Interfaz de usuario gráfica, Texto, Word

Descripción generada automáticamenteTexto

Descripción generada automáticamente

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES

FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

APORTE DE ENERGÍA ELÉCTRICA RENOVABLE DE UNA PLANTA DE BIOGÁS EN LA REGIÓN DE LOS LAGOS COMO INICIATIVA DE

ECONOMÍA CIRCULAR

HERMANN KURT REISENEGGER VÁSQUEZ

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL

PROFESOR GUÍA: ANDRÉS HOWARD MATTE

PROFESOR GUÍA EXTERNO: MARÍA MARTINEZ V.

SANTIAGO, SEPTIEMBRE 2023

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES

FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

**AGRADECIMIENTOS**

*En primer lugar, quiero agradecer a mis padres, Mathias y Pilar, por el incondicional apoyo durante los largos años de carrera.*

*En segundo lugar, quiero agradecer a mis amigos del colegio, de la universidad, de mi querida decimoquinta compañía de bomberos y de la vida por apoyarme y estar presentes en los momentos difíciles.*

*En tercer lugar, quiero agradecer a mi Guía interno, Andrés Howard, por la ayuda durante el proceso de redacción de mi proyecto de título.*

*Por todo lo mencionado anteriormente, gracias.*

**ÍNDICE GENERAL**

[RESUMEN ix](#_Toc144751173)

[1. INTRODUCCIÓN 1](#_Toc144751174)

[1.1 MOTIVACIÓN DE LA MEMORIA 1](#_Toc144751175)

[1.2 ANTECEDENTES 2](#_Toc144751176)

[1.2.1 Energía 2](#_Toc144751177)

[1.2.2 Economía circular 2](#_Toc144751178)

[1.2.3 Planta de biogás 3](#_Toc144751179)

[1.3 OBJETIVOS 3](#_Toc144751180)

[1.3.1 Objetivo general 4](#_Toc144751181)

[1.3**.**2 Objetivos específicos 4](#_Toc144751182)

[1.4 METODOLOGÍA 4](#_Toc144751183)

[1.4.1 Disponibilidad residuos forestales 4](#_Toc144751184)

[1.4.2 Residuos necesarios 5](#_Toc144751185)

[1.4.3 Modelamiento 6](#_Toc144751186)

[1.5 ALCANCES 6](#_Toc144751187)

[2. MARCO TEÓRICO 7](#_Toc144751188)

[2.1 ENERGÍA 7](#_Toc144751189)

[2.1.1 Sistemas de interconexión en Chile 7](#_Toc144751190)

[2.1.2 Energías renovables 7](#_Toc144751191)

[2.1.3 Futuro energético en Chile 8](#_Toc144751192)

[2.2 ECONOMÍA CIRCULAR 12](#_Toc144751193)

[2.2.1 El modelo económico tradicional 12](#_Toc144751194)

[2.2.2 ¿Por qué tenemos que cambiar a una economía circular? 13](#_Toc144751195)

[2.3 BIOGÁS 14](#_Toc144751196)

[2.3.1 Parámetros del biogás 15](#_Toc144751197)

[2.3.2 Aplicaciones del biogás 17](#_Toc144751198)

[2.3.3 Beneficios del biogás 17](#_Toc144751199)

[2.4 PLANTA DE BIOGÁS 18](#_Toc144751200)

[2.4.1 Componentes de una planta de biogás 19](#_Toc144751201)

[2.4.2 Funcionamiento de una planta de biogás 20](#_Toc144751202)

[2.4.3 Cálculo de energía producida 23](#_Toc144751203)

[2.4.4 Beneficios de una planta de biogás 25](#_Toc144751204)

[3. INDUSTRIA DEL ASERRÍO 27](#_Toc144751205)

[3.1 VOLUMEN DE PRODUCCIÓN 28](#_Toc144751206)

[3.2 PRINCIPALES ESPECIES PLANTADAS 32](#_Toc144751207)

[3.3 ASERRADEROS 33](#_Toc144751208)

[3.4 RESIDUOS FORESTALES 37](#_Toc144751209)

[3.4.1 Clasificación residuos forestales 37](#_Toc144751210)

[3.4.2 Disponibilidad de residuos forestales 37](#_Toc144751211)

[3.4.3 Distribución 39](#_Toc144751212)

[3.4.4 Composición 42](#_Toc144751213)

[3.4.5 Destino de los residuos 44](#_Toc144751214)

[4. DESARROLLO Y RESULTADOS 46](#_Toc144751215)

[4.1 DISPONIBILIDAD RESIDUOS FORESTALES 46](#_Toc144751216)

[4.2 RESIDUOS NECESARIOS 51](#_Toc144751217)

[4.3 MODELAMIENTO DE TRANSPORTE 54](#_Toc144751218)

[5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN 61](#_Toc144751219)

[5.1 DISPONIBILIDAD RESIDUOS FORESTALES 61](#_Toc144751220)

[5.2 RESIDUOS NECESARIOS 65](#_Toc144751221)

[5.3 MODELAMIENTO 70](#_Toc144751222)

[6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 74](#_Toc144751223)

[7. BIBLIOGRAFÍA 76](#_Toc144751224)

[8. ANEXOS 85](#_Toc144751225)

[ANEXO 1: CÁLCULOS RESIDUOS NECESARIOS 85](#_Toc144751226)

[ANEXO 2: LISTA ASERRADEROS 89](#_Toc144751227)

[ANEXO 3: COMPRENDIO CARTOGRÁFICO 92](#_Toc144751228)

[ANEXO 4: CÓDIGO DE PYHTON 94](#_Toc144751229)

[ANEXO 5: RESULTADOS MODELAMIENTO 101](#_Toc144751230)

**INDICE DE TABLAS**

TABLA N°1: PARÁMETROS DEL BIOGÁS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA……………………………………………………………………………….........15

TABLA N°2: COMPARACIÓN DISTINTOS GASES. FUENTE: (VARNERO, 2011)………………………………….................................................................................16

TABLA N°3: CONSUMO, EFICIENCIA Y PRODUCCIÓN POR REGIÓN PRODUCTIVA, 2021. FUENTE: (INFOR, 2022a)……………..…….………..................31

TABLA N°4: PARÁMETROS PINO RADIATA. (BARRIA, SANDOVAL Y GERSON, 2017).………………………………………………………………………………………33

TABLA N°5: DISTRIBUCIÓN VOLUMEN RESIDUOS SEGÚN TIPO DE RESIDUO Y ASERRADERO, 2021. FUENTE: (INFOR, 2022c)..……………………….…………….38

TABLA N°6: CONTINUACIÓN TABLA N°5, 2021. FUENTE: (INFOR, 2022c).……...38

TABLA N°7: VOLUMEN EN M3 DE RESIDUOS FORESTALES POR TIPO Y RANGO PRODUCTIVO, 2021. FUENTE: (INFOR, 2022c)...……………………………..………41

TABLA N°8: COMPOSICIÓN RESIDUO FORESTAL EN M3 POR RANGO PRODUCTIVO, 2021. FUENTE: (INFOR, 2022c). ……….…….……………………….42

TABLA N°9: DENSIDAD POR RESIDUO DEL ASERRÍO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON BASE EN (LESMES ET AL., 2006)…………………......……………….43

TABLA N°10: DESTINO SUBPRODUCTOS EN M3 POR RANGO PRODUCTIVO, 2021. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON BASE EN (INFOR, 2022c)…….....…44

TABLA N°11: NÚMERO DE ASERRADEROS POR TIPO Y RANGO PRODUCTIVO, 2021. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON BASE EN (INFOR, 2022b)……..…...46

TABLA N°12: VOLUMEN EN M3 DE RESIDUOS FORESTALES POR TIPO Y RANGO PRODUCTIVO, 2021. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON BASE EN (INFOR, 2022c)…………………………………………………………….......………….46

TABLA N°13: VOLUMEN EN M3 PROMEDIO DE RESIDUOS POR TIPO DE ASERRADERO, 2021. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON BASE EN (INFOR, 2022c).……………………………………………………………………………………...47

TABLA N°14: VOLUMEN CON DESTINO A SER COMERCIALIZADO MENSUALMENTE, 2021. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON BASE EN (INFOR, 2022c)………………………………………………………...………………….48

TABLA N°15: DENSIDAD RESIDUO FORESTAL POR TIPO DE ASERRADERO, 2021. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA ……………………………..........................50

TABLA N°16: RESUMEN RESULTADOS Y DESARROLLO 4.1, 2021 FUENTE: ELABORACION PROPIA CON BASE EN (INFOR, 2022c)……...…………………….51

TABLA N°17: PARÁMETROS CONVERSIÓN ENERGÉTICA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA...................................................................................................52

TABLA N°18: CÁLCULO RESIDUOS MENSUALES NECESARIOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA……………………………………………………………...…53

TABLA N°19: CONJUNTOS MODELAMIENTO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA…………………………………………………………………………………….55

TABLA N°20: PARÁMETROS MODELAMIENTO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA…………………………………………………………………………………….56

TABLA N°21: VARIABLES MODELAMIENTO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA………………………………………………………………………………….....56

TABLA N°22: RESULTADOS MODELAMIENTO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA…………………………………………………………………………………….59

TABLA N°23: VOLUMEN EN M3 PROMEDIO DE RESIDUOS POR TIPO DE ASERRADERO, 2021. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON BASE EN (INFOR, 2022c)………………………………………………………………………………………62

TABLA N°24: VOLUMEN CON DESTINO A SER COMERCIALIZADO MENSUALMENTE, 2021. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA………………………64

TABLA N°25: RESUMEN RESIDUOS NECESARIOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA…………………………………………………………………………………….66

TABLA N°26: EQUIVALENCIA CASAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA…..….67

TABLA N°27: NÚMERO DE ESTUFAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA……….69

TABLA N°28: KILOGRAMOS DE LEÑA DE EUCALIPTO. FUENTE:

ELABORACIÓN PROPIA……………………………..………………………………….69

TABLA N°29: INCREMENTO EN CAPACIDAD INSTALADA, 2022. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA………………………………………………………………...70

TABLA N°30: RESULTADOS MODELAMIENTO RESUMEN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA………………………………………………………………...72

TABLA N°31: FUNCIÓN OBJETIVO 180KW. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA……………………………………………………………………...……………101

TABLA N°32: RESULTADOS VARIABLE Y 180 KW. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA…………………………………………………………………………………...102

TABLA N°33: RESULTADOS VARIABLES X y C 180 KW. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA…………………………………………………...…………..102

TABLA N°34: FUNCIÓN OBJETIVO 360 KW. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA…………………………………………………………………………………...102

TABLA N°35: RESULTADOS VARIABLE Y 360 KW. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA…………………………………………………………………………………...103

TABLA N°36: RESULTADOS VARIABLES X y C 360 KW. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA……………………………………………………...………..103

TABLA N°37: FUNCIÓN OBJETIVO 900 KW. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA…………………………………………………………………………………...103

TABLA N°38: RESULTADOS VARIABLE Y 900 KW. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA………………………………………………………………………….………..104

TABLA N°39: RESULTADOS VARIABLES X y C 900 KW. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA…………………………………………………………….....104

