustancia, acompañado de un aumento de calor, es la reacción química entre una sustancia oxidante (comburente) y otra reductora (combustible). Estas reacciones químicas liberan energía produciendo aumentos locales de temperatura, lo que origina un flujo de calor hacia el exterior.

2.7.7 Condensación

La condensación es el cambio físico de la materia que al encontrarse en forma gaseosa pasa a líquida, es un proceso inverso a la vaporización. En el sector industrial esta disminución de la temperatura es lograda con la ayuda de intercambiadores de calor, tiene por objetivo la condensación de un vapor mediante un líquido frío. (Fernández G. , 2014)

2.8 Análisis de Ciclo de vida

El análisis del ciclo de vida es un estudio de los impactos ambientales generados en un proceso, ya sea industrial, institucional o de servicios. Se necesitan fijar objetivos, alcance y una unidad funcional.

Todos los procesos y actividades generan algún tipo de impacto en el ambiente, se necesitan recursos y emiten sustancias al medio ambiente, generando otras modificaciones ambientales, por lo que es de gran importancia valorar estos impactos con la finalidad de influir en procesos ambientales como el cambio climático, reducción de capa de ozono, entre otras. (Envira, 2021)

2.8.1 Etapas de Análisis del Ciclo de vida

I. Definición de objetivos y alcance:

Los objetivos planteados, sirven para definir la finalidad del estudio, exponiendo los motivos para llevar al cabo el análisis del ciclo de vida y establecer el alcance que tendrá el mismo.

II. Inventario del Ciclo de Vida (ACV)

Se identifican todas las entradas, como consumo de recursos materias primas y todas las salidas del proceso (emisiones de aire, aguas, residuos) que potencialmente pueden causar un impacto ambiental durante el Análisis del ciclo de vida. (Envira, 2021)

Se deben recopilar datos y establecer las herramientas matemáticas para cuantificar los efectos ambientales adversos asociados al proceso.

III. Evaluación de los Impactos del Ciclo de Vida

Se establece una relación entre las entradas y salidas del inventario con los posibles impactos sobre el medio ambiente, salud humana y demás recursos disponibles, con el objetivo de evaluar cuan importantes son los potenciales impactos que se generan. Se establecen las categorías de impacto y se asignan los datos tomados del inventario a cada categoría de impacto según el efecto ambiental esperado. (Envira, 2021)

IV. Interpretación de resultados

Una vez realizado el análisis del ciclo de vida, se habrá identificado en qué fases o etapas del ciclo de vida del producto, se generan las principales cargas ambientales, de esta manera se reconocen los elementos claves en la implementación de mejoras, ya que estos elementos son causantes de mayores impactos ambientales. (Envira, 2021)

2.9 Huella de Carbono

La huella de carbono es la suma de emisiones de GEI que se generan indirecta o directamente por instituciones, industrias, actividades humanas, productos, sociedades; en términos de dióxido de carbono equivalente. (Colombia, 2021)

El control de la huella de carbono, es fundamental para la lucha contra el cambio climático, la cual se puede modificar con el consumo de energía, como electricidad o transporte, principalmente en aquellos que son utilizados combustibles fósiles y que al hacerlo son emitidos gases como el dióxido de carbono CO_2 o el metano, aumentando así su concentración en la atmósfera por encima de los que habitualmente serían sus niveles. (Blanco, 2021)

Este tipo de gases, por su composición química, tienen la propiedad de absorber parte de calor de sol que ingresa a la tierra, como resultado de esto la temperatura en la tierra aumenta, por encima de lo que serían sus condiciones naturales. (Blanco, 2021)

Los principales gases de efecto invernadero (GEI) son el metano, dióxido de carbono, e óxido de nitrógeno y el ozono. Los GEI cuya concentración ha ido en aumento desde la revolución industrial están directamente relacionados con el incremento de la temperatura. El más abundante, resultado de la quema de combustibles fósiles (petróleo, carbón, gas natural y gas licuado) y que representa aproximadamente dos tercios de todos los tipos de GEI, es el dióxido de carbono. (IBERDROLA, 2021)

Las empresas recomiendan como solución a este impacto ambiental el cambio de hábitos de consumo, debido a que los gases de efecto invernadero en su mayor parte son producidos directamente por la energía liberada por los grupos industriales en los procesos de fabricación. (IBERDROLA, 2021)

El dato de consumo es el parámetro que define el nivel de la actividad generadora de GEI, como por ejemplo la cantidad de gas natural utilizado en la calefacción. El factor de emisión, es la cantidad de gases de efecto invernadero emitidos por cada unidad de parámetro o dato de actividad. Hay que tener en cuenta que los factores de emisión de los principales combustibles en el inventario previo, así como de las fuentes de donde se ha obtenido. (Blanco, 2021)

CAPÍTULO 3

DESCRIPCIÓN CONCEPTUAL DE LA PLANTA

La planta a conceptualizar, generaría energía eléctrica mediante el ciclo Rankine simple, que consiste en 4 equipos principales; caldera, turbina, bomba, condensador. Durante el ciclo en una caldera acuatubular, produciría vapor sobrecalentado a condiciones definidas en el ítem 3.4.1; para que mueva la turbina que a su vez está conectada a un generador eléctrico, del que se espera obtener 20 MWh de energía. Todas las consideraciones mencionadas a lo largo de éste capítulo han sido realizadas para que la planta esté ubicada en la Provincia de Pichincha y por ende supliría una parte de las necesidades energéticas de la misma.

Para la combustión se espera hacer uso de biomasa como combustible no fósil, mismo que durante su crecimiento ha absorbido dióxido de carbono del medio ambiente.

Como comburente se ha de utilizar oxígeno con pureza mayor a 90%. El proceso de obtención que se utilizaría es el de adsorción por variación de presión, que se lleva a cabo en adsorbentes de zeolita, la cual retiene selectivamente el nitrógeno del aire atmosférico, por diferencia de tamaño molecular, y libera oxígeno concentrado por la parte superior de la torre de absorción. Se requiere oxígeno no menor del 90%, para lograr una combustión completa, en donde los componentes de los gases de chimenea, básicamente sean dióxido de carbono y vapor de agua. Éste proceso lleva el nombre de oxicomustión.

La oxicomustión se lleva a cabo para poder atrapar el dióxido de carbono directamente del gas de chimenea, sin que pase por separación química. El tratamiento del gas, consiste en purificación por medio de precipitador electrostático; compresión multietapas y absorción de agua por medio de alúmina.

Una vez tratado el dióxido de carbono, se transportaría por gasoductos de acero al carbón por unos 300 kilómetros aproximadamente hasta yacimientos de petróleo en Shushufindi, en donde existe un compresor de inyección para enterrar el dióxido de carbono a unos 800 metros de profundidad.

3.1 Elección y disponibilidad de biomasa

Uno de los requisitos para que el sistema sea carbono negativo, es que inicialmente sea carbono neutro, esto se logra utilizando un combustible que haya realizado absorción de dióxido de carbono de la atmósfera. La biomasa forestal tiene ésta particularidad por el proceso natural de fotosíntesis que realiza durante todo su crecimiento.

En la investigación doctoral realizada por Christian Parra (2020) se identifican cultivos energéticos de segunda generación para producción de electricidad; el estudio consideró biomasa leñosa y no leñosa, 4 y 11 especies respectivamente; de las cuales se ha recabado la información más relevante como humedad, rendimiento por hectáreas, energía potencial

bruta; entre otros. El estudio sugiera que las especies que presentan la mayor viabilidad técnica, para convertirse en recursos bioenergéticas de segunda generación; se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5: Energía Disponible por especie de árbol.

ESPECIE	ENERGÍA BRUTA POTENCIAL (MWh/año)
Caña Gigante	10,061,004
Mischanthus	5,853,166
Eucalipto	4,350,559
Pino	4,090,026
Bambú	2,677,144
Cámaño	1,618,783

Fuente: Parra; 2020.

En la Tabla 1, se visualiza que la caña gigante tiene la mayor disponibilidad de energía, seguida de la mischanthus ; sin embargo se ha elegido al eucalipto para el presente estudio; ya que aunque esté en tercer lugar en su potencial energético; éste se produce a escala comercial en el Ecuador, a diferencia de las otras dos especies, a más de que el eucalipto es una especie de rápido crecimiento y moderado mantenimiento. Existen también aspectos geográficos de la disponibilidad de la zona cultivable de eucalipto que lo hacen atractivo.

En Ecuador existen zonas optimas según el tipo de suelo para sembrar eucalipto, sin embargo de esta totalidad, mucha área es zona protegida o habitada, por lo que no son susceptibles de siembra, exceptuando éstas, se tiene que 39550.53 Ha están disponibles como fuentes de biomasa, en la Tabla 6, se indica la disponibilidad de hectáreas por provincia. (Parra, 2020)

Tabla 6: Cantidad de hectáreas disponibles para plantar eucalipto globulus por provincias del Ecuador

Provincia	Área óptima (ha)
AZUAY	5297.75
BOLÍVAR	856.26
CAÑAR	1531.19
CARCHI	647.76
CHIMBORAZO	3393.71
COTOPAXI	6440.33
EL ORO	210.21
IMBABURA	4794.79
LOJA	1211.44
MORONA SANTIAGO	47.32
NAPO	27.49
PICHINCHA	10804.46
TUNGURAHUA	1153.34
ZAMORA CHINCHIPE	3134.47
TOTAL	39550.53

. Fuente: Parra; 2020

Alrededor del Ecuador; Pichincha, Cotopaxi, Azuay e Imbabura tienen la mayor cantidad de áreas de siembra de eucalipto, que corresponden a 10.804,28; 6.440,33; 5.297,75; 4.794,96 ha respectivamente y en porcentaje 27.20, 16.18, 13.75, 12.24; es decir el 69.37 de la totalidad de zona lista para sembrar para fines energéticos.

Por facilidad en la logística y al estar ubicadas en la Sierra Norte, se ha elegido a las provincias de Pichincha, Imbabura y Cotopaxi como tierras de suministro estratégicas de biomasa (eucalipto).

3.2 Elección de tecnología de captura de carbono

Adicional al requisito de tipo de combustible utilizado en la generación eléctrica, del que se habló en el ítem 3.1; otro requisito para que el sistema sea carbono negativo, es utilizar tecnologías de captura y almacenamiento de carbono; esto, según la literatura revisada, se puede realizar antes, durante o después de la combustión.

De la información tomada del Informe de IPCC; 2005 sobre “Captación y Almacenamiento de Carbono”; existen 3 tecnologías de captación. En la Tabla 7 se las describe.

Tabla 7: Características de métodos de captura de carbono en sistemas de combustión

TECNOLOGÍA EXISTENTE	CONDICIONES MÍNIMAS DE OPERACIÓN
Pre-combustión	Consiste en descarbonizar el combustible antes de su quema, por medio de columnas de absorción y gasificando el producto resultante de éste; por lo que debe utilizarse con combustibles líquidos o gaseosos. Además de que éste proceso implica altos gastos energéticos.
Oxi-combustión	Se debe utilizar oxígeno con pureza mínima de 90% como comburente, por lo que se debe separar previamente del aire atmosférico, el método de separación varía de acuerdo a la pureza requerida y en éste caso se puede utilizar el método PSA (Absorción por oscilación de presión) que implica gastos energéticos moderados frente a otros. Al usar únicamente oxígeno y biomasa, se da la combustión completa, donde los gases de chimenea únicamente son CO ₂ y vapor de agua y ligerísimas trazas de otros generados por la composición de la biomasa.
Post-combustión	Mediante ésta tecnología, se separa CO ₂ de mediante columnas de absorción con aminas que deben ser regeneradas, para ello los gases deben ser tratados previamente. El proceso con aminas es costoso por los insumos y mantenimiento, ya que las aminas son altamente atacables y la regeneración implica grandes gastos energéticos

Fuente: Informe IPCC; 2005.

Dadas las condiciones técnicas, tecnológicas y geográficas; por lo anterior expuesto, el sistema se conceptualizará para oxi-combustión.

3.3 Ubicación de la planta

Se prevé que la planta esté ubicada en la Provincia de Pichincha, que es en donde se concentra la mayor cantidad de eucalipto disponible para la operación.