**INDICE DE ILUSTRACIONES**

ILUSTRACIÓN N°1: RADIOGRAFÍA AL PRONÓSTICO DE DEMANDA ELÉCTRICA DE CHILE, 2021. FUENTE: (CNE, 2022)……………………………...…………………9

ILUSTRACIÓN N°2: GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE Y NO-RENOVABLE, 2022. FUENTE: (GDC, 2023)…………....................................................10

ILUSTRACIÓN N°3: CONSUMO HISTÓRICO Y PRONÓSTICO DEMANDA, 2023. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON BASE EN (CNE, 2022) Y (GDC, 2023).…..11

ILUSTRACIÓN N°4: COMPONENTES PLANTA DE BIOGÁS. FUENTE: (BIOTECH, 2022).………………………………………………………………………………………19

ILUSTRACIÓN N°5: PLANTA DE BIOGÁS. FUENTE: (GENIA BIOENERGÍA, 2023).………………………………………………………………………………………22

ILUSTRACIÓN N°6: CONSUMO DE TROZAS POR INDUSTRIA FORESTAL, 2021. FUENTE: (INFOR, 2022a).………………………………………......................................28

ILUSTRACIÓN N°7: CONSUMO VERSUS PRODUCCIÓN DE TROZAS, 2021. FUENTE: (INFOR, 2022a)…………………………………...............................................29

ILUSTRACIÓN N°8: EFICIENCIA PROCESO PRODUCTIVO POR REGIÓN, 2021. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA...……………………..............................................30

ILUSTRACIÓN N°9: PRODUCCIÓN MADERA ASERRADA POR ESPECIE, 2021. FUENTE: (INFOR, 2022a)……...........................................................................................32

ILUSTRACIÓN N°10: NÚMERO DE ASERRADEROS OPERATIVOS POR TIPO, 2021. FUENTE: (INFOR, 2022b)……………..…...............................................................34

ILUSTRACIÓN N°11: NÚMERO DE ASERRADEROS POR TIPO Y RANGO PRODUCTIVO, 2021. FUENTE: (INFOR, 2022b).……… …...........................................35

ILUSTRACIÓN N°12: DISTRIBUCIÓN SECTORES COMERCIALES INDUSTRIA FORESTAL REGIÓN DE LOS LAGOS, 2022. FUENTE: ([INFOR,](https://wef.infor.cl/index.php/mapa-industria?view=mapa) 2023)…….………..36

ILUSTRACIÓN N°13: DISTRIBUCIÓN RESIDUOS MADEREROS POR REGIÓN, 2021. FUENTE: (INFOR, 2022c)……………………………………...……......................39

ILUSTRACIÓN N°14: VOLUMEN DE RESIDUOS EN M3 POR RANGO PRODUCTIVO, 2021. FUENTE: (INFOR, 2022c)………………………..………..…….40

ILUSTRACIÓN N°15: VOLUMEN DE RESIDUOS EN M3 POR TIPO DE ASERRADERO, 2021. FUENTE: (INFOR, 2022c)………………………………………41

ILUSTRACIÓN N°16: COMPOSICIÓN RESIDUOS POR RANGO PRODUCTIVO, 2021. FUENTE: (INFOR, 2022c)………….........................................................................43

ILUSTRACIÓN N°17: DESTINO DE RESIDUOS FORESTALES POR RANGO PRODUCTIVO, 2021. FUENTE: (INFOR, 2022c)……………………………………….45

ILUSTRACIÓN N°18: VOLUMEN EN M3 PROMEDIO DE RESIDUOS POR TIPO DE ASERRADERO, 2021. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON BASE EN (INFOR, 2022c)………………………………………………………………………………………62

ILUSTRACIÓN N°19: VOLUMEN RESIDUOS DISPONIBLES VERSUS COMERCIALIZADOS, 2021. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON BASE EN (INFOR, 2022c)………………………………………………………………….………...64

# RESUMEN

El trabajo de memoria de título consiste en determinar el aporte de energía eléctrica renovable generado de una planta de producción de biogás en la región de Los Lagos como iniciativa de economía circular. El objetivo general de este trabajo consiste en determinar el aporte de energía eléctrica generado bajo distintas escalas de plantas de biogás en cuanto a su potencia nominal con respecto a la disponibilidad de residuos forestales y la localización de estos.

Tanto a nivel internacional como país, la economía y el medio ambiente requieren soluciones sostenibles debido a la escasez de energía, al aumento del consumo energético y la insostenibilidad del modelo económico tradicional. En Chile, un país en desarrollo con crecimiento económico constante, el suministro energético es un desafío significativo. Ante esta situación, se reconoce la necesidad de diversificar y buscar alternativas energéticas, impulsando políticas energéticas sólidas y el desarrollo de fuentes de energía renovable, donde la reutilización de los residuos de la industria forestal como iniciativa de economía circular para la producción de energía se presenta como una alternativa viable y prometedora al generar un impacto positivo en el medio ambiente y en la comunidad.

El estudio de disponibilidad de residuos forestales indicó que existen volúmenes suficientes para suplir la demanda de una planta de biogás. Además, Osorno se presenta como punto de alto potencial para implementar una planta de biogás de pequeña y mediana escala, y Ancud como punto de alto potencial para implementar una planta de biogás de gran escala.

Finalmente, el aporte de energía eléctrica renovable generado de una planta de producción de biogás se sitúa entre 38.880 kWh/mes y 194.400 kWh/mes.

# 1. INTRODUCCIÓN

El consumo energético mundial ha experimentado un aumento significativo en los últimos años, duplicándose en las últimas dos décadas, afirma el Ministerio de Energía (MdE) en un documento publicado en el año 2023. Se estima que el 70% del aumento proyectado para los próximos años provendrá de los países en desarrollo, impulsado por factores como la globalización, el crecimiento demográfico y el desarrollo económico (MdE, 2023a).

En el caso de Chile, un país en desarrollo que ha experimentado un crecimiento económico constante en las últimas décadas, se han presentado diversos desafíos, entre ellos, el suministro energético (MdE, 2023b). En una publicación del geólogo Nelson Muñoz G. (citado en El Mostrador, 2021), el autor señala que Chile se enfrenta a una crisis energética multifactorial.

Además, el Ministerio de Energía (2023b) ha establecido objetivos específicos en su estrategia regional de desarrollo, los cuales buscan promover la diversificación de la matriz energética y fomentar prácticas sostenibles. Frente a esto, es fundamental encontrar soluciones que aseguren un suministro energético adecuado y sostenible para respaldar este crecimiento (MdE, 2023b).

El siguiente trabajo presenta un estudio en cuanto al aporte energético generado al implementar una planta de biogás en la región de Los Lagos con el fin de promover una fuente de energía sustentable haciendo uso de los residuos de la industria forestal. Esta investigación se enmarca en la carrera de Ingeniería Civil Industrial y está orientada a generar conocimientos y propuestas innovadoras en el campo de la energía renovable y la economía circular.

## 1.1 MOTIVACIÓN DE LA MEMORIA

Debido a la crisis energética multifactorial actual, el calentamiento global, la contaminación, entre otros factores, surge la motivación para la realización de este proyecto de título, centrado en la generación de energía mediante un enfoque de sustentabilidad y economía circular. Para ello, se ha elegido la región de Los Lagos como escenario de estudio y aplicación.

Este proyecto busca impulsar el desarrollo y promover la generación de energía en la región de Los Lagos, generando un impacto positivo tanto en el medio ambiente como en la comunidad local, sentando las bases para un futuro energético más sostenible y resiliente.

## 1.2 ANTECEDENTES

### 1.2.1 Energía

Actualmente en Chile existe una excesiva dependencia de las hidroeléctricas, lo cual genera vulnerabilidad ante variaciones en las condiciones climáticas y en el suministro de agua, lo cual se ha agravado debido al cambio climático, lo cual impacta en la disponibilidad de recursos hídricos y en la producción de energía (El Mostrador, 2021).

La Prensa Portal Innova (PPI), en un artículo publicado en el año 2023, afirma que la crisis energética en Chile ha generado preocupación y la necesidad de implementar medidas para diversificar la matriz energética y superar esta situación. La dependencia excesiva de las hidroeléctricas y los factores mencionados anteriormente han resaltado la necesidad de impulsar el desarrollo de fuentes de energía renovable y de políticas energéticas más sólidas y sostenibles (PPI, 2023).

### 1.2.2 Economía circular

Según una noticia publicada por el Parlamento Europeo (PE) en el año 2023, la economía circular es un modelo de producción y consumo el cual implica alquilar, reutilizar, compartir, reparar, renovar y reciclar materiales y productos todas las veces que sea posible con el fin de crear un valor añadido a la cadena de valor.

La reutilización de residuos de la producción industrial como iniciativa de economía circular se presenta como una alternativa viable y prometedora, ya que, en Chile, un país con una amplia diversidad de industrias, como la agrícola, minera, forestal y muchas otras, existe un alto potencial para aprovechar estos materiales residuales y convertirlos en una fuente de energía limpia y renovable (Tauro et al., 2021).

La industria forestal de la región de Los Lagos genera grandes volúmenes de residuos que pueden ser utilizados para producir energía (Peña y Acuña, 2012). Esta materia prima abundante y de fácil acceso representa una valiosa oportunidad para contribuir al desarrollo energético sostenible de la región (Peña y Acuña, 2012). Según el Ministerio de Agricultura (MdA) en el año 2019, la generación de energía a través de biomasa es una gran iniciativa de economía circular, al producir beneficios adicionales a lo largo de la cadena de valor

### 1.2.3 Planta de biogás

Recytrans Soluciones Globales para el Reciclaje (Recytrans), en una publicación realizada en el año 2020, afirma que una planta de biogás es aquella en donde se fermenta biomasa lignocelulósica, en este caso particular, forestal, en conjunto con agua en una cámara de digestión para producir biogás (Varnero, 2011). Existen distintas aplicaciones para este, entre ellas, la producción de calor o vapor, el uso como combustible para vehículos y la generación de electricidad (Varnero, 2011).

La organización internacional Vegetarianos Hoy (VH), en una publicación realizada en el año 2022, señala que los beneficios que otorga una planta de biogás son la producción de energía renovable, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), la disminución en la extracción de materias primas y la regeneración de los ecosistemas, entre otros.

## 1.3 OBJETIVOS

Los objetivos de este trabajo de titulación son los siguientes.

### 1.3.1 Objetivo general

Determinar el aporte de energía eléctrica generado por distintas escalas de plantas de biogás en la región de Los Lagos como iniciativa de economía circular con respecto a la disponibilidad de residuos forestales de la zona y la localización geográfica de éstos.

### 1.3**.**2 Objetivos específicos

1. Determinar la disponibilidad de residuos forestales de la industria del aserrío de la región de Los Lagos junto con su clasificación, parámetros, el volumen por tipo de aserradero y su localización.
2. Calcular los residuos forestales necesarios mensualmente para suplir la demanda de distintas escalas de plantas de biogás en cuanto a potencia nominal junto con su aporte de energía eléctrica.
3. Encontrar la localización ideal para implementar una planta de biogás en la región mediante un modelamiento matemático que minimice los costos de transporte de los residuos.