3.4 Cálculos para diseño

De acuerdo a datos del Instituto Nacional de Paraguay; en su estudio de Rentabilidad de la inversión en plantaciones de eucalipto del año 2014; el rendimiento de plantaciones de eucalipto es de $420 \frac{ton}{ha}$. En cuanto a la disponibilidad de zonas cultivables, se han contabilizado las hectáreas de Pichincha, Imbabura y Cotopaxi; para realizar las

proyecciones de producción energética. En total estas provincias tienen un potencial de 22.039,34 hectáreas, dado el rendimiento por hectárea y el poder calorífico del eucalipto, que es $18 \frac{Mj}{kg}$, se ha determinado que el potencial máximo de energía es de 162 MW.

Para dimensionar los equipos y sistemas se debe contar con datos iniciales de diseño; se ha buscado información de plantas de generación eléctrica implementadas en el mundo, cuyo combustible sea biomasa forestal.

Se ha tomado como referencia la planta Wheelabrator Shasta ubicada en el Estado de California, que cuenta con 3 sistemas de generación eléctrica de aproximadamente 20 MW, cada uno que en conjunto forman el complejo de 58 MW de generación para el Condado de Shasta. Dicha planta opera desde el año 1987 a la actualidad, y utiliza como combustible desechos de madera y residuos forestales. (CBEA, 2021)

3.4.1 Cálculos Termodinámicos

En la Tabla 8 se encuentran las características de diseño del sistema de generación de vapor.

Tabla 8: Características Iniciales de diseño conceptual.

Característica	Valor	Unidad
Presión de diseño de la caldera	6.000	kPa
Temperatura de diseño de la caldera	600	°C
Eficiencia de turbina	87	%
Título máximo de vapor a la salida de turbina	15	%
Eficiencia de Caldera	87	%
Rendimiento en bombas	87	%
Presión del Condensador	8,0	kPa

Fuente: Elaboración Propia; 2021

Se prevé llevar a cabo un esquema de ciclo Rankine simple de generación eléctrica, como se presenta en la Figura 3.1.

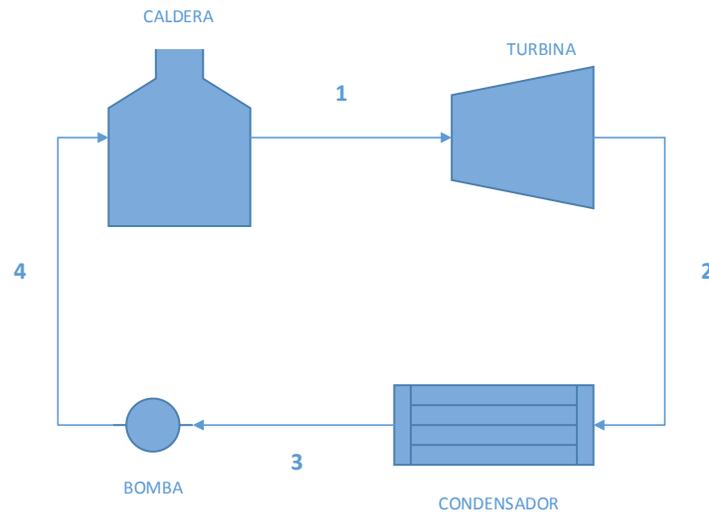


Figura 3.1: Esquema de ciclo Rankine simple. Fuente: Elaboración Propia

El punto #1 del ciclo es a la salida de la caldera y al mismo tiempo entrada a la turbina de vapor, en éste punto se conocen la temperatura y presión; ya que son parámetros de diseño. Las condiciones termodinámicas de éste punto se han obtenido de las tablas de vapor sobrecalentado, dado que se tienen las dos propiedades de presión y temperatura.

En el punto #2 a la salida de la turbina al haber realizado trabajo, el vapor tiene un título menor a 1, es decir que tiene un porcentaje de agua líquida, sin embargo éste valor no puede superar 15%, para evitar la erosión de los álabes de la turbina, la presión a la salida de la turbina debe ser inferior a la atmosférica, un valor usual es el de 10 kPa siendo ésta 10 veces menor. El valor de la entropía es el mismo del punto 1, ya que es un proceso isoentrópico. Con esa presión en la tabla de agua saturada se han ubicado las propiedades termodinámicas de líquido y mezcla, para mediante fórmula determinar el título real del vapor, así como la entalpía de éste punto.

A la salida del condensador, en el punto #3 se tiene agua saturada, que posee la misma presión que en el punto 2 al ser un proceso isobárico, las propiedades termodinámicas se obtendrían de la columna de líquido saturado directamente, y aquí ya se tendría un valor de volumen específico, al tratarse de agua líquida, valor que será necesario para cálculos del punto #4.

En el punto #4, se tiene que la bomba ha realizado una compresión adiabática, mediante los valores encontrados previamente en el análisis, se ha realizado los cálculos de calor de entrada y calor de salida del ciclo Rankine, con lo que se tendrá el trabajo neto realizado y por consiguiente el flujo másico de vapor necesario, para continuar con los balances de masa y energía. Se presentan ecuaciones utilizadas y resultados finales del ciclo, en la Tabla 9.

- **Ecuaciones**

- Título Real del Vapor a la salida de la turbina; $S_2 = S_{vap2} * x + (1 - x) * S_{liq2}$ ó
- Entalpía del punto 2; $h_2 = h_{f2} + (x * h_{fg2})$

- iii. Trabajo de bomba; $W_{bomba} = h_4 - h_3$ ó $W_{bomba} = v_3 * (P_4 - P_3)$; estas ecuaciones se igualan para determinar h_4
- iv. Entalpía en el punto 4; $h_4 = v_3(P_4 - P_3) + h_3$
- v. Calor de entrada; $Q_{entrada} = h_1 - h_4$
- vi. Calor de salida; $Q_{salida} = h_2 - h_3$
- vii. Trabajo Neto; $W_{neto} = Q_{entrada} - Q_{salida}$
- viii. Eficiencia Térmica; $\eta = \frac{W_{neto}}{Q_{entrada}}$
- ix. Flujo másico de vapor; $\dot{m} = \frac{Potencia\ Generada}{W_{neto}}$

Las características termodinámicas, de tablas de vapor y asunciones iniciales, se encuentran en la Tabla 9.

Tabla 9: Características termodinámicas de ciclo Rankine estudiado.

PUNTO #1: vapor sobrecalentado		
Propiedad	Valor	Unidad
Presión	6.000	kPa
Temperatura	600	°C
Entalpía	3658,8	kJ/Kg
Entropía	7,1693	kJ/Kg°K
PUNTO #2: Agua Saturada		
Presión	10	kPa
Entropía	7,1693	kJ/Kg°K
Entropía de líquido	0,6492	
Entropía de mezcla	7,4996	
Entropía de vapor	8,1488	
Título del vapor	0,87	--
Entalpía	2272,07	kJ/Kg
Entalpía de líquido	191,81	
Entalpía de mezcla	2391,1	
PUNTO #3: Agua Saturada		
Presión	10	kPa
Entalpía	191,81	kJ/Kg
Volumen específico	0,001010	m ³ /kg
PUNTO #4: Agua Saturada		
Presión	6.000	kPa
Entalpía	197,86	kJ/Kg
Colorario del Ciclo Rankine		
Calor de Entrada	3460,94	kJ/Kg
Calor de salida	2080,26	
Trabajo Neto	1380,68	
Eficiencia Térmica	0,39	-
Flujo Másico vapor (considerando 10% de pérdidas en caldera)	15,94	Kg/s

Fuente: Elaboración propia; 2021

3.4.2 Cálculos de combustión

Se ha tomado a la caldera como un sistema único para establecer los límites y realizar un balance de masa y energía:

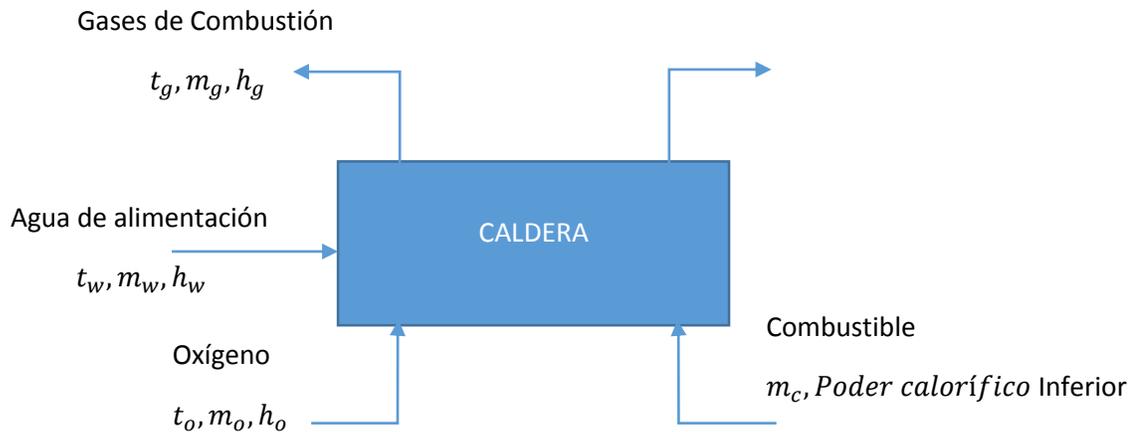


Figura 3.2: Fronteras del sistema de combustión en caldera. Fuente: Elaboración propia; 2021.

El balance de masa, queda definido de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$m_g = m_a + m_c \quad \text{en donde; } m_v = m_w$$

El balance de energía, por otra parte, corresponde a que la energía otorgada por el combustible, el aire y el agua alimentada; es igual a la energía que concentran los gases de combustión y el vapor a lo que hay que sumarle las pérdidas; quedando definido así:

$$(m_c * PCI) + (m_o * o) + (m_w * h_w) = (m_g * h_g) + (m_v * h_v) + P$$

- **Balance de energía en la caldera**

Se puede obtener la cantidad de biomasa para abastecer el sistema, dadas las propiedades termodinámicas conocidas. Ya que se está en estado estacionario, la derivada de la energía con respecto al tiempo es cero, así mismo no existe influencia de energía cinética y potencial y tampoco hay aporte de trabajo en el sistema de la combustión. Se cumple además que la masa de ingreso al caldero es igual a la masa que sale; $m_1 = m_4$

El calor que se aporta al ciclo por combustión del eucalipto, es entonces:

$$\dot{Q}_{combustión} = m_4 * (h_1 - h_4)$$

$$\dot{Q}_{combustión} = 55167,38 \frac{kJ}{kg}$$

Este es el calor que se debe generar para la producción de energía eléctrica esperada, pero se debe considerar la potencia del ciclo Rankine del 87% de diseño, se utiliza la siguiente expresión, para encontrar el flujo de eucalipto necesario:

$$\frac{\dot{Q}_{combustión}}{0,87} = m_{biomasa} * Poder\ Calorífico\ eucalipto$$

$$m_{biomasa} = \frac{\dot{Q}_{comb}}{Poder\ Cal * 0,87}$$

$$m_{biomasa} = 3,52 \frac{Kg}{s} \text{ de eucalipto}$$

Es decir que se necesitarían 90094,04 toneladas de eucalipto al año, para generar 20 MW, con la disponibilidad de masa de las 3 provincias elegidas, se podrían construir 10 plantas similares.

El análisis elemental del eucalipto glóbulos se presenta en la Tabla 10. (Pozas, 2012)

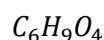
Tabla 10: Características elementales de eucalipto globulus.

Análisis Elemental Eucaliptus Globulos en base seca			
Carbono %C	Hidrógeno %H	Azufre %S	Oxígeno %O
49,88	6,0	0,021	44,87

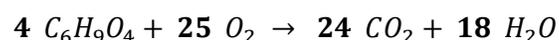
Fuente: Pozas; 2012.

Se utilizarán únicamente los porcentajes de Carbono, hidrógeno y oxígeno, para fines estequiométricos ya que el porcentaje de azufre es mínimo. Para determinar la fórmula empírica y molecular de la biomasa a trabajar, se hará uso del peso molecular conocido del eucaliptol, que es de 154,249 gr/mol.

Con lo que la fórmula molecular de la biomasa a combustionar, es de:



Balanceando; y asumiendo combustión completa por la pureza del oxígeno y que se queme todo el combustible:



El esquema de entradas y salidas del horno se ilustra en la Figura 3.3.

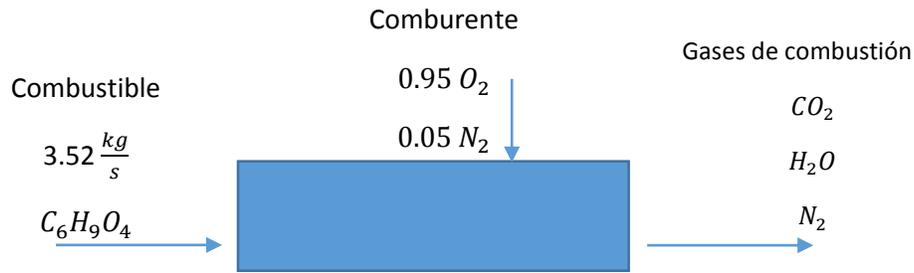


Figura3.3: Esquema de entradas y salidas del horno de caldera. Fuente: Elaboración propia; 2021.

En la corriente de salida, no sale combustible al quemarse todo, y el nitrógeno que ingresa es igual al que sale en los gases de combustión por ser inerte, por lo que se obvian estas corrientes en el balance por componente.

Utilizando las relaciones estequiométricas de la ecuación de combustión y el flujo másico del combustible; se tiene que:

Para el Oxígeno:

$$3,52 \frac{kg}{s} C_6H_9O_4 * \frac{1 \text{ kmol } C_6H_9O_4}{145 \text{ kg } C_6H_9O_4} * \frac{25 \text{ kmol } O_2}{4 \text{ kmol } C_6H_9O_4} * \frac{32 \text{ kg } O_2}{1 \text{ kmol } O_2} = 4,86 \frac{kg}{s} O_2$$

Para el Dióxido de Carbono:

$$3,52 \frac{kg}{s} C_6H_9O_4 * \frac{1 \text{ kmol } C_6H_9O_4}{145 \text{ kg } C_6H_9O_4} * \frac{24 \text{ kmol } CO_2}{4 \text{ kmol } C_6H_9O_4} * \frac{44 \text{ kg } CO_2}{1 \text{ kmol } CO_2} = 6,41 \frac{kg}{s} CO_2$$

Para el Agua:

$$3,52 \frac{kg}{s} C_6H_9O_4 * \frac{1 \text{ kmol } C_6H_9O_4}{145 \text{ kg } C_6H_9O_4} * \frac{18 \text{ kmol } H_2O}{4 \text{ kmol } C_6H_9O_4} * \frac{18 \text{ kg } H_2O}{1 \text{ kmol } H_2O} = 1,97 \frac{kg}{s} H_2O$$

El balance general de masa en el horno, queda definido así:

$$\dot{m}_{combustible} + \dot{m}_{comburente} = \dot{m}_{gases \text{ de } combustión}$$

Se ha cumplido esta relación de los cálculos estequiométricos realizados. En la tabla 11, se muestran los resultados de los flujos involucrados en el balance de masa en caldero.

Tabla 11: Flujos de entrada y salida de la caldera.

FLUJOS DE ENTRADAS	Componente	Unidad	Valor
	Agua de alimentación	ml/s	15,94
	Oxígeno	Kg/s	4,86
	Biomasa	Kg/s	3,52
FLUJOS DE SALIDAS	Componente	Unidad	Valor
	Gases de Combustión	Kg/s	8,38
	Vapor (flujo de trabajo)	Kg/s	15,94

Fuente: Elaboración propia; 2021

3.5 Esquema Físico de la planta.

En la Figura 3.4, se observan los flujos de los procesos involucrados, en el ciclo de vida de la tumba a la puerta.

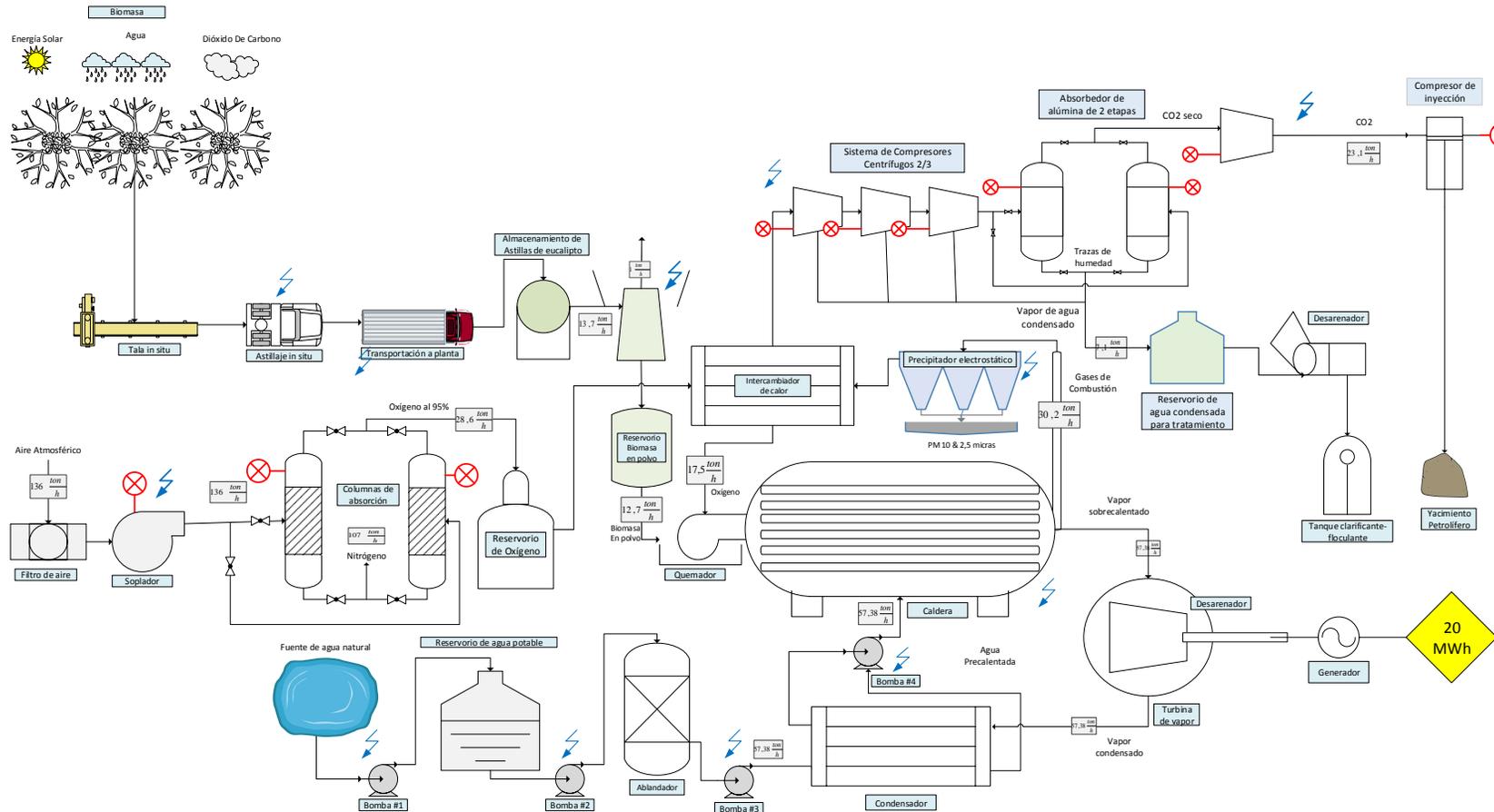


Figura 3.4: Diagrama de Flujo sistema conceptualizado. Fuente: Elaboración propia; 2021.

3.5.1 Procesamiento de biomasa para combustión

El eucalipto es un árbol de crecimiento rápido y mínimo mantenimiento y el tiempo que hay que esperar para obtener el máximo rendimiento de sus plantaciones, es de 10 años. Sin embargo durante éste período se pueden realizar talas o radeos a partir de los dos años desde su siembra. El rendimiento de estas plantaciones al cabo de 10 años es de $420 \frac{ton}{ha}$, esto contabilizando todo el material cosechable. (Nacional, 2014)

Con la finalidad de conceptualizar el diseño de planta generadora, se ha determinado un promedio anual de obtención de la biomasa para ponerla al servicio de la planta de forma continua, esto es de $42 \frac{ton}{ha-año}$

El proceso para preparar la biomasa ara su combustión, se ilustra en la Figura 3.5.

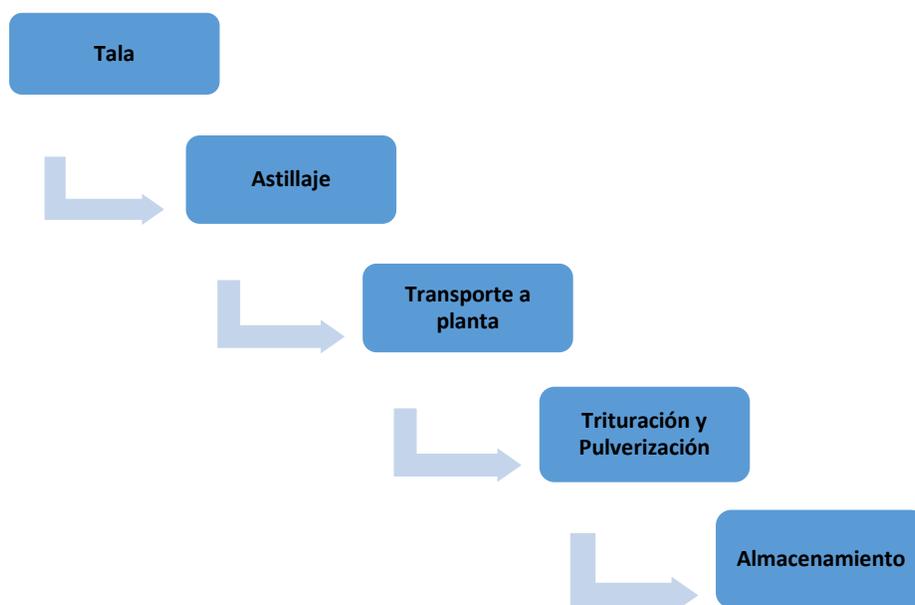


Figura 3.5: Pasos del procesamiento de biomasa para combustión. Fuente: Elaboración propia; 2021.

En la Tabla 12 se indican datos cuantitativos para dimensionar los equipos de tratamiento de la biomasa:

Tabla 12: Datos cuantitativos de biomasa a procesar.

Parámetro	Valor	Unidades
Rendimiento teórico eucalipto	42	$\frac{ton}{ha - año}$
Área total de eucalipto Disponible.	39550.53	ha
Área Elegida para planta BECCS.	22.039,34	ha
Cantidad de eucalipto procesado por año.	925652,28	$\frac{ton}{año}$
Días de trabajo por año	296	días
Cantidad de eucalipto procesado por día.	3127,20	$\frac{ton}{día}$
Densidad promedio del eucalipto	1050	$\frac{Kg}{m^3}$
Volumen de eucalipto a procesar	124,10	$\frac{m^3}{h}$

Fuente: Elaboración propia;2021.

El equipo para astillaje de la biomasa que se ha elegido es el HEM 820 DL, del fabricante italiano WEGER Biomasse, la cual puede procesar hasta $180 \frac{m^3}{h}$ lo cual permite el procesamiento de los $124,10 \frac{m^3}{h}$ que se requerirán para las operaciones de la planta de generación eléctrica. Éste proceso se realiza para procesar los troncos y ramas cosechados, previamente talados. El tamaño máximo de entrada es de 1x0,56 m y se obtendrían astillas de hasta 100 mm. (Biomasse, 2019)

Luego del proceso de astillaje, se deberá pasar por una trituradora de conos para obtener la biomasa pulverizada, para ello se haría uso del equipo CS75B del fabricante GCM , cuya máxima capacidad es de $163 \frac{ton}{h}$, lo que está dentro del requerimiento de $130 \frac{ton}{h}$, el equipo recibe las astillas con tamaños variables de hasta 175 mm, con diámetro de la abertura de salida de 1.3 cm. (Machine, 2021)

Finalmente el material pasa a los silos de almacenamiento.

3.5.2 Sistema de purificación de oxígeno

Se va a requerir oxígeno con no menos de 90% de pureza para utilizar como comburente, existen algunos métodos de separación de oxígeno y nitrógeno del aire atmosférico; sin embargo para fines de ahorro energético, condiciones de operación in situ y por el grado de pureza requerido; se ha elegido el método PSA (adsorción por cambio de presión).