## 1.4 METODOLOGÍA

El siguiente capítulo enumera los pasos a seguir para cada objetivo específico con el fin de desarrollar de manera correcta y ordenada la investigación del trabajo.

### 1.4.1 Disponibilidad residuos forestales

Para llevar a cabo el primer objetivo específico de esta investigación, se hizo uso de la información que aporta el capítulo 2.6 Residuos forestales del marco teórico.

1. En primer lugar, se necesita conocer la cantidad de aserraderos por tipo (permanente, móvil tradicional y móvil portátil) y por rango productivo (pequeñas y grandes).
2. Luego, se buscan los volúmenes de residuos forestales mensuales por rango productivo.
3. Por cada tipo de aserradero, se divide el volumen de residuo forestal por la cantidad de aserraderos de cada rango productivo. De esta forma, se encuentran los volúmenes de residuos forestales mensuales generados en promedio por cada aserradero.
4. Se encuentran los volúmenes de residuos forestales para cada tipo de aserradero.
5. Con la información entregada por el capítulo 2.6.5 “Destino de los residuos”, se encuentran los volúmenes destinados a ser comercializados por rango productivo.
6. Ahora, se hace uso del capítulo 2.6.4 “Parámetros” y se procede a encontrar la densidad promedio del residuo forestal por rango productivo. Esto se logra mediante una suma ponderada de las proporciones de cada subproducto del residuo forestal, es decir, aserrín, viruta, corteza y lampazos, con la densidad de cada uno de estos.

### 1.4.2 Residuos necesarios

Para calcular los residuos necesarios para suplir la demanda de distintas escalas de plantas de biogás se utiliza un método presente en un documento publicado por la Gesellschaft für

Internationale Zusammenarbeit GmbH (Ávila et al., 2020). Este método enumera los pasos para encontrar la energía eléctrica producida a partir de un volumen de residuos forestales junto con sus parámetros. En este caso, se emplea de manera inversa para encontrar el volumen necesario para alcanzar cierta potencia nominal.

El procedimiento es el siguiente:

1. Definición de la potencia nominal que sea desea obtener.
2. Recopilación de datos, tales como el poder calorífico inferior del biogás, la densidad del residuo forestal, el potencial del biogás, entre otros.
3. Calcular la energía primaria.
4. Calcular la producción total de gas metano.
5. Calcular la producción total de biogás.
6. Calcular la cantidad de sólidos volátiles en kilogramos.
7. Finalmente, calcular los residuos mensuales necesarios para alcanzar la meta de potencia nominal propuesta.

### 1.4.3 Modelamiento

Para llevar a cabo el objetivo específico N°3, se siguieron los siguientes pasos.

1. En primer lugar, se hace uso del mapa del capítulo 2.5.3 “Aserraderos” para conocer las ubicaciones exactas de todos los aserraderos de la región.
2. Mediante el comprendio cartográfico proporcionado por el Ministerio de Energía (2020), el cual se encuentra en el Anexo N°5, se ubicaron cinco plantas distribuidoras de energía eléctrica que se encuentren en zonas no-urbanas.
3. Se lleva a cabo el registro de las distancias entre los 75 aserraderos con mayores niveles de producción anual y las 5 posibles localizaciones de plantas de biogás.
4. Se estudian los costos de transporte asociados a la carga de residuos forestales.
5. Luego, se plantea el problema y se definen los conjuntos, parámetros, restricciones y variables junto con la función objetivo y los supuestos.
6. A continuación, se lleva a cabo la escritura del código de programación en Python haciendo uso del software Gurobi.
7. Se corre el código y se hace registro de los resultados obtenidos.

## 1.5 ALCANCES

El alcance de este trabajo es determinar la energía aportada de una planta de biogás a la región de Los Lagos. Esto se lleva a cabo mediante el estudio de la industria forestal de la región en cuanto a volumen de producción, especies plantadas y sus aserraderos, junto con un análisis de los residuos forestales que produce para luego estimar la energía generada. Finalmente, para encontrar la localización ideal se desarrolla un modelamiento matemático de minimización de costos de transporte para una planta de biogás de distintas escalas en la región. El trabajo no incluye una evaluación financiera en cuanto a la inversión necesaria para implementar el proyecto ni una evaluación técnica en cuanto al diseño de una planta de biogás y sus tecnologías.

# 2. MARCO TEÓRICO

En el siguiente capitulo se definen una variedad de conceptos relevantes para entregar una visión más global e informada del trabajo de título con el fin de contextualizar con la investigación llevada a cabo.

## 2.1 ENERGÍA

### 2.1.1 Sistemas de interconexión en Chile

En Chile, existen tres principales sistemas de interconexión de energía eléctrica que conectan a las centrales generadoras, empresas de transmisión y distribuidoras, afirma Generadoras de Chile (GdC) en una publicación realizada en el año 2023. En el pasado, operaban de manera independiente, sin embargo, en el año 2017 se unieron los dos principales sistemas: el Sistema Interconectado Central (SIC) y el Sistema Interconectado del Norte Grande (SING), para formar el Sistema Eléctrico Nacional (SEN) (GdC, 2023).

El SEN, administrado por el coordinador del sistema eléctrico nacional, un organismo técnico e independiente constituido en una corporación autónoma de derecho público sin fines de lucro (GdC, 2023), abarca gran parte del territorio de Chile, desde Arica por el norte hasta la isla de Chiloé por el sur con una extensión de 3.100 km. Al sur de la región de Los Lagos nos encontramos con los sistemas de Aysén (SEA) y Magallanes (SEM) (GdC, 2023).

### 2.1.2 Energías renovables

Las energías renovables (ER), acorde al Grupo Sinelec (GS) en una publicación realizada en el año 2023, se definen como aquellas fuentes de energía primaria, es decir, obtenidas directamente de la tierra o del entorno natural, que se regeneran naturalmente en un período de tiempo. Estas pueden provenir directamente del Sol (solar térmica, fotoquímica, fotoeléctrica), indirectamente del Sol (eólica, hidroeléctrica, biomasa) o mediante movimientos naturales y mecanismos ambientales (geotérmica, mareomotriz) (GS, 2023).

De acuerdo con una publicación de las Naciones Unidas (ONU) en su sitio web (2023), las principales fuentes de energía renovable son:

1. Solar: energía obtenida del sol convertida en electricidad mediante paneles fotovoltaicos y tecnologías termosolares.
2. Eólica: energía obtenida del viento, la cual es capturada por aerogeneradores
3. Geotérmica: calor proveniente del interior de la Tierra utilizado para la generación eléctrica y calefacción.
4. Hidroeléctrica: energía cinética y potencial del agua en ríos y embalses
5. Bioenergía: energía de la materia orgánica empleada en la generación de electricidad y calor.

### 2.1.3 Futuro energético en Chile

A modo de comprender el contexto energético al que Chile estará enfrentado en el futuro, nos interesa analizar la proyección de demanda energética.

El informe preliminar de previsión de demanda de la Comisión Nacional de Energía (CNE) correspondiente al año 2022, contiene pronósticos de la demanda en Giga watts-hora (GWh) observables en la ilustración N°1.

Ilustración N°1: Radiografía al pronóstico de demanda eléctrica de Chile, 2021.

Fuente: (CNE, 2022).

En la ilustración N°1 (CNE, 2022) se puede observar que el consumo eléctrico del Sistema Eléctrico Nacional aumentaría de 76.051 GWh a 123.090 GWh, equivalente a un aumento de 61.85% con una tasa de crecimiento anual media igual a 2,4% en los próximos 20 años.

Generadoras de Chile mantiene un historial en su sitio web (2023) sobre el consumo energético nacional a través de los años. Estos datos se dividen en fuentes de energía renovables y no renovales, es decir, solar, eólica, geotérmica, entre otras, y carbón, petróleo y gas natural, respectivamente. La información mencionada se puede apreciar en la ilustración N°2.

Ilustración N°2: Generación de Energía Renovable y No-Renovable, 2022.

Fuente: (GdC, 2023)

Como observamos en la ilustración N°2 (GdC, 2023), la generación de energía de fuentes renovables ha tenido un notorio aumento en los últimos años, sobre todo de energía eólica y solar, mientras que el petróleo está en declive desde aproximadamente el año 2009.

Si cruzamos la información disponible de Generadoras de Chile, es decir, el registro histórico de la generación de energía a nivel nacional, con el pronóstico de la demanda energética realizado por el CNE, obtenemos la ilustración N°3.

Ilustración N°3: Consumo histórico y pronóstico demanda, 2023.

Fuente: elaboración propia con base en (CNE, 2022; GdC, 2023).

En la ilustración N°3 (CNE, 2022; GdC, 2023) podemos observar que, para el año 2021, la generación de energía proveniente de fuentes renovables superó la generación de energía proveniente de fuentes no-renovables. También, se observa que la generación de energía de fuentes no renovables ha cesado de crecer en la última década. Cabe destacar que el pronóstico total del sistema crece de manera exponencial a través de los años, lo cual está relacionado con factores tales la globalización, el crecimiento demográfico y el desarrollo económico (MdE, 2023a).

En el documento “Energía 2050” del Ministerio de Energía (2023a), uno de los principales objetivos presentados es que el 70% de la generación eléctrica debe provenir de fuentes de energía renovable para el año 2050, así como también lo es la carbono neutralidad. El CNE pronostica un consumo de 123.090 GWh para el año 2042. Es lógico pensar que para el año 2050 el consumo será mayor, sin embargo, al tomar 123.090 GWh como el consumo energético pronosticado para el 2050, el 70% de la generación debe provenir de fuentes de energía renovable para cumplir con la meta, es decir, 86.163 GWh.

Actualmente, la generación de energía proveniente de fuentes renovables equivale al 55,6% de la generación nacional equivalente a 46.266 GWh; y, para alcanzar lo propuesto por el MdE, esta debe crecer aproximadamente un 185% en los próximo 27 años. Por ende, a nivel nacional, es necesario llevar a cabo proyectos de generación de energía renovable para el cumplimiento de las metas propuestas.

## 2.2 ECONOMÍA CIRCULAR

### 2.2.1 El modelo económico tradicional

El modelo económico tradicional ha contribuido al desarrollo de toda economía. Sin embargo, a medida que avanza el tiempo, las extracciones de recursos naturales aumentan, afirma el periodista David Miranda (citado en National Geographic, 2016). Además, afirma que cada año existe el día de la “Sobrecapacidad de la Tierra”. Este se refiere a aquel día en el transcurso del año, en él se consumieron todos los recursos naturales que el planeta es capaz de regenerar para ese período de tiempo. Cada año, el día de la “Sobrecapacidad de la Tierra” llega antes, afirma el autor. Antonio Guterres, secretario general de la ONU, señaló que la Tierra está alcanzando “extremos irreversibles” y que nos enfrentaremos a una pérdida de la biodiversidad, una alteración climática y un aumento de la contaminación (ONU, 2021).