Éste método utiliza equipos convencionales y de fácil manejo; dados los requerimientos altos de oxígeno, se ha buscado en el mercado una planta que trabaje in situ para proveer del oxígeno a la combustión, encontrando así el modelo ZO-20000, del productor chino PIONEER, cuya operación se describe en la Figura 3.6. (PIONEER, 2021)

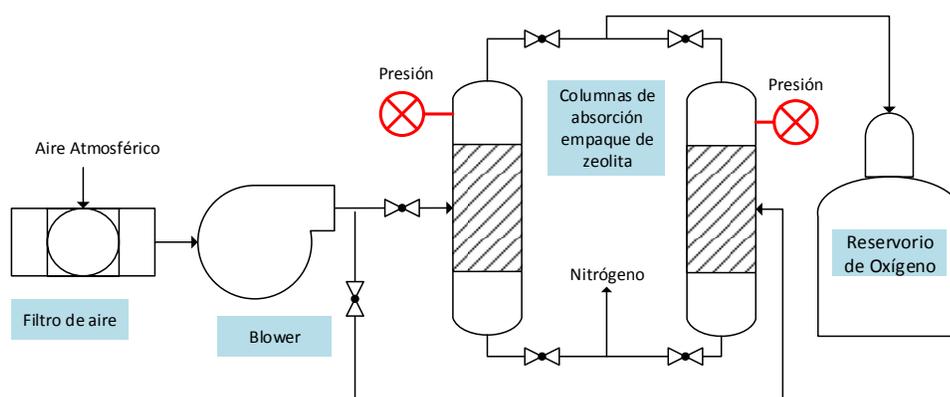


Figura 3.6: Diagrama de flujo de proceso de generación de oxígeno para combustión.
Fuente:Elaboración propia; 2021.

El aire atmosférico pasa a flujo constante por el soplador que eleva la presión del aire hasta unos 110 PSI, necesarios para la adsorción dentro de las columnas, cuyo lecho se trata de zeolita que retiene selectivamente el nitrógeno del aire y deja salir por la corriente superior el oxígeno purificado.

El soplador alimenta a ambas columnas, que poseen válvulas que se abren o cierran mediante control automático, ya que mientras una está siendo presurizada con el ingreso del aire, la otra debe ser despresurizada con la salida del nitrógeno retenido; de ésta forma se da la regeneración de la zeolita de manera rápida, sencilla y económica.

El proceso consta de un filtro de aire, soplador, dos columnas de adsorción con zeolita y un tanque de almacenamiento de oxígeno; opera a temperatura ambiente, y el gasto energético que el fabricante estima es de $0,32 \frac{kWh}{m^3}$ de oxígeno producido. El sistema ocupa

una totalidad aproximada de 2800 m^2 de extensión, siendo una de las operaciones más importantes para la planta que se está conceptualizando.

Se prevé una alimentación de $136 \frac{\text{ton}}{\text{h}}$ de aire atmosférico y una producción de aproximadamente $28,6 \frac{\text{ton}}{\text{h}}$ de oxígeno; esto para asegurarse del flujo que debe ingresar al quemador que es no menos de $17,5 \frac{\text{ton}}{\text{h}}$.

3.5.3 Sistema de Combustión

Por las condiciones altas de temperaturas y presión de vapor de agua, se prevé que la combustión se dé en una caldera acuatubular; en cuanto al desarrollo de la combustión, se ha optado por un lecho fluidizado, que consiste en que la biomasa está en suspensión y es fluidizada por la corriente de oxígeno ascendente. Éste método supone un aumento de eficiencia de la caldera ya que se da una mezcla instantánea y homogénea de combustible-comburente.

Según Ludeña & Vasquez; 2017 las temperaturas máximas alcanzadas en éste tipo de calderas, no sobrepasa los $800 \text{ }^\circ\text{C}$; a diferencia de sus opuestas, las calderas de parrillas en las que se sobrepasan los $1200 \text{ }^\circ\text{C}$, temperaturas en las que se da el ablandamiento y fusión de cenizas, lo que implica formación de escorias en el hogar; así mismo la temperatura de combustión es menor que la de formación de óxidos de nitrógeno, perjudiciales para la captación de CO_2 consiguiente. A pesar de tratarse de un sistema de oxicomustión, la biomasa contiene trazas de nitrógeno por captación de fertilizantes en los suelos de siembra.

Se prevé contar con un ablandador de agua a base de salmuera, para que no existan incrustaciones calcáreas y magnésicas en la caldera; se tratará agua natural de río, que estará contenida en una cisterna, desde donde será bombeada hasta el equipo ablandador; modelo WSF63-1800-3, serie SF-110F del fabricante norteamericano PUREAQUA INC; cuyo consumo eléctrico es de $1,59 \text{ kW}$ aproximadamente, con una entrega promedio de 245 GPM y máximo de 440 GPM de agua tratada, que cumple con el requerimiento de 253 GPM . (PURE AQUA, 2021)

Se utilizan 3 bombas durante el tratamiento de agua previo a su vaporización, una para bombear agua natural al reservorio inicial, otra para bombear desde el reservorio hasta el ablandador y finalmente una que impulse el agua hacia un intercambiador de calor de tubo y coraza, cuyo fluído caliente serán los gases de combustión que precalentarán al agua por ingresar a la caldera, como una oportunidad de balance energético favorable. Las características de las bombas se describen en el ítem 3.5.

Para la operación se ha de utilizar la caldera de vapor SHL, de la marca china TAISAHN GROUP, la cual puede generar vapor de media y alta presión, su capacidad de evaporación es de 10 a 75 toneladas de vapor por hora, lo que se ajusta al requerimiento de 57.34; por otro lado la especificación de presión también se ajusta ya que admite de 1,25 a 9,8 MPa, y se ha conceptualizado para 6,0 MPa, en el presente. Su eficiencia térmica de diseño es del 82%. (Taishan, 2021)

Para completar el ciclo Rankine, se debe contar con un intercambiador de calor de tubo y coraza, para condensar y/o enfriar el vapor de agua saliente de la turbina, por éste intercambiador va a pasar agua natural fría alimentada por una bomba centrífuga. El vapor ha de salir como agua condensada del intercambiador, y de ésta forma será bombeada a los tubos de la caldera nuevamente para empezar el ciclo.

3.5.4 Sistema de Generación Eléctrica

El vapor de agua sobrecalentado entregará energía calorífica a la turbina que la transforma en energía mecánica. Para alcanzar mejores rendimientos se prevé contar con una turbina de condensación, en la cual la presión de la mezcla líquido-vapor a la salida de la misma será menor a la atmosférica, ya que el calor latente disminuye en ésta etapa.

Para éste fin, se haría uso de la turbina de vapor SIEMENS SST-300, la cual consiste en un paquete que incluye la turbina, caja de cambios y generador; ésta turbina posee una sola carcasa, que transmite la energía por engranaje al generador que gira a razón de 1500 a 1800 RPM. Las condiciones del vapor que receipta son de hasta 14.000 MPa y de 540°C en promedio con producciones de 25 MW aproximadamente; dichas condiciones se ajustan a los requerimientos termodinámicos de la planta conceptualizada.

El sistema de generación está compuesto por los siguientes elementos:

- Carcasa de la turbina
- Rotor
- Palas de reacción
- Caja de cambios
- Bastidor de base
- Salida de escape

3.5.5 Sistema de Captura y Almacenamiento de Carbono

Los gases de combustión salientes de la chimenea, corresponden a 77% de dióxido de carbono y 23% a vapor de agua con ciertas trazas de material particulado propio de la quema de biomasa, que no es considerada para el análisis, ya que se prevé utilizar un precipitador electrostático de la marca BIONOMIC Industries, modelo HEI WESP; para atrapar estas partículas. (Industries, 2021)

Como parte del aprovechamiento de calor, estos gases pasan por un intercambiador de tubo y coraza, como fluido caliente, y por el otro extremo ingresa oxígeno proveniente del reservorio del proceso PSA, para ingresar a combustión pre calentado y que la operación se vuelva más eficiente, así mismo esto sirve para que los gases de combustión salgan con menor temperatura a compresión.

Según Aspelund & Jordal; 2007; los gases de combustión una vez liberados de escoria y material particulado, deben tener un tratamiento de compresión centrífuga multietapas, a presiones entre 100 y 150 BAR, para que se reduzca el volumen del gas y pueda ser transportado por tubería; esta operación también permite que el agua contenida en el gas se condense durante la compresión, ya que es un elemento indeseable por la corrosión en tuberías de transporte de Dióxido de carbono.

Se utilizaría un compresor centrífugo estacionario MSG-2/3 de la marca Ingersoll Rand, accionado con motor eléctrico, refrigerado por agua de baja presión que opera a 100 BAR, y recepta un caudal máximo de $280 \frac{m^3}{min}$, su potencia eléctrica es de 4.100 kW. (Rand, Direct Industry, 2021)

Para secar completamente al CO_2 , se utiliza al final del proceso de acondicionamiento, un absorbedor de alúmina de dos etapas, que retiene totalmente la humedad del gas. El equipo para éste fin es el secador HB, de la marca Ingersoll Rand, que acepta un flujo de $226 \frac{m^3}{min}$, que está en el rango de lo que se prevé procesar. (Rand, Direct Industry, 2021)

A continuación el CO_2 es transportado por tubería de acero al carbón, durante aproximadamente 300 kilómetros por gasoducto, desde la provincia de Pichincha donde estaría ubicada la planta, hasta la provincia de Sucumbíos en donde se encuentra uno de los yacimientos de petróleo más importantes del país; Shushufindi.

En el punto de inyección se encontrará un compresor centrífugo, modelo C1000 de la marca Ingersoll Rand; con flujo máximo de $220 \frac{m^3}{min}$, adecuado para el flujo enviado desde el punto de generación y presión de 10,5 BAR. El diagrama se muestra en la Figura 3.7.

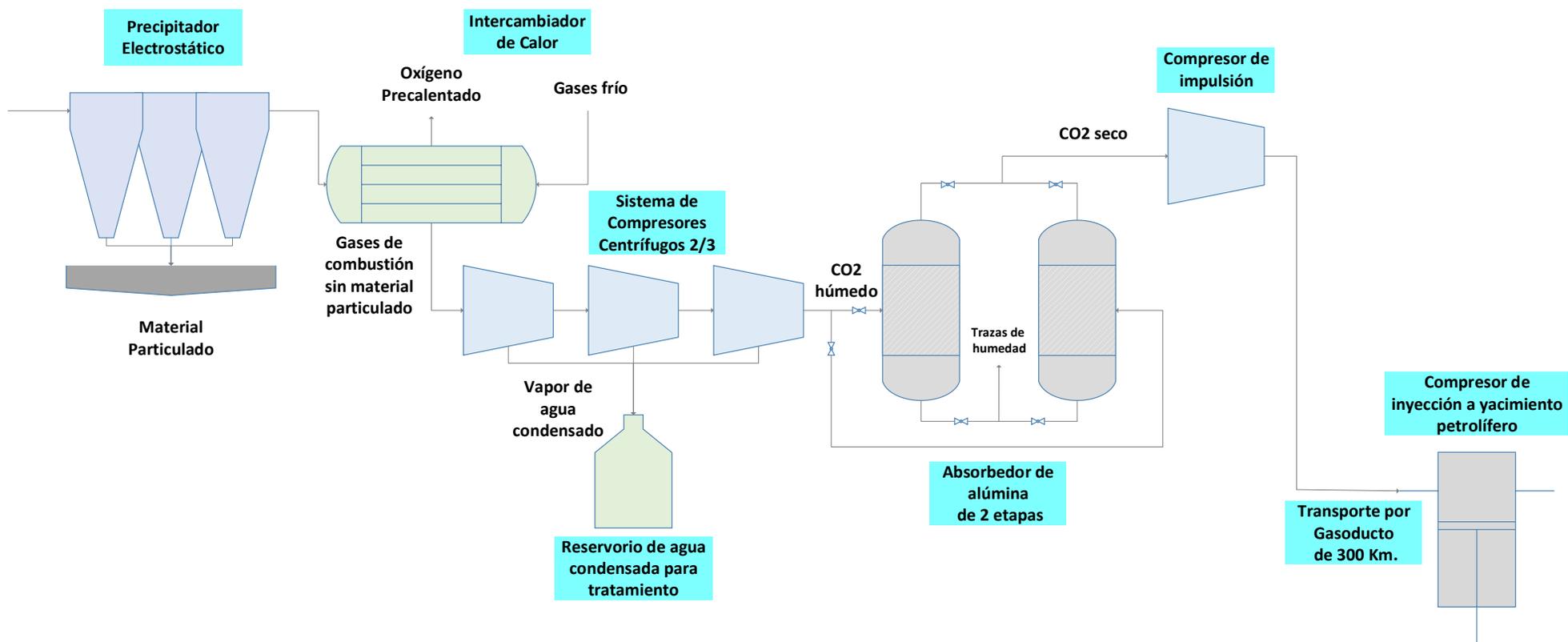


Figura 3.7: Diagrama de flujo de proceso de captura y almacenamiento de carbono.