En un comunicado de prensa del Banco Mundial (BM) del año 2018, este afirma que el modelo económico tradicional desecha grandes toneladas de residuos, los cuales crecerán en un 70% del momento actual al año 2050. Un fragmento de estos es reutilizado y reinvertido en la cadena de valor, sin embargo, otra parte no (BM, 2018). Estos desechos terminan en basurales, con promesas de descomposición a largo plazo, de lo cual parte produce contaminación, afirma el Banco Mundial (BM, 2018).

Fernando Rosso Camacho, CEO de Biosphere Green, mentor y evaluador de la Wadhwani Foundation, dice que el modelo de economía circular surgió como respuesta a la necesidad de dar solución al impacto producido por el modelo tradicional de economía lineal (Rosso, 2021). Esta, representa un cambio sistemático, buscando la disminución de las extracciones de recursos naturales para contribuir a la regeneración de estos, señala Repsol Global (RG) en una publicación realizada en el año 2018.

La economía circular es un modelo de producción y consumo el cual implica alquilar, reutilizar, compartir, reparar, renovar y reciclar materiales y productos todas las veces que sea posible con el fin de crear un valor añadido a la cadena de valor (PE, 2023). De esta forma, el ciclo de vida de los productos se ve extendido.

La Ellen MacArthur Foundation (EMF) señala, en una publicación realizada en el año 2018, que este modelo económico se basa en tres pilares fundamentales:

1. La eliminación residuos y contaminación desde el diseño de los productos y servicios.
2. La mantención de los materiales el mayor tiempo posible en la cadena de valor. Este principio aboga a idear soluciones que permitan la recirculación de estos en la cadena de valor.
3. La regeneración de ecosistemas naturales.

### 2.2.2 ¿Por qué tenemos que cambiar a una economía circular?

Las razones de una transición al modelo económico circular son varias, sin embargo, las principales son (PE, 2023):

1. Para proteger el medio ambiente: al reutilizar y reciclar productos se ralentiza la extracción de materias primas, por ende, la alteración del hábitat se vería disminuida y se limitaría la pérdida de biodiversidad.
2. Para reducir la dependencia de materias primas: uno de los grandes factores para avanzar hacia una economía circular es el constante aumento en la demanda de materias primas y la escasez de recursos.
3. Crear empleo y ahorrar dinero a los consumidores: una transición a una economía circular podría estimular la innovación, aumentar la competitividad, generar empleo e impulsar el crecimiento económico.

Debido a estas razones y lo mencionado previamente, es que una descarbonización progresiva de la matriz energética y de los procesos productivos, junto a cambios en los patrones de consumo, relevando la importancia de la economía circular, acorde a la estrategia climática del Ministerio del Medio Ambiente (MdMA) publicada en el año 2021, es que se logrará reducir las emisiones y cumplir con la meta de carbono neutralidad para el año 2050.

## 2.3 BIOGÁS

El biogás es el aquel que se genera de la fermentación de parte de bacterias metanógenas de la materia orgánica, en este caso, biomasa lignocelulósica proveniente de la industria forestal, en condiciones anaerobias, es decir, en la ausencia de oxígeno la cual genera principalmente metano (CH4) y dióxido de carbono (C02) (Carrasco Allendes, 2015).

### 2.3.1 Parámetros del biogás

Para lograr un mayor entendimiento del biogás, vemos la tabla N°1:

Tabla N°1: Parámetros del biogás.

|  |  |
| --- | --- |
| Biogás | Valor |
| Composición | • 55 - 70% metano (CH4) |
| • 30 - 45% dióxido de carbono (C02) |
| • Otros gases (hidrógeno, nitrógeno, |
| oxígeno, monóxido de carbono, |
| ácido sulfhídrico) |
| Poder calorífico | 6 - 6,5 kWh/Nm3 |
|  |
| Equivalente de combustible | 0,6 - 0,65 L petróleo x m3 de biogás |  |
|  |
| Límite de explosión | 6 - 12% de biogás en el aire |  |
|  |
| Temperatura de ignición | 650 - 750 °C |  |
|  |
| Presión crítica | 74 - 88 atm |  |
|  |
| Temperatura crítica | - 82,5 °C |  |
|  |
| Densidad normal | 1,2 kg/m3 |  |
|  |
| Masa molar | 24,4 g/mol |  |
|  |

Fuente: (Ávila et al., 2020).

Como podemos ver en la tabla N°1 (Ávila et al., 2020), el biogás está compuesto principalmente por metano (CH4) y dióxido de carbono (CO2).

En la tabla N°2 se observa una comparativa entre el biogás y distintas alternativas.

Tabla N°2: Comparación distintos gases.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Valores | Biogás | Gas Natural | Gas Propano | Gas Metano |
| Poder calorífico (Kwh/Nm3) | 6.5 | 10 | 26 | 10 |
| Densidad (t/m3) | 1.08 | 0.7 | 2.01 | 0.72 |
| Densidad respecto al aire | 0.81 | 0.54 | 1.51 | 0.55 |
| Temperatura de encendido (°C) | 687 | 650 | 470 | 650 |
| Máxima velocidad de  encendido en el aire (m/s) | 0.31 | 0.39 | 0.42 | 0.47 |
| Requerimiento teórico de aire (m3/m3) | 6.6 | 9.5 | 23.9 | 9.5 |

Fuente: (Varnero, 2011).

En la tabla N°2 (Varnero, 2011) se observa que el biogás tiene el menor poder calorífico y la mayor temperatura de encendido de los 4 combustibles.

A modo de lograr entender de forma más simple los datos expuestos, se muestra un listado de ciertas equivalencias del biogás en comparación al petróleo (Varnero, 2011):

1. Equivalencia energética: 1 metro cúbico de biogás equivale a aproximadamente 0,6 litros de petróleo en cuanto a energía generada tras su combustión.
2. Eficiencia energética: el biogás tiene una eficiencia energética del 60-70%, mientras que el petróleo tiene una eficiencia del 35-40%.
3. Valor económico: el valor del biogás depende del mercado y puede variar según la ubicación geográfica, pero generalmente es más bajo que el precio del petróleo. El valor del biogás se determina por su contenido de metano, que suele ser del 55-70%. El valor del petróleo, por otro lado, depende de varios factores, como la oferta y la demanda, la calidad y la ubicación geográfica.

### 2.3.2 Aplicaciones del biogás

Existen varias opciones para utilizar el biogás. Entre ellas, se destacan la producción de calor o vapor, la generación de electricidad y el uso como combustible para vehículos (Ávila et al., 2020).

1) Producción de calor o vapor.

El biogás se utiliza para obtener energía térmica, como calor para cocinar, calentar agua e iluminación básica. Los quemadores de gas convencionales se pueden adaptar fácilmente para utilizar biogás con requisitos de calidad relativamente bajos.

2) Generación de calor y electricidad.

Los sistemas combinados de calor y electricidad aprovechan tanto la electricidad generada por el combustible como el calor residual producido. Las turbinas de gas y los motores de combustión interna son comúnmente utilizados en estos sistemas.

3) Combustible para vehículos

El uso vehicular del biogás es posible y ha sido utilizado durante bastante tiempo. Para utilizarlo en vehículos, el biogás debe tener una calidad similar al gas natural y los vehículos deben estar adaptados para funcionar con gas natural. El biogás puede ser utilizado en motores de combustión interna tanto a gasolina como a diésel. Sin embargo, su difusión está limitada debido a problemas como el almacenamiento a alta presión, la costosa conversión de motores y la falta de una red de abastecimiento adecuada.

### 2.3.3 Beneficios del biogás

El biogás es una fuente de energía renovable con una variedad de usos, cuya producción a partir de residuos orgánicos ofrece numerosos beneficios.

La implementación de tecnologías de digestión anaeróbica permite obtener beneficios económicos, ambientales y energéticos, además de mejorar la gestión de nutrientes y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (Varnero, 2011).

Además, Fundeen (2023), una compañía de inversiones de proyectos de energías renovables, afirma que la producción de energía a partir de biomasa no depende de las condiciones climáticas, por lo tanto, su producción puede ser de manera constante.

En términos de cambio climático, según PlanET Biogás Global (2023), el metano emitido por la descomposición anaeróbica de residuos contribuye al efecto invernadero. Sin embargo, al capturar y utilizar el metano como biogás, se evita su liberación a la atmósfera, lo que ayuda a mitigar el cambio climático. El metano tiene un potencial de efecto invernadero 21 veces mayor que el dióxido de carbono, y el cálculo de las emisiones se realiza en equivalentes de dióxido de carbono (CO2e)

## 2.4 PLANTA DE BIOGÁS

Una planta de biogás es aquella en la cual se introducen materiales orgánicos junto con agua en una cámara de digestión, y, debido a la ausencia de oxígeno, la materia orgánica se descompone, generando principalmente metano y dióxido de carbono (Recytrans, 2020).

### 2.4.1 Componentes de una planta de biogás

Diagrama

Descripción generada automáticamente

Ilustración N°4: Componentes planta de biogás.

Fuente: (BioTech, 2022).

Una planta de biogás presenta componentes principales, tales como la biomasa, el motor de cogeneración o de combustión interna, el digestato y el digestor.

De acuerdo con Roams Energía (2023), la Biomasa es el componente que se degrada para producir biogás. Este puede ser tanto deyecciones ganaderas o residuos orgánicos de industrias tales como las agroalimentarias y forestales, entre otras. Esta debe tener una alta capacidad de degradación, es decir, que no se encuentre previamente en descomposición avanzada. Un digestor con biomasa de alta capacidad de degradación necesitará menos tiempo para llevar a cabo el proceso.

El motor de cogeneración, acorde al Ente Nacional para la Energía Eléctrica (2019), o por sus siglas ENEL, es un sistema de transformación del biogás en energía eléctrica y térmica de simultáneamente calor y electricidad utilizando una sola fuente de energía. Por otro lado, el motor de combustión interna solo se enfoca en la generación de electricidad (Carrasco Allendes, 2015).

El digestato es el subproducto resultante del proceso de digestión anaeróbica de la materia orgánica (Roams, 2023). Después de que el sustrato orgánico se descompone y produce biogás, lo que queda es el digestato, el cual consiste en una mezcla de sustancias orgánicas parcialmente descompuestas, nutrientes y agua. Además, puede tener diferentes características dependiendo de la composición del sustrato utilizado en la planta de biogás. Puede contener nutrientes valiosos como nitrógeno, fósforo y potasio, lo que lo convierte en un fertilizante orgánico potencialmente beneficioso para la agricultura (Varnero, 2011). Sin embargo, su manejo y uso adecuado son importantes para evitar impactos ambientales negativos, como la contaminación del suelo o el agua (Varnero, 2011).

El digestor anaeróbico es el componente principal de una planta de biogás y es donde ocurre el proceso de descomposición de la materia orgánica (Recytrans, 2020). Consiste en un tanque que puede ser del tipo laguna cubierta o silo de hormigón, se llena con materiales orgánicos (como estiércol animal, residuos de alimentos y cultivos) y agua (Carrasco Allendes, 2015). Existen distintas tecnologías y variaciones de digestores, sin embargo, todas trabajan mezclando la biomasa con una cantidad de agua, dependiendo del tipo de biomasa utilizada agua (Carrasco y Allendes, 2015). Dentro de cada digestor existe un reactor. Un reactor en una planta de biogás es el componente central que se encarga de la digestión anaeróbica del sustrato (materia orgánica). Este, puede ser de diferentes tipos, como el reactor de lecho fijo, el reactor de flujo continuo o el reactor de lotes, entre otros (Carrasco Allendes, 2015).