Fuente: Elaboración propia; 2021.

3.6 Características técnicas de equipos de consumo energético del sistema.

Tabla 13: Especificaciones técnicas equipos de los procesos del sistema.

NOMBRE DEL EQUIPO	PROCESO	ESPECIFICACIÓN	RENDIMIENTO FABRICANTE	CAUDAL OPERACIONAL PARA DISEÑO CONCEPTUAL
ASTILLADORA HEM 560 DQ marca WEGER	Astillaje de troncos y ramas de eucalipto	Motor de 500 HP, procesamiento des de material de hasta 1 x 0,56 m	$180 \frac{m^3}{h}$	$124,10 \frac{m^3}{h}$
TRITURADORA PULVERIZADORA	Pulverización de astillas de eucalipto.	Motor de 100 HP, para procesamiento de astillas de hasta 175 mm	$59 - 163 \frac{ton}{h}$	$130 \frac{ton}{h}$
GENERADOR DE OXÍGENO PIONNER	Generación De oxígeno 90-95 % de pureza para combustión.	Conjunto de filtro, blower, 2 torres de absorción, tanque de presión. Consumo energético de $0,32 \frac{kWh}{m^3}$ de oxígeno	$12 \frac{ton}{h} - 58 \frac{ton}{h}$	$28,6 \frac{ton}{h}$
ABLANDADOR PURE AQUA.	Tratamiento de agua natural para caldera.	Ablandador de 3 m de altura y 60 cm de diámetro, con reposición de salmuera, consumo de energía de 1.59 kW	$38-62 \frac{ton\ agua}{h}$	$58 \frac{ton\ agua}{h}$
CALDERA SHL	Combustión de eucalipto	Caldera SHL con presión nominal de 1,25 a 9,8 MPa.	$10 - 75 \frac{ton_{vapor}}{h}$	$57,38 \frac{ton_{vapor}}{h}$
SISTEMA TURBINA-GENERADOR	Conversión de energía calórica en energía eléctrica,	Sistema de turbina, caja de cambios y generador; rotor giratorio de 1500 a 1800 RPM. CE?	Presiones permitidas < 14.000 MPa y 500-600 °C	6.000 Mpa y 600 °C
SISTEMA COMPRESOR MULTIETAPA; MODELO MSG-2/3, MARCA INGERSOLL RAND.	Compresión De CO ₂ , para reducir volumen y humedad.	Compresor centrífugo de 3 etapas, estacionario. Refrigerado Por agua de baja presión.	Presión de operación de 1450,38 PSI, caudal máximo de $280 \frac{m^3}{min}$ y potencia eléctrica de 4100 kW.	Presión Mayor a 1300 PSI y flujo másico mayor a $220 \frac{m^3}{min}$
ABSORBEDOR DE HUMEDAD HB, MARCA INGERSOLL RAND.	Secador de humedad del CO ₂ , para su transporte por tubería.	Absorbedor, de dos etapas con alúmina como material desecante.	Flujo másica de $226 \frac{m^3}{min}$, consumo eléctrico de 6,1 kW.	Flujo másico mayor a $220 \frac{m^3}{min}$
COMPRESOR DE INYECCIÓN CO ₂ . MODELO C 1000, MARCA	Inyectar CO ₂ a yacimiento de petróleo en Shushufindi.	Compreso centrífugo de inyección de gases. Consumo energético de 600 kW.	Flujo másico $220 \frac{m^3}{min}$	Flujo másico mayor a $220 \frac{m^3}{min}$

INGERSOLL RAND.				
BOMBA #1	Succión de agua de fuente natural para alimentar a toda la planta.	Bomba centrífuga, marca CDR Pompe, modelo UTS EVO con accionamiento magnético.	Caudal máximo de $300 \frac{m^3}{h}$, Presión de 232 psi. El consumo energético promedio es de 62 HP.	$200 \frac{m^3}{h}$
BOMBA #2	Bomba de alimentación al ablandador y el intercambiador de calor #1.	Bomba centrífuga, marca CDR Pompe, modelo UTN-L, con accionamiento magnético.	Caudal máximo de $150 \frac{m^3}{h}$, Presión de 232 psi. El consumo energético es de 50 HP, operando a su máxima capacidad.	$120 \frac{m^3}{h}$
BOMBA #3	Succión de agua del ablandador para alimentar al intercambiador de calor previo ingreso caldera.	Bomba centrífuga, marca CDR Pompe, modelo XTS, con accionamiento magnético.	Caudal máximo de $60 \frac{m^3}{h}$, Presión de 232 psi. El consumo energético es de 25,15 HP, operando a su máxima capacidad.	$57,50 \frac{m^3}{h}$
BOMBA #4	Bomba de succión del intercambiador de calor #2 y de retorno al flujo de alimentación a la caldera.	Bomba centrífuga, marca CDR Pompe, modelo XTS, con accionamiento magnético.	Caudal máximo de $60 \frac{m^3}{h}$, Presión de 232 psi. El consumo energético es de 25,15 HP, operando a su máxima capacidad.	$57,50 \frac{m^3}{h}$

Fuente: Elaboración Propia; 2021.

CAPÍTULO 4

Determinación de huella de carbono del sistema

4.1 Análisis de ciclo de vida

4.1.1 Definición de objetivo y alcance

El objetivo del presente es cuantificar las emisiones de gases de efecto invernadero de la generación de 1 MWh de energía eléctrica, como unidad funcional en un sistema que utiliza biomasa como combustible y que captura y almacena carbono.

Se desea tener una referencia de éste tipo de tecnología de generación eléctrica, más amigable con el medio ambiente, ya que no se quemarían combustibles fósiles, ni se estaría emitiendo gases de chimenea al ambiente, sino captándolo para almacenarlo debajo de la tierra.

Se prevé que éste estudio sirva para referencias académicas en el área de la ingeniería y el medio ambiente, así como una de las herramientas para el cambio de la matriz energética en el Ecuador y disminución de emisiones de gases de efecto invernadero.

Para comprobar si el resultado es un balance carbono negativo, se realizará un análisis de ciclo de vida cuantitativo con enfoque en la huella de carbono del sistema.

Se ha considerado para en análisis los procesos desde la siembra de eucalipto, transporte a la planta, tratamiento de agua natural y aire atmosférico, combustión, generación de electricidad; y todos los equipos principales y auxiliares que consumen energía eléctrica convencional.

Para obtener los datos se ha hecho uso de fuentes de información primaria como plantas de generación eléctrica con tecnologías similares existentes en el mundo así como las especificaciones de consumos energéticos de fabricantes de equipos tentativos.

En cuanto a los límites del sistema, el estudio se ha de realizar únicamente para la región Sierra del Ecuador, en las provincias de Pichincha, Cotopaxi e Imbabura; ya que la materia prima es extraída de estas provincias y la energía generada también sería consumida en ellas.

Todos los datos son analizados para un año de operaciones teóricas. El tipo de estudio de análisis de ciclo de vida, que se está desarrollando es atribucionall.

4.1.2 Análisis de Inventario

El diagrama de flujo del sistema completo se ilustra en la Figura 3.4. Con referencia en los procesos principales, se tiene el esquema de entradas y salidas de flujos naturales y de productos del sistema, en la Figura 4.1.

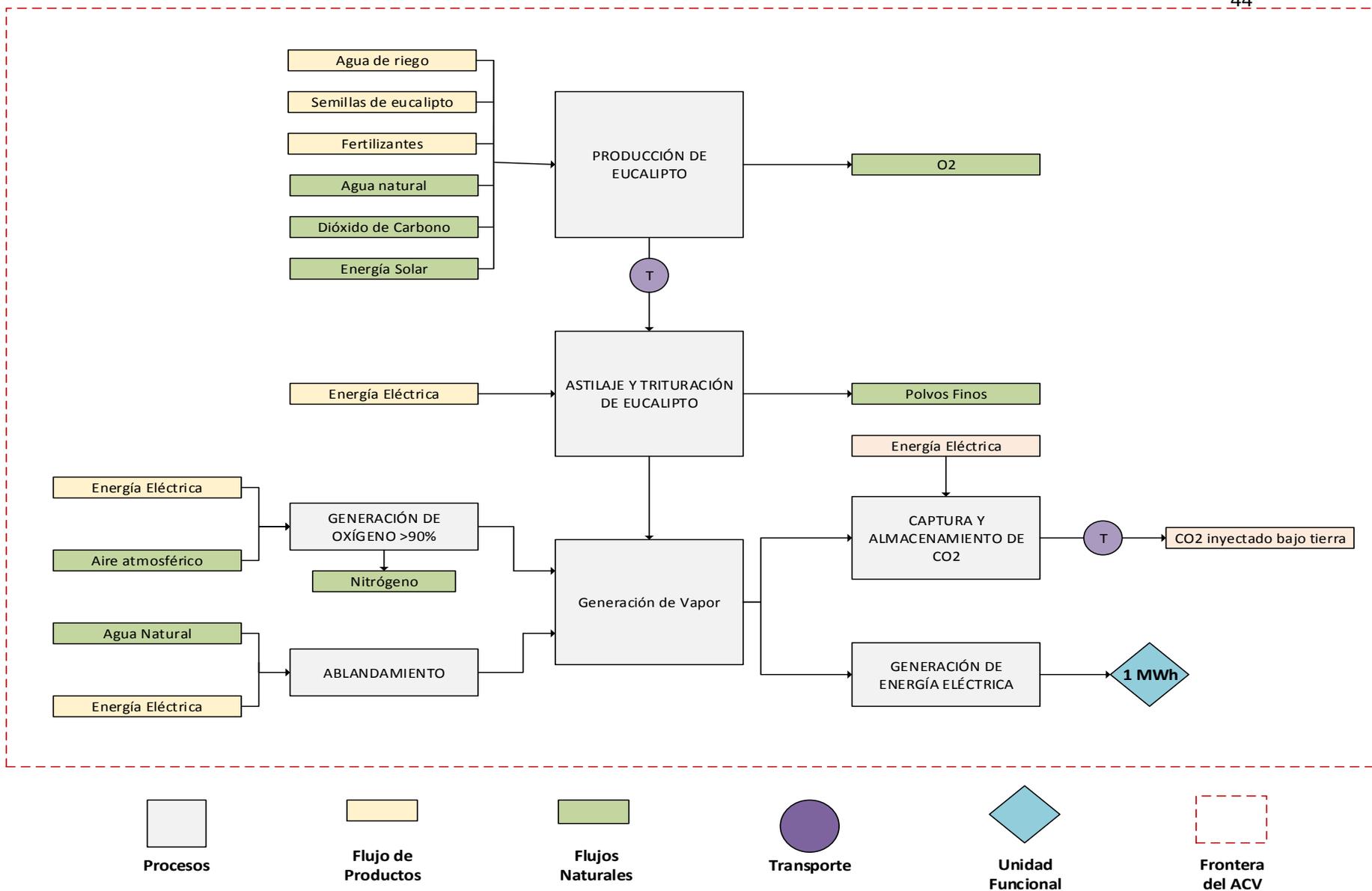


Figura 4.1: Esquema de entradas y salidas del sistema estudiado. Fuente: Elaboración propia; 2021.

Para lograr obtener los datos cuantitativos e ingresar al método de determinación de huella de carbono, se realizaron cálculos: termodinámicos en el ítem 3.4.1, estequiométricos en el 3.4.2 y se extrajo de las fichas técnicas de los equipos a utilizar las especificaciones de consumos energéticos, los cuales están detallados en la Tabla 13.

De esta forma se determinaron las cantidades de entradas y salidas para un año de operaciones; para llevarlos a la unidad funcional de 1 MWh.

Tabla 14: Entradas y Salidas de proceso de astillaje y trituración de biomasa

Astillaje y Trituración de biomasa.				
Entradas		Unidades	Cantidades Anuales	Cantidades por 1 ton eucalipto triturado
Flujos de productos	Energía Eléctrica Astilladora	MW-h	266,4	0,003199
	Energía Eléctrica Trituradora	MW-h	53,28	0,000640
	Eucalipto	Ton	90220	1,00
	Transporte	Ton-km	10826400	130,00
Salidas		Unidades	Cantidades Anuales	Cantidades por 1 ton eucalipto triturado
Flujos de productos	Biomasa triturada	Ton	83280	1,00
Flujos Naturales	Polvos Finos	Ton	6940	0,083333

Fuente: Elaboración propia; 2021

Tabla 15: Entradas y salidas de proceso de tratamiento de agua para caldera.

Tratamiento de agua de caldera				
Entradas		Unidades	Cantidades Anuales	Cantidades por 1 ton agua tratada
Flujos de productos	Energía eléctrica ablandador	MW-h	11,30	0,000028
	Energía eléctrica Bomba #1	MW-h	330,34	0,000810
	Energía eléctrica Bomba #2	MW-h	266,40	0,000653
	Salmuera	Ton	4,09	0,000010
Flujos naturales	Agua de río	Ton	407627,52	1,00
Salidas		Unidades	Cantidades Anuales	Cantidades por 1 ton agua tratada
Flujos de productos	Agua Blanda	Ton	407627,52	1,00
	Salmuera	Ton	4,09	0,000010

Fuente: Elaboración propia; 2021.

Tabla 16: Entradas y Salidas de proceso de generación de oxígeno

Generación de Oxígeno > 90%				
Entradas		Unidades	Cantidades Anuales	Cantidades por 1 ton de oxígeno producido
Flujos de productos	Energía Eléctrica	MW-h	44698,35024	0,219999
Flujos naturales	Aire atmosférico	Ton	966144	4,755245
Salidas		Unidades	Cantidades Anuales	Cantidades por 1 ton de oxígeno producido
Flujos de productos	Oxígeno 99%	Ton	203174,4	1,00
Flujos naturales	Nitrógeno 100%	Ton	760128	3,741259

Fuente: Elaboración propia; 2021

Tabla 17: Entradas y salidas de proceso de generación de vapor.

Generación de vapor				
Entradas		Unidades	Cantidades Anuales	Cantidades por 1 ton de vapor producido
Flujos de productos	Agua blanda	Ton	407627,52	1,00
	Biomasa Triturada	Ton	83280	0,204304
	Oxígeno	Ton	203174,4	0,498431
	Energía Eléctrica Bomba #3	MW-h	133,999	0,000329
	Energía Eléctrica Bomba #4	MW-h	133,999	0,000329
Salidas		Unidades	Cantidades Anuales	Cantidades por 1 ton de vapor producido
Flujos de productos	Vapor de agua producido	Ton	407627,52	1,00
Flujos naturales	Vapor de agua de gas de chimenea	Ton	50438,4	0,123736
	CO ₂ como gas de chimenea	Ton	164102,4	0,402579
	gases de combustión	Ton	214540,8	0,526315

Fuente: Elaboración propia; 2021

Tabla 18: Entradas y Salidas de proceso de generación de energía eléctrica.

Generación de energía eléctrica				
Entradas		Unidades	Cantidades Anuales	Cantidades por 1 MWh producido
Flujos de productos	Vapor de agua	Ton	407627,52	2,869000
Salidas		Unidades	Cantidades Anuales	Cantidades por 1 MWh producido
Flujos de productos	Condensado de vapor	Ton	407627,52	2,869000
	Energía Eléctrica	MW-h	142080	1,00

Fuente: Elaboración propia; 2021.

Tabla 19: Entradas y salidas de proceso de almacenamiento y captura de carbono.

Captura y Almacenamiento de carbono				
Entradas		Unidades	Cantidades Anuales	Cantidades por 1 Ton de CO₂ almacenado
Flujos de productos	Gases de Combustión	Ton	214540,8	1,00
	Energía Precipitador Electrostático	MW-h	577,90476	0,002694
	Energía Compresor 3 etapas	MW-h	29700,6696	0,138438
	Energía absorbedor de 2 etapas	MW-h	43,3344	0,000202
	Energía Eléctrica de inyección de CO ₂	MW-h	4262,4	0,019868
Salidas		Unidades	Cantidades Anuales	Cantidades por 1 Ton de CO₂ almacenado
Flujos de productos	CO ₂ enterrado a tierra	Ton	164102,4	0,764901
	agua a tratamiento	Ton	50274,6	0,234336
Flujos naturales	Fugas de CO ₂ de tuberías	Ton	164,1	0,000765

Fuente: Elaboración propia; 2021

4.2 Determinación de Huella de carbono

Para la determinación de la huella de carbono, se utilizó el software OPEN LCA, con la base de datos Ecoinvent 3.1.7.

Mediante el ingreso de datos de las cantidades de materias primas, energía eléctrica, y demás insumos para llevar a cabo un año de operaciones; la herramienta entrega el balance de impactos ambientales generados; sin embargo para efectos del proyecto, se segrega únicamente la huella de carbono.

La herramienta informática contiene bases de datos de las emisiones de acuerdo a la realidad del país, para éste caso se utilizaron los factores de emisión de la energía eléctrica producida en Ecuador, teniendo en cuenta que en un 60% aproximadamente proviene de hidroeléctricas. (Ramirez, 2020)

Los resultados están relacionados a la unidad funcional, que es 1 MWh como producto obtenido de todo el proceso.

Las cantidades de CO_2 generadas en cada proceso, se encuentran en la Tabla 20.

Tabla 20: Resultados de huella de carbono por procesos del sistema.

PROCESO	CANTIDAD	UNIDAD
Crecimiento de eucalipto	-0,70961	Kg de CO_2
Transporte de Biomasa	0,00685	Kg de CO_2
Astillaje y Trituración de biomasa	0,00033	Kg de CO_2
Tratamiento de Agua para caldera	0,00052	Kg de CO_2
Generación de Oxígeno >90%	0,0455	Kg de CO_2
Generación de electricidad	0,00027	Kg de CO_2
Captura, acondicionamiento y almacenamiento de CO_2	0,03645	Kg de CO_2
RESULTADO FINAL	-0,61969	Kg de CO_2

Fuente: Elaboración propia; 2021

La huella de carbono de 1 MWh de energía eléctrica producida mediante la generación de vapor utilizando eucalipto como combustible; con captura y almacenamiento de carbono; es de -0,62 Kg de CO_2 .

Éste es un sistema carbono negativo.

4.2.1 Análisis de Contribución

La huella de carbono del sistema conceptualizado es negativa, ya que el carbono contenido en el eucalipto ha sido removido de la atmósfera durante su crecimiento, utilizado para

generar energía y finalmente captado y almacenado en yacimientos de petróleo. Es por ello que en la Figura 4.2, la contribución en el proceso de crecimiento tiene signo negativo y a su vez es el de mayor magnitud con un -89% de contribución

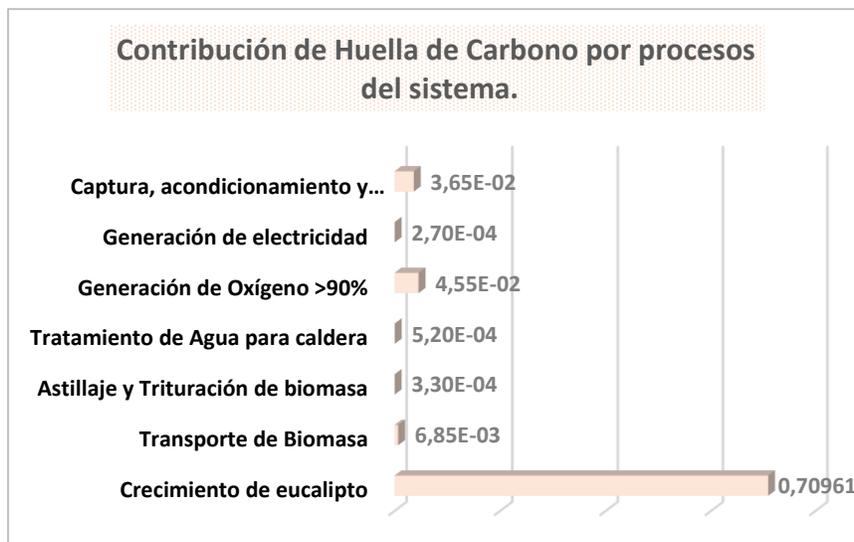


Figura 4.2: Contribución Porcentual de huella de carbono por proceso.
Fuente: Elaboración propia; 2021

Las emisiones de dióxido de carbono debidas a los procesos internos de la planta de generación eléctrica, suman el 11% de contribución a la huella de carbono, porcentaje que prácticamente se equipara por los procesos de generación de oxígeno y el de captura, acondicionamiento y almacenamiento de carbono con 6 y 4% respectivamente.

El origen de la huella de carbono de estos procesos es la energía que consumen mientras operan, sin embargo ya que aproximadamente el 60% de la energía eléctrica del Ecuador es generada mediante hidroeléctricas (Ramirez, 2020); esto se considera en el software OPEN LCA. La contribución por consumos energéticos eléctricos internos es baja como se puede ver en la Figura 4.2.

CAPÍTULO 5

Resultados y Discusión

5.1 Resultados

Los resultados se han alineado a los objetivos planteados en el ítem 1.3. Se tienen componentes cualitativos y cuantitativos; estos se detallan:

Se ha realizado el diseño conceptual del sistema de generación de energía eléctrica, utilizando eucalipto globulus triturado, como combustible, oxígeno al 90% de pureza como comburente y agua blanda para la generación de vapor.

Consiguientemente se capturaría dióxido de carbono de los gases de chimenea, por medio de la tecnología de oxidación, compresión de varias etapas y absorción de vapor de agua ligada.

La Eficiencia energética de la planta, las entradas y salidas relevantes y la cuantificación de los gases de efecto invernadero; se lograron determinar basándose en los datos de los ítems 3.4, 3.5, y 4.1.2. En la tabla 21 se muestran los resultados.

Tabla 21: Resultados del estudio

Parámetro	Forma de Obtención *	Unidad	Resultado
Eficiencia Energética Global sin considerar consumos energéticos del sistema.	$\frac{(E. Gen.)}{(E. comb.)}$	%	31
Eficiencia Energética considerando consumos energéticos de procesos, sin CAC.	$\frac{(E. Gen. - C. Total - C. CAC)}{(E. comb.)}$	%	21
Eficiencia Energética Global del sistema completo considerando todos los consumos energéticos.	$\frac{(E. Gen. - C. Total)}{(E. comb.)}$	%	14
Huella de Carbono del Sistema de la cuna a la puerta.	$\sum_{i=Obt.MP}^{CCA} emisionesCO_2$	$\frac{kg CO_2}{kWh}$	-0,62
*Energía Generada = E. Gen. *Energía entregada por el combustible= E. Comb. *Consumo energético total del sistema= C. Total *Captura y Almacenamiento de Carbono= CAC *Consumo de energía en Captura y Almacenamiento de Carbono= C. CAC *Materia Prima= MP			

Fuente: Elaboración propia; 2021.

Dentro de los procesos unitarios internos en la planta se utiliza parte de la energía producida. En la Tabla 22, se muestran la contribución de consumos energéticos de todos los procesos internos para la producción de 20 MWh y su posterior captura y almacenamiento de carbono.

Tabla 22: Contribución porcentual de consumo energético por proceso.

Proceso	Consumo energético	Contribución en el consumo total de la energía del sistema.
	MWh/año	%
Astillaje de eucalipto	266,4	0,33
Trituración de eucalipto	53,28	0,07
Ablandamiento de agua	11,30	0,01
Obtención de oxígeno >90% (Proceso PSA)	44698,35	55,54
Captura y Almacenamiento de Carbono	34584,30	42,98
Equipos auxiliares	864,72	1,07

Fuente: Elaboración propia; 2021

5.2 Discusión

La eficiencia energética global del sistema sin considerar consumos internos es de 31%, éste es un valor dentro del rango convencional de sistemas que utilizan combustibles fósiles en la generación de electricidad, que oscilan entre el 25 y 40% de eficiencia dependiendo del combustible. Por lo que el proyecto es viable en cuanto al uso de biomasa y las tecnologías utilizadas.

Si se considera en cambio a los consumos energéticos internos, únicamente en los procesos que implican la obtención de los 20 MWh de energía eléctrica; se tendría un 21% de eficiencia. Este 10% de energía se está consumiendo en gran parte por el proceso PSA para concentración de oxígeno que consume aproximadamente el 88% del consumo total de energía eléctrica en la planta sin considerar captura y almacenamiento de carbono.

Ahora bien; en cuanto a la eficiencia energética global del sistema considerando todos los gastos energéticos hasta la captura y almacenamiento de carbono, se tiene un 14% de eficiencia, ése 7% de disminución corresponde únicamente al gasto de energía eléctrica para comprimir, secar e inyectar el carbono en yacimientos de petróleo. Dado que estos procesos en conjunto consumen aproximadamente el 43% del gasto energético de la planta.