### 2.4.2 Funcionamiento de una planta de biogás

El proceso de generación de biogás contempla 4 etapas: alimentación y pre-tratamiento, digestión, post-tratamiento y uso energético.

1. Alimentación y Pre-tratamiento: consta de la inserción de biomasa en los reactores de la planta de biogás y la tecnología de almacenamiento, la cual depende del tipo de sustrato y tecnología del reactor (Carrasco Allendes, 2015). Además, puede ser necesario un pre-tratamiento de la biomasa. Estos son necesarios para acondicionar la materia prima para obtener mejores rendimientos (Carrasco Allendes, 2015).

2. Digestión: la digestión anaeróbica es un proceso altamente complejo debido tanto al número de reacciones bioquímicas que tienen lugar como a la cantidad de microorganismos involucrados en ellas (Varnero, 2011). A nivel industrial se puede controlar la reacción de la digestión anaerobia y almacenar la energía en forma de gas metano, lo cual se logra mediante digestores en los cuales se homogeniza la biomasa, controlando factores tanto de tiempo como de temperatura, entre otros parámetros (Carrasco Allendes, 2015).

Los estudios bioquímicos y microbiológicos realizados hasta ahora han dividido el proceso de descomposición anaeróbica de la materia orgánica en cuatro etapas (Varnero, 2011): la hidrólisis, la etapa fermentativa, la etapa acetogénica y la etapa metanogénica.

Gunt Hamburg (2023), una empresa de equipamiento y componentes para plantas de biogás, define la hidrólisis como el proceso de descomposición de la biomasa. El sustrato utilizado en las plantas de biogás está conformado por distintos compuestos de alto peso molecular, como proteínas, grasas e hidratos de carbono. Debido a esto, los compuestos se deben descomponer a sus componentes individuales.

La fermentación convierte moléculas orgánicas solubles en compuestos utilizables por las bacterias metanogénicas, como ácido acético, ácido fórmico, H2 y otros compuestos orgánicos reducidos (Varnero, 2011). Estos compuestos son posteriormente oxidados por bacterias acetogénicas. Estas bacterias formadoras de ácidos también eliminan el oxígeno disuelto en el sistema y proporcionan alimento para otros grupos bacterianos (Varnero, 2011).

Luego, Aqualimpia (2017), una empresa miembro de la asociación alemana de biogás, afirma que la etapa acetogénica consiste en la transformación de productos tales como el etanol, los ácidos grasos volátiles y algunos compuestos aromáticos en productos más simples.

Finalmente, en la etapa metanogénica, un grupo diverso de bacterias anaeróbicas se encarga de procesar los productos generados en etapas anteriores (Aqualimpia, 2017). Los microorganismos metanogénicos son especialmente importantes en el consorcio de microorganismos anaeróbicos, ya que son responsables de la producción de metano y la eliminación de los productos de las etapas anteriores.

3. Post-tratamiento: el biogás producido contiene variados compuestos que no son adecuados para usos energéticos, por ende, deben ser separados de la mezcla via técnicas fisicoquímicas o biológicas (Carrasco Allendes, 2015).

4. Uso energético: Finalmente, el biogás se puede utilizar en la generación de electricidad, de calor, de ambos (co-generación) y en la producción como combustible (Varnero, 2011). Además, la materia restante se retira de la cámara de digestión y puede ser utilizada como abono en la industria agrícola (Carrasco, 2015). La generación de energía mediante el uso de biomasa infrautilizada puede considerarse dentro de las iniciativas de economía circular que pueden implementarse en la región.



Ilustración N°5: Planta de biogás.

Fuente: (Genia Bioenergía, 2023).

En resumen, el funcionamiento de una planta de biogás es la inserción de la biomasa, previamente higienizada para disminuir los vectores y desarrollar un proceso más puro, en las cámaras de digestión (Varnero, 2011; Carrasco Allendes, 2015). Luego de haber generado el biogás, este es canalizado a una estación de comprensión y tratamiento, donde se depura y se eliminan las impurezas (Aqualimpia, 2017). La biomasa ya digerida, es trasladada a un digestato, donde pasa a ser, generalmente, abono para la agricultura (Carrasco, 2015). Tras la correcta depuración del biogás, hay dos opciones. Puede ser almacenado, para su transporte o venta, o puede ser transformado en energía eléctrica y térmica, de manera simultánea, mediante el uso de un motor cogenerador (CNE, 2007).

### 2.4.3 Cálculo de energía producida

La CNE (Ávila et al., 2007), en conjunto con la Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit GmbH (GIZ) publicaron una guía con un método de estimación de generación eléctrica adecuado para plantas de biogás.

El primer paso corresponde al cálculo del potencial de biogás.

Donde,

Qbiogás corresponde a la producción de biogás por (m3/día).

Pbiogás corresponde al potencial de biogás (m3/kg SV).

SV corresponde a la cantidad de sólidos volátiles en kilogramos.

El potencial del biogás corresponde al volumen de biogás que logra producir un kilogramo de sólido volátil, cuyos valores dependen del tipo de sustrato (Ávila et al., 2007). Proyectos Energías Renovables No Convencionales (2007), afirma que el valor del potencial del biogás para residuos forestales equivale a 0,25 m3/kg de residuo forestal.

Los sólidos volátiles son la parte de la materia seca que se volatiliza durante la incineración (Ávila et a., 2007). La cantidad de sólidos volátiles en residuos forestales equivale a 300 g/Kg (Torrecilla del Rey, 2021).

Acorde a Propanogas (2023), una empresa de energía filial a la multinacional SHV Energy, el PCI inferior del metano equivale a 9,94 kW/Nm3. Además, sabemos que 𝐶metano equivale a 0,6 por el capítulo 2.3.1 Parámetros del biogás.

La eficiencia del motor de combustión interna equivale a aproximadamente 0,3 (Ávila et al., 2007).

Luego, a partir de la composición del biogás, se obtiene el metano generado, la energía primaria obtenida (PCI) y la potencia primaria junto con la energía eléctrica producida.

Donde,

Qmetano corresponde a la producción total de metano (m3/día).

𝐶metano corresponde a la concentración porcentual de metano presente en el biogás (%).

𝐸primaria corresponde a la energía primaria (kWh/día).

𝑃𝐶𝐼metano corresponde al poder calorífico inferior del metano (kWh/Nm3).

𝑃primaria corresponde a la potencia primaria (kW).

corresponde a la energía eléctrica generado (kW).

corresponde al factor de eficiencia del motor de combustión interna utilizado.

### 2.4.4 Beneficios de una planta de biogás

Acorde a una publicación de VH (2022), los beneficios que otorga una planta de biogás son los siguientes:

* + Producción de energía renovable: La principal fuente de beneficios de una planta de biogás es la producción de energía renovable en forma de biogás. El biogás puede ser utilizado para generar electricidad, calor y combustible para vehículos.
  + Tratamiento de residuos: La planta de biogás también puede ser utilizada para el tratamiento de residuos orgánicos, reduciendo así la cantidad de residuos que deben ser enviados a vertederos y minimizando el impacto ambiental.
  + Producción de fertilizantes: El digestato, el residuo sólido generado después del proceso de digestión anaeróbica es un excelente fertilizante para la agricultura, ya que contiene nutrientes esenciales como nitrógeno, fósforo y potasio.
  + Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero: La producción de biogás ayuda a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, ya que puede ser utilizado como sustituto de combustibles fósiles como el petróleo y el gas natural, lo cual es un punto clave de la “Hoja de Ruta 2050” del país y del protocolo Kioto (MdE, 2023b).
  + Generación de empleo: La construcción y operación de una planta de biogás puede generar empleos locales y contribuir a la economía de la región.
  + Mejora de la salud pública: La reducción de la cantidad de residuos orgánicos que se envían a los vertederos puede ayudar a reducir el impacto negativo en la salud pública y mejorar la calidad del aire y del agua.
  + Además, al haber biogás disponible para su uso en una gran cantidad de viviendas a lo largo de la región, la comercialización de gas butano tendrá un impacto negativo. Este se obtiene principalmente de la destilación del petróleo, por ende, la extracción de petróleo para fines de producción de gas butano se verá reducida.

# 3. INDUSTRIA DEL ASERRÍO

Chile se ve involucrado en una gran variedad de industrias, las cuales son la minera, agrícola, acuícola, ganadera, forestal, entre otras. La industria forestal se dedica a la producción, extracción, elaboración y comercio de madera (Cardemil Winkler, 2021). Dentro de la industria forestal, encontramos diversos sectores industriales. En una publicación del año 2021 del Ministerio de Agricultura (MdA) estos sectores son pulpa mecánica, pulpa química, tableros y chapas, astillas, postes y polines, trozas aserrables y pulpables para exportación y madera aserrada.

El aserrado de la madera consiste en la transformación de trozas con el fin de darle a la madera una medida determinada en cuanto a espesor, largo y ancho con el uso de diversas tecnologías de sierras (Trejo, Ninin y Rosso, 2011).

Para lograr una mejor comprensión de la industria, es necesario profundizar en cuanto a las cifras de consumo de trozas y las especies plantadas.

Acorde al informe del aserrío del Instituto Forestal (INFOR) correspondiente al año 2022, el consumo total de trozas en miles de metros cúbicos fue de 43.871,6 para al año 2021. En la ilustración N°6 vemos el consumo de trozas en miles de metros cúbicos para el año 2021 por sector industrial (INFOR, 2022a).

Ilustración N°6: Consumo de trozas por industria forestal, 2021.

Fuente: (INFOR, 2022a).

La industria forestal con mayor consumo de trozas es la industria de la madera aserrada, con un valor de 16.727,8 mil metros cúbicos, seguido de la industria de la pulpa química con 15.529,8 mil metros cúbicos, para el año 2021.

## 3.1 VOLUMEN DE PRODUCCIÓN

Nos interesa conocer los niveles productivos de la industria del aserrío, debido a que es en este sector industrial en donde se encuentran los residuos forestales disponibles para proyectos de generación de energía renovable (INFOR, 2007). Para esto, se conocerán los valores de la eficiencia del proceso productivo de los aserraderos por región con el fin de crear contrastes (INFOR, 2022a).

Ilustración N°7: Consumo versus Producción de trozas, 2021.

Fuente: (INFOR, 2022a).

Como podemos ver en la ilustración N°7 (INFOR, 2022a), la región con mayor volumen en consumo y producción de trozas para el año 2021 es la Región del Biobío, con un valor de 6.373.100 y 3.425.076 metros cúbicos, respectivamente. Dado los valores de consumo de trozas y producción de trozas aserradas, podemos calcular la eficiencia media por región productiva. Esta se obtuvo dividiendo el volumen de trozas consumidas por el volumen de trozas producidas luego del proceso de aserrado (Martínez et al., 2002).

Ilustración N°8: Eficiencia proceso productivo por región, 2021.

Fuente: elaboración propia.