La huella de carbono del sistema ha resultado ser negativa, como se presumía al inicio del proyecto, en el balance general, de la Tabla 20, se nota como el proceso de crecimiento del eucalipto tiene un mayor valor aunque con signo negativo, esto indica que la cantidad de

carbono removida de la atmósfera e inyectada bajo tierra, es mayor que el carbono emitido por la obtención de materias primas, transporte y consumo de energía eléctrica interna; todo ello se explica también por la naturaleza de la energía eléctrica en el Ecuador que en un 60% aproximadamente utiliza agua natural y no combustibles fósiles que son los que emiten dióxido de carbono a la atmósfera. (Ramírez, 2020)

En el estudio de Ramírez et al. 2020 se determinó el ciclo de vida de diferentes sistemas de producción de energía en el Ecuador. Se han tomado los valores únicamente del potencial de calentamiento global, expresado en $\frac{kg CO_2}{kWh}$, en la tabla 23 se presentan estos resultados.

Tabla 23: Huella de carbono por tipo de tecnología de generación eléctrica en el Ecuador.

Tecnología de Generación Eléctrica	Unidades	Resultado de Huella de Carbono
Hidroeléctrica de Presa.	$\frac{kg CO_2}{kWh}$	0,00838
Hidroeléctrica de Pasada.		0,00314
Turbinas accionadas por gas natural.		0,680
Generación de vapor por Fuel Oil.		0,932
Motores de combustión interna accionados por Fuel Oil		0,776
Turbina de gas por diesel		0,945

Fuente: Ramírez; 2020.

Si se obtiene un promedio de la huella de carbono de las 4 últimas tecnologías de la Tabla 23 (termoeléctricas), todas ellas operando con combustibles fósiles, el resultado es $0,83 \frac{kg CO_2}{kWh}$, comparando con el valor de $-0,62 \frac{kg CO_2}{kWh}$ resultante del presente estudio; existiría una disminución del 75% aproximadamente de emisiones de carbono a la atmósfera; éste es un valor aceptable, dado que las tecnologías utilizadas para capturar y almacenar el dióxido de carbono, consumen gran cantidad de energía eléctrica.

Si bien el proceso de Captura y Almacenamiento de Carbono por oxidación, acarrea consumo de energía y recursos que no son contempladas en procesos convencionales que utilizan combustibles fósiles y no realizan CAC. El balance general indica que es mucho más beneficioso para mitigar el cambio climático, que los procesos convencionales, en términos de huella de carbono.

CAPÍTULO 6

Conclusiones y Recomendaciones

6.1 Conclusiones

1. El sistema de producción de energía que se plantea en el presente estudio tiene potencial de ponerse en práctica, ya que las eficiencias energéticas globales de 31% si no se consideran los consumos energéticos totales dentro de la planta y 14% si se consideran todos estos. Los resultados son alentadores y coherentes de acuerdo a la realidad nacional y global en plantas de generación eléctrica mediante la producción de vapor.
2. La mayor contribución de gasto energético dentro de la planta la tienen, precisamente los procesos que tienen como fin capturar e inyectar el carbono bajo tierra; esto es La generación de oxígeno > 90% por proceso PSA que abarca el 55,54% necesario para que se dé la combustión completa y una consiguiente captura y almacenamiento de carbono, cuyas operaciones unitarias consumen el 42,98% de la energía consumida.
3. La huella de carbono del sistema conceptualizado es negativa, con un valor de $-0,62 \frac{kg CO_2}{kWh}$ frente al resultado de termoeléctricas que operan sin captura y almacenamiento de carbono y que además utilizan recursos no renovables para sus operaciones que en promedio tienen una huella de $0,83 \frac{kg CO_2}{kWh}$, es decir que utilizando la tecnología BECCS, se estaría inyectando bajo tierra el 75% de las emisiones que actualmente sistemas convencionales que utilizan combustibles fósiles están generando.
4. El Resultado de la huella de carbono ha sido alentador ya que en el país existe potencial de uso de suelo para la producción de biomasa con fines energéticos además de que el dióxido de carbono puede ser enterrado bajo tierra por la facilidad geográfica y el suministro de insumos.
5. Con los resultados finales de éste proyecto, que corresponden a una conceptualización con datos reales del Ecuador, gracias a otros estudios previos; a priori se estaría cumpliendo con 5 objetivos del desarrollo sostenible; estos son:
 - **Uso de energía asequible y no contaminante:** Si bien el eucalipto globulus es una especie natural que debe tener un tiempo considerable de crecimiento para su utilización, no deja de ser un recurso renovable, que naturalmente descontamina a la atmósfera; adicional a ello se realizaría captura y almacenamiento de carbono; todo ello, la convierten en energía no contaminante.
 - **Industria, innovación e infraestructura:** La energía eléctrica es un insumo vital en las industrias, además de que la infraestructura usada en la obtención de insumos y CAC; que se plantean en éste proyecto, la hacen innovadora

- **Ciudades y comunidades sostenibles:** De acuerdo al Balance Nacional de energía 2019, del Ministerio de energía y recursos no renovables; en Pichincha se consumieron 4000 GWh durante ése año, con la producción de la planta conceptualizada en este proyecto, se estaría suministrando un 3,5% de energía a esa provincia, esto sólo si se utiliza un 10% de la biomasa disponible, si se llegara a utilizar la totalidad; se tendría un 30% aproximadamente de la energía consumida por toda la provincia, suministrada por plantas BECCS.
- **Producción y consumo responsable:** Aun cuando la tecnología propuesta no es parte de la realidad nacional actual, desde la academia se están haciendo esfuerzos para encontrar nuevas y mejores formas de obtención de energía eléctrica como parte de su responsabilidad social.
- **Acción por el clima:** Al tener una huella de carbono de -0,62% que representa al 75% del valor promedio de generación de carbono de termoeléctricas del país, se contribuiría grandemente a éste objetivo.

6.2 Recomendaciones

1. Estudiar las operaciones unitarias de generación de oxígeno >90% y las de compresión multietapas del dióxido de carbono al final del proceso; para encontrar oportunidades de conservación de materia y energía, ya que entre ambas acaparan el 98,52% de la energía consumida en la planta.
2. Investigar sobre los poderes caloríficos de especies nativas en el Ecuador, para sistemas similares al estudiado en éste proyecto; ya que el poder calorífico es directamente proporcional a la cantidad de carbono removida de la atmósfera, por ende entregará más energía al proceso y se inyectará más carbono a tierra.
3. Éste es un estudio conceptual del sistema de generación eléctrica mediante la tecnología BECCS, ya que el objetivo principal fue el de contabilizar la huella de carbono, no se profundizó en diseño propio de equipos, sino que se buscaron en el mercado según las especificaciones. Se recomienda estudiar a detalle el diseño dentro del Ecuador para incentivar la producción nacional y ahorrar recursos.
4. Se recomienda a los Gobiernos seccionales, la revisión de esta información para que se estudien posibilidades de uso de tecnologías similares para contribuir al cambio de la matriz energética en el país, ya que un 40% de la producción de energía nacional, aproximadamente aún depende de combustibles fósiles.

BIBLIOGRAFÍA

- Biomasse, W. (2019). *Weger-Biomasse.it*. Obtenido de <http://www.weger-biomasse.it/triturado.html>
- CBEA, C. B. (2021). *CALBIOMASS*.
- Center, T. B. (2009). Obtenido de <https://web.archive.org/web/20080218094403/http://www.brownfieldstsc.org/glossary.cfm?q=1>
- Electricidad, A. d. (2018). *Atlas del Sector Eléctrico Ecuatoriano*. Quito, Ecuador.
- EPA. (2019). *EPA United States Environmental Protection Agency*. Obtenido de EPA EPA United States Environmental Protection Agency: <https://www.epa.gov/ghgemissions/inventory-us-greenhouse-gas-emissions-and-sinks>
- Eseficiencia. (2012). *eseficiencia.es*. Obtenido de <https://www.eseficiencia.es/2012/01/16/cogeneracion-con-biomasa>
- Fajardy, M. (2018). Investigating the BECCS resource nexus. *Energy & Environmental Science*.
- Fernández, J. (2003). *Energías Renovables para todos*. IBERDROLA.
- Industries, B. (2021). *Direct Industry*. Obtenido de <https://pdf.directindustry.es/pdf-en/bionomicind/hei-high-energy-ionizer-wet-electrostatic-precipitator/57983-66925.html#open376105>
- IPCC. (2013). *ipcc.ch*. Obtenido de https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/08/WGI_AR5_glossary_ES.pdf
- IPCC, C. I. (2005). *Carbon Capture and Storage*. Cambridge.
- Kemper, J. (2015). Biomass and carbon dioxide capture and storage: A review. *ELSEVIER*.
- Kristin, A. A. (2007). Gas conditioning-The interface between CO2 capture and transport. *ELSEVIER*.
- Machine, G. (2021). *cell-prep.pl*. Obtenido de <https://cell-prep.pl/products/cs-trituradora-de-cono.html>
- Nacional, I. F. (2014). Rentabilidad de la inversión en plantación de eucalyptus con fines maderables. Paraguay.
- Parra, C. (2020). *Sustainable second-generation bionergy alternatives for Ecuador*. Universidad de Valladolid, Escuela de Doctorado . Valladolid: Escuela de Doctorado.
- PIONEER. (2021). *vpsatech.com*. Obtenido de <https://www.vpsatech.com/VPASA-Oxygen.html#local>

- Pozas, J. A. (2012). *Proyecto básico de una planta de biomasa de eucalipto globulus en España*. Madrid, España.
- Pozas, J. A. (2012).
- PURE AQUA, I. (2021). *es.pureaqua.com*. Obtenido de <https://es.pureaqua.com/content/pdf/suavizadores-de-agua-industrial-serie-sf-110f.pdf>
- Ramirez, A. (2020). Life cycle methods to analyze the environmental sustainability of electricity. *ELSEVIER*.
- Rand, I. (2021). *Direct Industry*. Obtenido de <https://www.directindustry.es/prod/ingersoll-rand/product-5703-1878205.html>
- Rand, I. (2021). *Direct Industry*. Obtenido de <https://www.directindustry.es/prod/ingersoll-rand/product-5703-445954.html>
- renovables, M. d. (2019). *Balance energético Nacional*. Ecuador.
- Secretaría de energía de Argentina . (2008). *Energía Renovable 2008-Energía Biomasa*. Buenos Aires, Argentina.
- Taishan, G. (2021). *Direct Industry*. Obtenido de <https://www.directindustry.es/prod/taishan-group-tai-an-boao-international-trade-co/product-162338-2351877.html>
- Unidas, N. (2019). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Obtenido de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>
- Vázquez, B. L. (2017). *Estudio de las posibilidades de uso de residuos forestales de la granja IRQUIS, para generación de energía eléctrica*. Cuenca, Ecuador.

ANEXOS

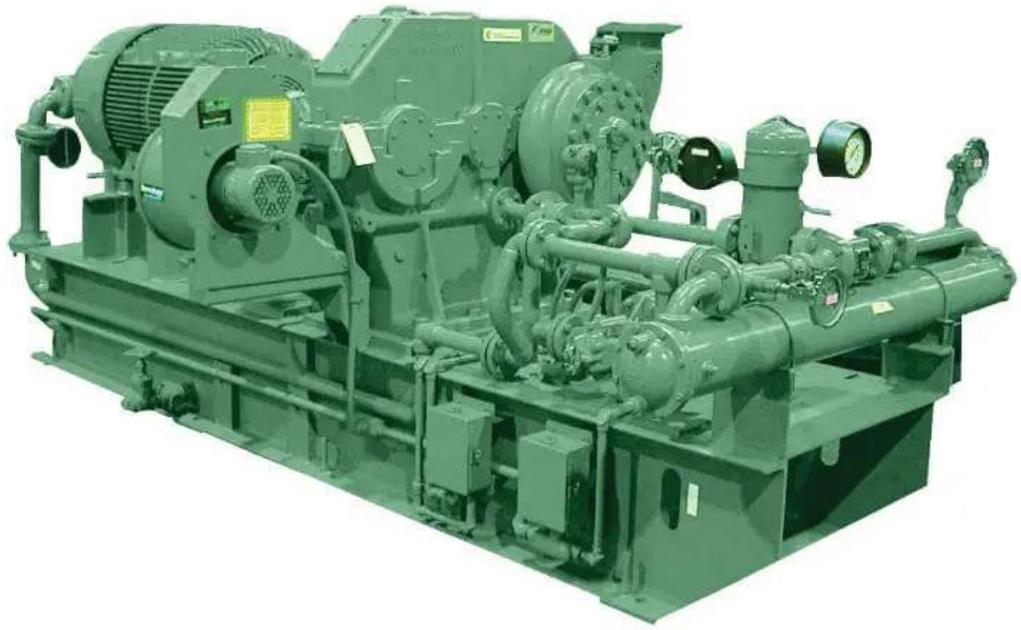
ANEXO A:

Fotografías de equipos a utilizar según su fabricante









ANEXO B: Información técnica de Equipos a utilizar

Origin of SPOX Oxygen Generator

In recent years, there has been a growing demand for small and medium-sized oxygen plant with rapid development of the national economy. PKU PIONEER, seizing the market opportunity with its advanced technology and rich engineering experience of nearly 200 sets of oxygen plant, customized the new skid-mounted VPSA oxygen plant for users in need of small and medium oxygen generation system through its continuous innovative research and development—the SPOX oxygen generator, which has remarkable advantages on the stability, simplicity, efficiency and energy conservation.