Como se puede observar en la ilustración N°8, la eficiencia productiva de cada región del país en cuanto al proceso de producción de madera aserrada para el año 2021, donde el coeficiente de eficiencia de la región de Los Lagos equivale a 51,4%, siendo 51,9% la media nacional.

Los resultados de esta sección se presentan resumidos en la tabla N°3.

Tabla N°3: Consumo, eficiencia y producción por región productiva, 2021.

Fuente: (INFOR, 2022a).

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Región | Consumo (m3) | Producción (m3) | Eficiencia (%) | Producción Nacional (%) |
| Valparaíso | 59.144 | 28.783 | 48.7 | 0.33 |
| Metropolitana | 3.926 | 1.866 | 47.5 | 0.02 |
| O’Higgins | 536.309 | 270.000 | 50.3 | 3.11 |
| del Maule | 4.031.306 | 2.019.392 | 50.1 | 23.26 |
| Ñuble | 2.365.667 | 1.225.514 | 51.8 | 14.11 |
| Biobío | 6.373.100 | 3.425.076 | 53.7 | 39.45 |
| Araucanía | 1.856.290 | 922.063 | 49.7 | 10.62 |
| Los Ríos | 1.103.929 | 590.161 | 53.5 | 6.80 |
| **Los Lagos** | **341.902** | **175.761** | **51.4** | **2.02** |
| Aysén | 12.985 | 7.116 | 54.8 | 0.08 |
| Magallanes | 43.242 | 17.728 | 41.0 | 0.20 |
| **Total** | **16.727.800** | **8.683.460** | **51.9** | **100** |

Como podemos observar en la tabla N°3 (INFOR, 2022a), la región de Los Lagos compone el 2.02% de la producción nacional de madera aserrada, quedando en el lugar 7 de 11 regiones productoras de madera aserrada.

Esta región, compuesta por las provincias de Chiloé, Llanquihue, Osorno y Palena, posee una superficie de 48.584 km2 y una población de 828.708 habitantes, acorde al catastro del CENSO (2017). La Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (BCN), indica en una publicación realizada en el año 2022, que la región de Los Lagos cuenta con una destacada actividad económica vinculada principalmente al sector primario, incluyendo la ganadería, la acuicultura y la industria forestal.

La industria del aserrío de la región representa el 1,49% de un total de 4.840.836 hectáreas de superficie regional, es decir, 71.875 hectáreas (MdA, 2021). Además, mantiene una ocupación de 4.054 personas y aporta el 88,7% del PIB forestal de la región (INFOR, 2022a).

## 3.2 PRINCIPALES ESPECIES PLANTADAS

Las principales especies plantadas y comercializadas de la región de Los Lagos corresponden a pino oregon y pino radiata (INFOR, 2022a), como podemos observar en la ilustración N°9.

Ilustración N°9: Producción madera aserrada por especie, 2021.

Fuente: (INFOR, 2022a).

Como vemos en la ilustración N°9 (INFOR, 2022a), el pino radiata representa el 82,55% de la producción regional de madera aserrada equivalente a 145.000 metros cúbicos. Los parámetros de esta especie son los siguientes:

Tabla N°4: Parámetros pino radiata.

|  |  |
| --- | --- |
| Variable | Pino radiata |
| Densidad (kg/m3) | 480 |
| Peso específico (kg/m3) | 132,49 |
| Contracción volumétrica (%) | 87,06 |

Fuente: (Barria, Sandoval y Gerson, 2017).

## 3.3 ASERRADEROS

Un aserradero es el lugar donde las trozas de madera, es decir, los troncos de distintos árboles, son sometidos a un proceso de producción en el cual al tronco se le retira la corteza para poder luego transformarlo en diferentes escuadrías, acorde a una publicación de Maderea (2021).

En términos de movilidad, los aserraderos se dividen en dos categorías principales (Keil y Taraborelli, 2022):

1. Aserraderos móviles: Son unidades básicas de producción que constan de un banco equipado con una sierra circular simple o una sierra huincha horizontal. La principal característica de los aserraderos móviles es su estructura transportable. Según el tipo de sierra que emplean, los aserraderos móviles se clasifican en:
   1. Aserraderos móviles tradicionales: Estos aserraderos suelen utilizar una sierra circular simple, a menudo con dientes postizos, lo que resulta en un ancho de corte de aproximadamente 1/4 de pulgada (7 mm). Este tipo de sierra genera una cantidad considerable de residuos madereros, como lampazos y aserrín.
   2. Aserraderos móviles portátiles: Estos aserraderos suelen emplear una sierra huincha horizontal de 1 mm de espesor, lo que permite obtener cortes delgados y un mejor rendimiento en la producción de madera aserrada en comparación con los aserraderos móviles tradicionales. Como resultado, generan menos lampazos y aserrín.
2. Aserraderos permanentes: Son unidades más complejas que los aserraderos móviles y se ubican de manera estable en un lugar físico. En los aserraderos permanentes, la máquina principal responsable de los primeros cortes a las trozas puede ser una sierra huincha con chipper canter, una sierra huincha vertical con carro, una sierra circular doble, una sierra huincha paralela, una sierra circular simple o una sierra huincha horizontal. Dependiendo de los procesos realizados, se pueden clasificar las unidades permanentes en aserraderos permanentes tradicionales y en aserraderos permanentes con elaboración.

El número de aserraderos por categoría para la región de Los Lagos se ve representada en la ilustración N°10 (INFOR, 2022b). Solo se consideraron aquellos aserraderos que se encontraban operativos para la fecha, es decir, no se incluyeron aquellos que se encontraban paralizados.

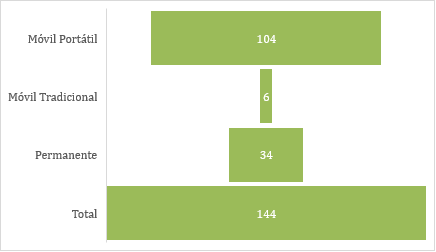


Ilustración N°10: Número de aserraderos operativos por tipo, 2021.

Fuente: (INFOR, 2022b).

Como podemos ver en la ilustración N°10 (INFOR, 2022b), la mayoría de los aserraderos de la región son del tipo móvil portátil. La ilustración N°11 es un desglose de la ilustración N°10 y entrega información respecto a la distribución de los distintos aserraderos por rango productivo para el año 2021.

Ilustración N°11: Número de aserraderos por tipo y rango productivo, 2021.

Fuente: (INFOR, 2022b).

En la ilustración N°11 (INFOR, 2022b), se observa que la gran mayoría de los aserraderos son del tipo móvil portátil y que además 97 de un total de 144 aserraderos pertenecen al rango productivo de 1.000 metros cúbicos o menos anuales de producción de madera aserrada.

Nos interesa conocer cómo se distribuyen los aserraderos en la región. En la ilustración N°12 se aprecian las localizaciones de los aserraderos y de otros sectores industriales a lo largo de la región.

Una captura de pantalla de una computadora

Descripción generada automáticamente

**Osorno**

**Llanquihue**

**Chiloé**

**Palena**

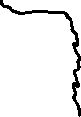


Ilustración N°12: Distribución sectores comerciales industria forestal región de Los Lagos, 2022.

Fuente: ([INFOR,](https://wef.infor.cl/index.php/mapa-industria?view=mapa) 2023).

Como vemos en la ilustración N°12 (INFOR, 2023), la provincia de Chiloé es aquella con la mayor cantidad de aserraderos seguido de Llanquihue. Además, los aserraderos móviles portátiles aquellos que dominan en las cuatro provincias de la región. También, notamos una clara menor cantidad de aserraderos en la provincia de Palena.

## 3.4 RESIDUOS FORESTALES

Los productos residuales de la industria del aserrío se refieren a aquellos productos que se obtienen directamente del bosque en aserraderos o que han pasado por un primer procesamiento (INFOR, 2007).

### 3.4.1 Clasificación residuos forestales

Dentro de los subproductos o residuos generados por los aserraderos, encontramos los siguientes (INFOR, 2007):

1. Corteza: capa externa de la madera.
2. Lampazos: secciones laterales de la troza.
3. Aserrín: conjunto de partículas de tamaño pequeño.
4. Astillas: Trozos de madera de menor dimensión. De aquí se obtiene la celulosa para la fabricación de papel.
5. Tapas: corresponden a secciones laterales de la troza, caracterizadas por tener dos caras limpias, libres de corteza.
6. Viruta: Cinta delgada de espesor variable en dirección de la fibra.
7. Despuntes: Residuos de tamaño variable provenientes de secciones terminales.

### 3.4.2 Disponibilidad de residuos forestales

El Instituto Forestal publicó un informe en el año 2022 que evidenció la disponibilidad de residuos madereros generados en los aserradores desde la región de Magallanes hasta la región de Coquimbo que podrían ser aprovechados en la generación de energía (INFOR 2022c). Los antecedentes del escrito aportaron información sobre los recursos de biomasa para el desarrollo de energías renovables.

En la tabla N°6, se observa, a nivel nacional, que el volumen de residuos asciende a 5.371.642 m3 para el año 2021.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Tipo de Aserradero** | **Número de Aserraderos** | **Volumen de Subproductos Madereros (m3)** | | | |
| **Corteza** | **Lampazos** | **Aserrín Primario** | **Aserrín Secundario** |
| **Total Permanente** | **448** | **1.307.143** | **509.992** | **2.740.444** | **178.244** |
| Permanente c/ elaboración | 238 | 532.379 | 206.280 | 1.152.330 | 130.090 |
| Permanente c/ remanufactura | 25 | 298.273 | 18.862 | 577.348 | 48.154 |
| Permanente Tradicional | 185 | 476.491 | 284.849 | 1.010.766 | 0 |
| **Total Móvil Tradicional** | **73** | **11.007** | **38.624** | **34.601** | **738** |
| Móvil Tradicional c/ elaboración | 18 | 3.269 | 11.771 | 9.873 | 738 |
| Móvil Tradicional | 55 | 7.739 | 26.853 | 24.727 | 0 |
| **Total Móvil Portátil** | **401** | **19.646** | **85.385** | **19.641** | **808** |
| Móvil Portátil c/ elaboración | 39 | 3.173 | 14.140 | 3.249 | 705 |
| Móvil Portátil C/ remanufactura | 5 | 409 | 1.785 | 386 | 103 |
| Móvil Portátil | 357 | 16.063 | 69.450 | 16.006 | 0 |
| **TOTAL** | **922** | **1.337.796** | **634.001** | **2.794.686** | **179.791** |

Tabla N°5: Distribución volumen residuos según tipo de residuo y aserradero, 2021.

Fuente: (INFOR, 2022c).

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Tipo de Aserradero** | **Número de Aserraderos** | **Volumen de Subproductos Madereros (m3)** | | **Total** | **%** |
| **Viruta** | **Despuntes** |
| **Total Permanente** | **448** | **288.084** | **134.425** | **5.158.332** | **96.0** |
| Permanente c/ elaboración | 238 | 175.949 | 21.187 | 2.218.216 | 41,3 |
| Permanente c/ remanufactura | 25 | 112.136 | 113.238 | 1.168.010 | 21,7 |
| Permanente Tradicional | 185 | 0 | 0 | 1.772.107 | 33 |
| **Total Móvil Tradicional** | **73** | **983** | **292** | **86.246** | **1,6** |
| Móvil Tradicional c/ elaboración | 18 | 983 | 292 | 26.926 | 0,5 |
| Móvil Tradicional | 55 | 0 | 0 | 59.320 | 1,1 |
| **Total Móvil Portátil** | **401** | **964** | **621** | **127.064** | **2,4** |
| Móvil Portátil c/ elaboración | 39 | 724 | 279 | 22.271 | 0,4 |
| Móvil Portátil C/ remanufactura | 5 | 239 | 342 | 3.264 | 0,1 |
| Móvil Portátil | 357 | 0 | 0 | 101.530 | 1,9 |
| **TOTAL** | **922** | **290.031** | **135.338** | **5.371.642** | **100** |

Tabla N°6: Continuación Tabla N°5, 2021.

Fuente: (INFOR, 2022c).

Como podemos observar en la tabla N°5 (INFOR, 2022c) y en la tabla N°6 (INFOR, 2022c), a nivel nacional, la mayor cantidad de subproductos proviene de los aserradores permanentes. Además, podemos ver una gran diferencia de los aserraderos permanentes con los móviles portátiles. Los 448 aserraderos permanentes generaron el 96% del volumen de residuos, mientras que los 401 aserraderos móviles portátiles generaron tan solo el 2,4% del total.

### 3.4.3 Distribución

A nivel nacional, los residuos de la industria del aserrío para el año 2021 para cada región se observan en la ilustración N°13.

Ilustración N°13: Distribución residuos madereros por región, 2021.

Fuente: (INFOR, 2022c).

En la ilustración N°13 (INFOR, 2022c), el volumen de residuos correspondiente para la región de Los Lagos para el año 2021 equivale a 139.899 metros cúbicos, siendo este el 2,6% del volumen nacional total. Este volumen de residuos de la región de Los Lagos distribuye de la siguiente forma por rango productivo.

El Instituto Forestal hace referencia a aserraderos pequeños a aquellos con una producción anual de madera aserrada menor a 10.000 metros cúbicos, medianos a aquellos entre 10.000 y 100.000 metros cúbicos y grande con producciones mayores a los 100.000 metros cúbicos anuales de madera aserrada, por ende, se usará la misma lógica desde este momento para evitar confusiones.

Ilustración N°14: Volumen de residuos en m3 por rango productivo, 2021.

Fuente: (INFOR, 2022c).

Como podemos ver en la ilustración N°14 (INFOR, 2022c), la mayor cantidad de residuos forestales provienen de aserraderos de pequeña escala. Esto se debe, en parte, a que 138 aserraderos de los 144 de la región, pertenecen a este grupo (INFOR, 2022b). Además, los problemas de organización del trabajo y la falta de mantenimiento adecuado de las sierras son factores que provocan una menor eficiencia en los aserraderos de menor escala con rangos productivos menor 5.000 m3 anuales (INFOR, 2007).

En la ilustración N°15, podemos observar los valores de los volúmenes de residuos forestales distribuidos por tipo de aserradero.

Ilustración N°15: Volumen de residuos en m3 por tipo de aserradero, 2021.

Fuente: (INFOR, 2022c).

Como podemos observar en la ilustración N°15 (INFOR, 2022c), la gran parte de los residuos forestales de la región se concentran en los aserraderos del tipo permanente. Además, como vimos en la ilustración N°14, la mayoría del volumen de residuos proviene de aserraderos de rangos productivos menores, por ende, se puede concluir que los residuos se encuentran mayormente en aserraderos permanentes de rango productivo pequeño.

Finalmente, se presenta la tabla N°7 a modo de resumen de la sección.

Tabla N°7: Volumen en m3 de residuos forestales por tipo y rango productivo, 2021.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Tipo de aserradero | Rango Productivo | | Total (m3) |
| Pequeño | Mediano |
| Permanente | 67.728 | 36.715 | 104.442 |
| Móvil Tradicional | 2.859 | 0 | 2.859 |
| Móvil Portátil | 32.598 | 0 | 32.598 |

Fuente: elaboración propia con base en INFOR, 2022c.

### 3.4.4 Composición

El subproducto de la industria del aserrío de la región está compuesto principalmente por aserrín, lampazos, y corteza (INFOR, 2022c). El volumen de residuos según tipo de subproducto y rango de producción para el año 2021 se ve en la tabla N°8.

Tabla N°8: Composición residuo forestal en m3 por rango productivo, 2021.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Tipo de Subproducto | Rango Productivo | | |
| Pequeño | Mediano | Grande |
| Corteza | 14.737 | 13.566 | 0 |
| Lampazos | 49.759 | 0 | 0 |
| Aserrín | 28.738 | 24.448 | 0 |
| Viruta | 1.249 | 5.664 | 0 |
| Despuntes | 342 | 1.395 | 0 |
| Total | 94.825 | 45.074 | 0 |

Fuente: (INFOR, 2022c).

Como podemos observar en la tabla N°8 (INFOR, 2022c), no existen aserraderos grandes en la región, es decir, con producciones anuales mayores a 100.000 metros cúbicos anuales. Los datos de la tabla se pueden observar en la ilustración N°16.

Ilustración N°16: Composición residuos por rango productivo, 2021.

Fuente: (INFOR, 2022c).

Como vemos en la ilustración N°16 (INFOR, 2022c), los lampazos predominan en aserraderos pequeños, mientras que el aserrín predomina en aserraderos medianos.

En un artículo de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad de Oriente (Lesmes et al., 2006) observamos los valores para los residuos forestales nombrados en cuanto a contenido de humedad, contenido de ceniza y, por último, sus densidades.

Tabla N°9: Densidad por residuo del aserrío.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Residuos** | **Tamaño (mm)** | **Densidad (kg/m3)** |
| Lampazos | 1 - 100 | 460 |
| Viruta | 1 - 12 | 390 |
| Aserrín | < 1 | 300 |
| Despunte | 1 - 30 | 460 |
| Corteza | 1 - 100 | 440 |

Fuente: elaboración propia con base en Lesmes et al., 2006.

El aserrín constituye el subproducto con menor densidad, mientras que los lampzaos y despuntes por poco igualan la densidad del pino radiata sin aserrar, es decir, 480 kg/m3.

### 3.4.5 Destino de los residuos

En cuanto al destino de los subproductos, las posibilidades son comercialización, autoconsumo, acumulación y regalo. Los volúmenes según destino por rango productivo lo vemos en la tabla N°10.

Tabla N°10: Destino subproductos en m3 por rango productivo, 2021.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Destino | Rango Productivo | |
| Pequeño | Mediano |
| Acumula | 7.587 | 0 |
| Autoconsume | 9.235 | 36.715 |
| Comercializa | 73.006 | 8.359 |
| Regala | 4.997 | 0 |
| Total | 94.825 | 45.074 |

Fuente: elaboración propia con base en INFOR, 2022c.

La información de la tabla N°10 (INFOR, 2022c) la podemos ver en la ilustración N°17..

Ilustración N°17: Destino de residuos forestales por rango productivo, 2021.

Fuente: (INFOR, 2022c).

Como vemos en la ilustración N°17 (INFOR, 2022c), la comercialización representa el destino con mayor volumen en aserraderos pequeños, equivalente a un 77% del total de residuos generados, mientras que en plantas medianas el destino que lidera es el autoconsumo equivalente al 81,5% de los residuos generados.

# 4. DESARROLLO Y RESULTADOS

En el siguiente capítulo se lleva a cabo el desarrollo de los objetivos específicos del trabajo de título junto a sus respectivos resultados.

## 4.1 DISPONIBILIDAD RESIDUOS FORESTALES

En el capítulo 3.3 ASERRADEROS podemos observar el número de aserraderos por tipo y por rango de producción. Los valores se muestran en la tabla N°11:

Tabla N°11: Número de aserraderos por tipo y rango productivo, 2021.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Tipo de aserradero | Rango Productivo | | Total |
| Pequeño | Mediano |
| Permanente | 32 | 2 | 34 |
| Móvil Tradicional | 6 | 0 | 6 |
| Móvil Portátil | 104 | 0 | 104 |

Fuente: elaboración propia con base en INFOR, 2022b.

Para cada tipo de aserradero, los volúmenes de residuos forestales generados mensualmente por tipo de aserradero y rango productivo, obtenidos del capítulo son:

Tabla N°12: Volumen en m3 de residuos forestales por tipo y rango productivo, 2021.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Tipo de aserradero | Rango Productivo | | Total (m3) |
| Pequeño | Mediano |
| Permanente | 5.644 | 3.059,58 | 8.703,5 |
| Móvil Tradicional | 238,25 | 0 | 238,25 |
| Móvil Portátil | 2.716,5 | 0 | 2.716,5 |

Fuente: elaboración propia con base en INFOR, 2022c.

Ahora, para encontrar los volúmenes mensuales generados en promedio por cada aserradero, se procede a dividir los volúmenes de residuos por tipo y rango productivo por su correspondiente número de aserraderos.

La expresión matemática queda de la siguiente manera:

Donde:

VMP: Volumen mensual promedio de residuos por aserradero en metros cúbicos.

t: tipo de aserradero (permanente, móvil tradicional, móvil portátil).

r: rango de producción (pequeño, mediano).

De esta forma, se calculan los VMP y se presentan los resultados en la tabla N°13.

Tabla N°13: Volumen en m3 promedio de residuos por tipo de aserradero, 2021.

|  |  |
| --- | --- |
| Tipo de Aserradero por rango productivo | Volumen (VMP) (m3) |
| Permanente Mediano | 1.529 |
| Permanente Pequeño | 176,38 |
| Móvil Tradicional Pequeño | 39,70 |
| Móvil Portátil Pequeño | 26,12 |

Fuente: elaboración propia con base en INFOR, 2022c.

De los destinos de los subproductos, el único que nos sirve es el volumen de residuos a ser comercializados, de modo, que, para llevar a cabo la generación de energía se entrará en costos de biomasa, cuyo cálculo no es parte de los alcances de este trabajo.

Para conocer los volúmenes destinados a ser comercializados, se hace uso de la información recopilada en el capítulo 3.4.5 Destino de los residuos. Se observa, que el 77% de los residuos forestales generados en aserraderos pequeños son destinados a ser comercializados, mientras que en aserraderos medianos el 18,5%. De esta forma, haciendo uso de la tabla N°13, se procede a calcular los volúmenes destinados a ser regalados por tipo de aserradero.

Expresado de manera matemática:

Donde:

VCM: Volumen con destino a ser comercializado mensualmente en metros cúbicos.

VMP: Volumen mensual promedio de residuos por aserradero en metros cúbicos.

t: tipo de aserradero (permanente, móvil tradicional, móvil portátil).

r: rango de producción (pequeño, mediano).

C: Proporción del residuo a ser comercializado.