Technical Principle

Adsorption process: the pressurized ambient air is passed through the adsorption vessel, where the impurity gases (i.e. predominantly nitrogen) are preferentially adsorbed by the molecular sieve. Oxygen is enriched at the top of the adsorption vessel, then enters an oxygen buffer tank to supply oxygen to the downstream.

Desorption process: after the molecular sieve is saturated by adsorption, the valves are switched to allow the blower to reverse and vacuumize, thus restoring the adsorption capacity of the molecular sieve. In this stage, oxygen is continuously supplied to the downstream from the oxygen buffer tank.



Technical Advantages

Advanced single-vessel process

Compared with the traditional double-vessel process, the world-leading single-vessel process requires less equipment but brings more stable performance with easier operation and maintenance.

High-efficiency lithium-based molecular sieve

With a lithium ion exchange rate of over 99%, the third-generation lithium-based molecular sieve PU-8 has advantages like high N₂ & O₂ selectivity, large bulk density, uniform particles, long service life, etc. The molecular sieve bed stability is effectively guaranteed with our proprietary automatic filling technology.

Special valves for oxygen generation

Special valves for oxygen plant are more suitable for VPSA oxygen generation process. With good sealing, fast switching speed, stable performance and other characteristics, the valves offer outstanding low failure rate and simple maintenance.

Modular integrated design

Compared with the conventional double-vessel process, the generator is more compact and the plot area can be reduced by more than 20%.

Low operation cost

The power consumption is as low as 0.35kWh/Nm³ and the annual maintenance cost is 30% lower than that of a common PSA oxygen generator. The annual comprehensive operation cost is also reduced by more than 50%, compared with the cost of other common PSA oxygen generators or purchasing liquid oxygen.



SPOX

About PKU

Founded in 1999 and affiliated to Peking University, PKU PIONEER is mainly engaged in research and development of PSA gas separation technology, design and manufacture of complete sets of equipment, and production of highly efficient adsorbents and catalysts. Based on the industrial gas field and oriented to environmental protection, we've been devoting ourselves to the research of gas separation technology since the establishment, continuously providing advanced technologies and high-quality products for gas separation. After more than a decade of development, a perfect-quality inspection system and a pre-sale and after-sale service system have been formed.

PKU PIONEER has won the second prize of National Award for Technological Invention awarded by the State Council and the first prize of Science and Technology Progress Award awarded by the Ministry of Education. Our VPSA gas separation technology ranks at the world's leading level.

SPOX Oxygen Generator Models & Parameters

No.	Model	Capacity (Nm ³ /h)	Purity(%)
1	SPOX-50	40-50	90-93
2	SPOX-80	60-85	90-93
3	SPOX-100	80-105	90-93
4	SPOX-120	100-125	90-93
5	SPOX-150	120-155	90-93
6	SPOX-200	180-210	90-93
7	SPOX-250	200-280	90-93
8	SPOX-300	240-310	90-93
9	SPOX-320	250-330	90-93
10	SPOX-400	300-415	90-93
11	SPOX-450	380-470	90-93

Application Fields

SPOX oxygen generator is widely used in water treatment, flue gas ozone denitrification, kiln combustion supporting, pulp bleaching, aquaculture and other fields...

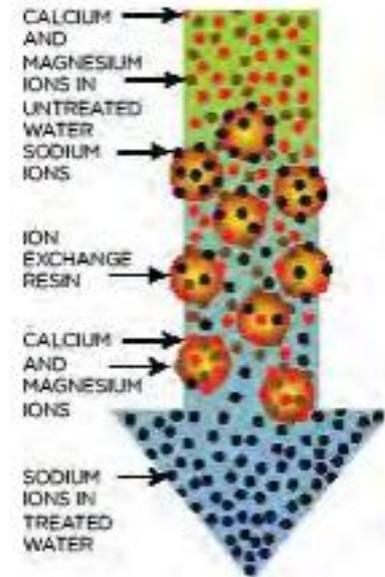
Suavizador de Agua Industrial

Tanques de Acero: Diametro de 14"- 63"

SF-110F
SERIES

Operating Specifications

- Presion de operacion: 30-100 psi
- Temperatura: 35°-110°F
- Influyente TDS: 0-3000 PPM
- Bacteria Patogenas: 0 CFU
- Influyente de Dureza: 0-90 gpg
- Rango de pH: 5-14
- Cloro Libre: 0-0.5 mg/l
- Cloramina: 0-0.5 mg/l
- Turbidez: 0-5 NTU
- Solidos Suspendidos: < 5ppm



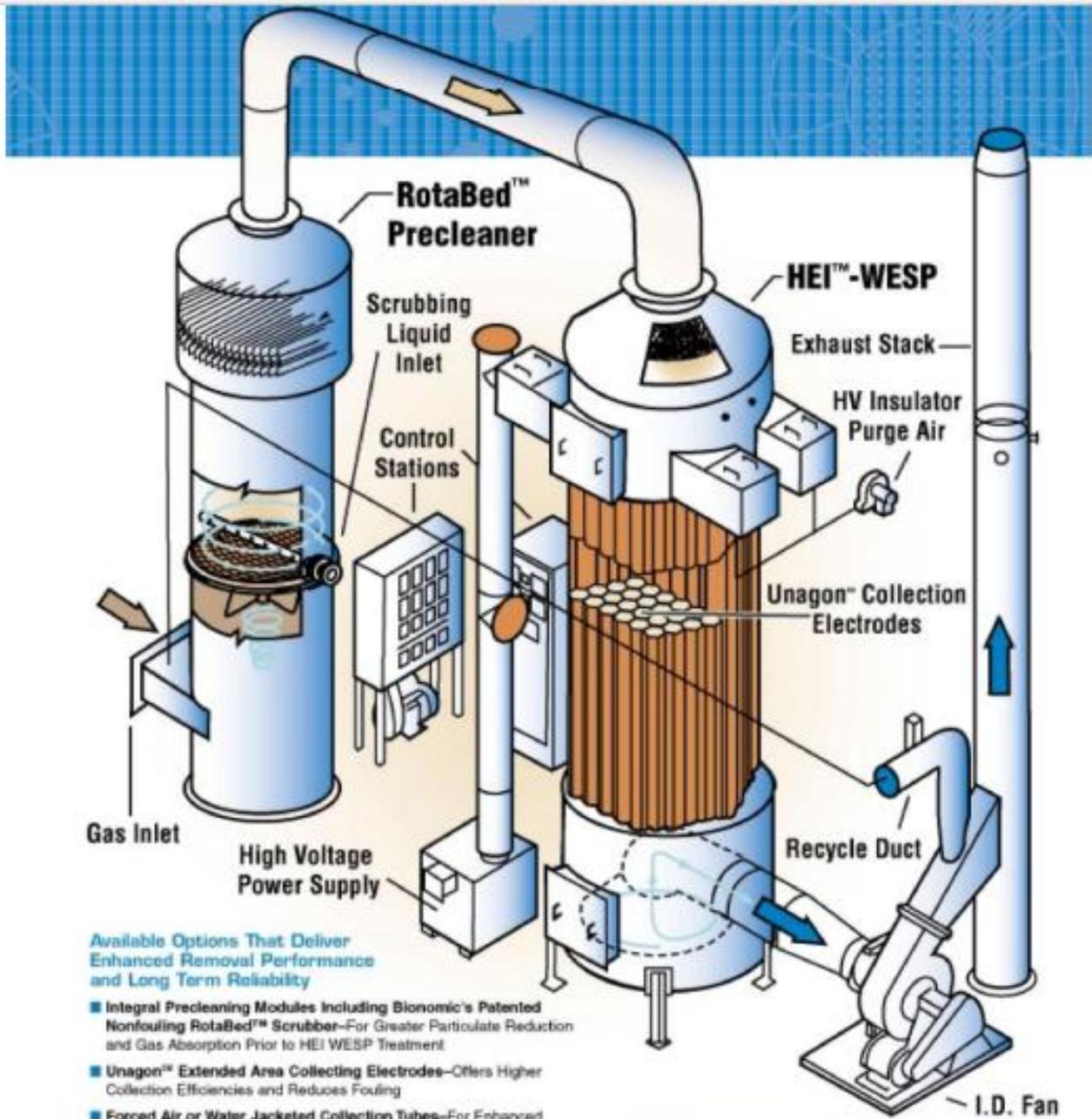
Capacidad de intercambio depende de la cantidad de resina de intercambio iónico en el ablandador y la cantidad de sal utilizada para la regeneración de la resina. Caudal máximo es un dato importante en el caso del suministro de agua no continua y se mide en galones por minuto (GPM).

Pure Aqua suministra una línea de suavizadores estándar y totalmente personalizado, los cuales han sido diseñados utilizando un avanzado sistema en 3D para soluciones precisas y personalizadas.

Capacidad de intercambio depende de la cantidad de resina de intercambio iónico en el ablandador y la cantidad de sal utilizada para la regeneración de la resina. Caudal máximo es un dato importante en el caso del suministro de agua no continua y se mide en galones por minuto (GPM).

Pure Aqua suministra una línea de suavizadores estándar y totalmente personalizado, los cuales han sido diseñados utilizando un avanzado sistema en 3D para soluciones precisas y personalizadas.





Available Options That Deliver Enhanced Removal Performance and Long Term Reliability

- **Integral Precleaning Modules** Including Bionomic's Patented **Nonfouling RotaBed™ Scrubber**—For Greater Particulate Reduction and Gas Absorption Prior to HEI WESP Treatment
- **Unagon™ Extended Area Collecting Electrodes**—Offers Higher Collection Efficiencies and Reduces Fouling
- **Forced Air or Water Jacketed Collection Tubes**—For Enhanced Condensation-Forced Washing and Particle Collection
- **Improved Corrosion-Resistant Materials of Construction**—Including FRP (Fiberglass Reinforced Polyester) Collection Electrodes and Upper and Lower Housing Compartments
- **Complete Air Pollution Control System Components**—Ductwork, Stack, Fan, Chemical Feed Systems, Water and Effluent Treatment Systems, Instrumentation and Controls, and Other Required Options
- **Complete HEI WESP System Engineering Support Services**—Erection Supervision, Startup Assistance, and Operator Training



Better voltage and spark controls for maximum electrical field stability



Right EZ Align™ discharge electrodes with tube type collecting electrodes

be cleaned due to sticky or scale forming particulates.

Long-Life Gears

25-year rated, uniformly hardened gears provide extreme reliability

Efficient Impeller Design

Backward leaning impellers provide constant pressure control while maximizing efficiency and turndown range

Moisture Separator

Stainless steel moisture separator provides superior reliability and helps prevent corrosion, ensuring high air quality

Coolers

Precisely engineered coolers maintain a low pressure drop and the large surface area provides maximum cooling efficiency. The integral cooler design helps the compressor keep a compact footprint*

*Optional external configurations available

High Capacity Bearings

Hydrodynamic bearings are completely non-contact, offering virtually unlimited life and maximum efficiency with 2-3 times the lifespan of traditional bearings

Rotors

High grade steel rotors are fully balanced and require no coating, providing constant performance over time

Seals

Fully floating, non-contact carbon ring seals minimize air leakage and prevent oil from migrating into the compressed air stream; single-piece seal construction provides significantly better performance than other technologies, saving valuable compressed air

Diffuser

Optimally designed to work with Ingersoll Rand's backward leaning impellers for maximum efficiency