De esta forma se calculan los VCM, cuyos resultados se presentan en la tabla N°14:

Tabla N°14: Volumen con destino a ser comercializado mensualmente, 2021.

|  |  |
| --- | --- |
| Tipo de Aserradero | Volumen Comercializado (VCM) (m3) |
| Permanente Mediano | 282 |
| Permanente Pequeño | 135,81 |
| Móvil Tradicional Pequeño | 30,57 |
| Móvil Portátil Pequeño | 20,11 |

Fuente: elaboración propia con base en INFOR, 2022c.

A continuación, para calcular la densidad promedio del residuo forestal se hace una suma ponderada entre las proporciones de los subproductos que componen el residuo forestal por cada rango productivo y la densidad de cada uno de estos.

De esta forma:

Donde,

corresponde a las densidades de cada residuo.

corresponde a la proporción de cada tipo de residuo en destino regala.

corresponde a la densidad promedio del residuo disponible según destino regala.

De la tabla N°10 obtenemos las densidades de los subproductos y de la ilustración N°15 las proporciones de estos por rango productivo.

La densidad promedio del residuo proveniente de aserraderos pequeños se desarrolla de la siguiente manera.

Para el caso de aserraderos de rango mediano, la densidad promedio sería la siguiente:

Así, los resultados obtenidos se presentan en la tabla N°15.

|  |  |
| --- | --- |
| Tipo de Aserradero | Densidad (kg/m3) |
| Permanente Mediano | 344,15 |
| Permanente Pequeño | 405,82 |
| Móvil Tradicional Pequeño | 405,82 |
| Móvil Portátil Pequeño | 405,82 |

Tabla N°15: Densidad residuo forestal por tipo de aserradero, 2021.

Fuente: elaboración propia.

Para todo tipo de aserradero pequeño se obtuvo la misma densidad. Esto, debido a que nivel regional el Instituto Forestal estudia las proporciones de los subproductos en los residuos solo por rango de producción. A nivel nacional, el Insituto Forestal realiza estas mediciones por tipo de aserradero y rango productivo, sin embargo, estos datos no fueron utilizados, ya que la región de Los Lagos solo representa el 2,4% de la producción nacional, por ende, utilizar información del 97,6% restante traería consigo una gran varianza en los datos y bajaría la eficiencia de los resultados.

A modo de resumen, se presentan los resultados obtenidos para esta sección en la tabla N°16.

Tabla N°16: Resumen Resultados y Desarrollo 4.1, 2021.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Tipo de Aserradero | Volumen Disponible (m3) | Comercializa (%) | Volumen Comercializado por aserradero (m3) | Densidad residuo (kg/m3) |
| Permanente Mediano | 1.529 | 18,5% | 282 | 344,15 |
| Permanente Pequeño | 176,38 | 77% | 135,81 | 405,82 |
| Móvil Tradicional Pequeño | 39,70 | 77% | 30,57 | 405,82 |
| Móvil Portátil Pequeño | 26,12 | 77% | 20,11 | 405,82 |

Fuente: elaboracion propia con base en INFOR, 2022c.

## 4.2 RESIDUOS NECESARIOS

Para el desarrollo de esta sección se hará uso del método de cálculo energético para plantas de biogás detallado en el capítulo 2.4.3 Cálculo de energía producida. Sin embargo, en este caso, se hará uso del método a la inversa, con el fin de determinar la energía que se desea producir para encontrar los residuos forestales necesarios.

Para encontrar el volumen de residuos forestales mensuales necesarios se hace uso de tres tamaños de plantas de biogás en cuanto a su potencia nominal. De acuerdo con el Decreto Supremo Nº119, que entró en vigor el día 2 de agosto del 2017, las plantas de biogás se clasifican según su potencia nominal (pequeñas, medianas y grandes), tecnología y uso del biogás (Ávila et al., 2020).

1. Las instalaciones pequeñas tienen una potencia nominal igual o inferior a 180 kW.
2. Las instalaciones medianas tienen una potencia nominal superior a 180 kW y hasta 900 kW.
3. Las instalaciones grandes tienen una potencia nominal superior a 900 kW.

Luego, los parámetros necesarios para esta sección son: la concentración del gas metano en el biogás, el poder calorífico inferior del gas metano, los sólidos volátiles en residuos forestales, el potencial del biogás para residuos forestales y la densidad del residuo los cuales podemos obtener del capítulo 2.4.3 Cálculo de energía producida.

Al estar enfrentados principalmente a aserraderos pequeños, es que usaremos el valor de 405,82 kg/m3 para la densidad de los residuos forestales.

En la tabla N°17 observamos los parámetros descritos:

Tabla N°17: Parámetros conversión energética.

|  |  |
| --- | --- |
| Parámetros | Valor |
| Potencia primaria: Pnominal | Planta pequeña = 180 kW |
| Planta mediana = 360 kW |
| Planta grande = 900 kW |
| Concentración de gas metano en biogás: Cmetano | 60% |
| Poder calorífico inferior del gas metano: PCImetano | 9,94 kWh/Nm3 |
| Sólidos Volátiles en residuos forestales: SV | 300 g/Kg |
| Potencial del biogás para residuos forestales: Pbiogás | 0,25 m3/kg |
| Densidad residuos: ρresiduos | 405,82 kg/m3 |

Fuente: elaboración propia.

De esta forma, los volúmenes de residuos necesarios mensualmente para las distintas escalas de planta de biogás junto con la potencia eléctrica generada se observan en la tabla N°18.

Tabla N°18: Cálculo residuos mensuales necesarios.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Variable | Pequeña | Mediana | Grande |
| Peléctrica | 54 kW | 108 kW | 270 kW |
| Pnominal | 180 kW | 360 kW | 900 kW |
| Eprimaria | 4.320 kWh/día | 8.640 kWh/día | 21.600 kWh/día |
| Qmetano | 434,61 m3 | 869,22 m3 | 2.183,04 m3 |
| Qbiogás | 724,35 m3 | 1.448,69 m3 | 3.621,73 m3 |
| SV | 2.897,4 kg | 5.794,76 kg | 14.498,96 kg |
| Residuos diarios | 9.658 kg | 19.315,87 kg | 48.329,87 kg |
| Densidad residuo | 405,82 kg/m3 | 405,82 kg/m3 | 405,82 kg/m3 |
| Residuos mensuales | 713,96 m3 | 1.427,92 m3 | 3.576,05 m3 |

Fuente: elaboración propia.

Donde:

Qmetano corresponde a la producción total de metano (m3/día).

𝐶metano corresponde a la concentración porcentual de metano presente en el biogás (%).

𝐸primaria corresponde a la energía primaria (kWh/día).

𝑃𝐶𝐼metano corresponde al poder calorífico inferior del metano (kWh/Nm3).

𝑃primaria corresponde a la potencia primaria (kW).

corresponde a la energía eléctrica generado (kW).

Qbiogás corresponde a la producción de biogás por (m3/día).

SV corresponde a la cantidad de sólidos volátiles en kilogramos.

El desarrollo completo de los cálculos de esta sección se encuentra en el Anexo N°1.

## 4.3 MODELAMIENTO DE TRANSPORTE

El enfoque entregado al problema matemático a abordar tiene como sentido la minimización de los costos de transporte de los residuos de un conjunto de 75 aserraderos de la región a un conjunto de 5 posibles localizaciones de plantas de biogás. De esta forma, se logra determinar la ubicación ideal en cuanto a los costos de transporte y se obtienen los volúmenes a ser transportados de cada aserradero a la ubicación para la planta de biogás. Además, se registran los resultados obtenidos para los 3 tamaños de plantas de biogás descritos en el capítulo 4.2.

El código de programación del problema planteado se realiza mediante Python en conjunto con el software Gurobi. Este, es un software de optimización matemática, utilizado para resolver problemas complejos de optimización. Del software, se hace uso de la librería gurobipy, la cual es una interfaz de programación de aplicaciones (API) en Python que permite a los usuarios interactuar con el motor de optimización de Gurobi desde Python

Para llevar a cabo el problema de minimización es necesario conocer los costos del transporte, la distribución de los residuos y las ubicaciones de las plantas de distribución eléctrica. La información recolectada se enumera a continuación:

1. Costos de transporte: La Subsecretaría de Transportes (2020) señala que los costos dependen de la distancia a recorrer y la carga transportada, tanto si esta es peligrosa, no-peligrosa, carga minera, entre otros factores, el cual, para nuestro caso equivale a 192 U.M/(ton\*km).

2. Distribución de residuos: la distribución de los residuos en los 75 aserraderos, los cuales se aprecian enumerados en el Anexo N°2, y sus en la región fueron abordados en el capítulo 3.4.3. Además, se consideraron las densidades de cada tipo de residuo según rango productivo.

3. Plantas de distribución eléctrica: en el desarrollo se utilizan 5 posibles ubicaciones de plantas de distribución eléctrica (ER, termoeléctricas, hidroeléctricas, entre otras), obtenidas del compendio cartográfico del año 2020 facilitado por el Ministerio de Energía de Chile (MdE, 2020), que se encuentren en sectores con alta densidad de aserraderos y qué, además, se encuentren alejadas entre sí. La idea es, mediante conexiones eléctricas, transferir la energía eléctrica generada. De esta forma se reducen costos en cuanto a inversión de tendido eléctrico. También, se pueden evitan conflictos y trabas en la obtención de servidumbres, etc.

Las plantas de distribución eléctrica consideradas son:

1. Termoeléctrica Trapén, Trapén Sur, Puerto Montt.
2. Termoeléctrica Skretting, Panamericana Sur, Osorno.
3. Hidroeléctrica Piruquina, Dalcahue.
4. Termoeléctrica Degoñ, Ancud.
5. Termoeléctrica Río Azúl, Palena.

Como se enunció previamente, estamos frente a un problema determinístico de minimización de costos de transporte. Los conjuntos necesarios para resolver nuestro problema son dos. El primero consta de los aserraderos considerados en nuestro modelamiento y el segundo de las posibles localizaciones para la planta de biogás.

Tabla N°19: Conjuntos modelamiento.

|  |  |
| --- | --- |
| Conjuntos | Descripción |
| A | Aserraderos = {1, 2, 3, 4, …, 24, 25} |
| I | Posibles localizaciones = {1, 2, 3, 4, 5} |

Fuente: elaboración propia.

En la tabla N°20 se observan los parámetros del problema, junto con su descripción y tipo de dato:

Tabla N°20: Parámetros modelamiento.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Parámetros | Descripción | Tipo |
| pa | Cantidad de residuos en metros cúbicos en aserradero “a” | Decimal >= 0 |
| di | Demanda en KiloWatts (kW) de la planta de biogás en localización “i” | Decimal >= 0 |
| cv | Costo variable unitario de transporte en $/(ton x Km) | Decimal >= 1 |
| disai | Distancia en kilómetros de aserradero “a” a localización “i” | Decimal >= 0 |
| densa | Densidad promedio del residuo forestal del aserradero “a” | Entero >= 0 |
| wai | 1; si puedo transportar de aserradero “a” a localización “i”. 0; otro. | Binario |
| t | Factor para transformar m3 a potencia en kW | Entero >= 0 |
| m | Cantidad de plantas de biogás a abrir | Entero >= 0 |
| cc | Capacidad de carga camiones en m3 de residuo | Entero >= 1 |

Fuente: elaboración propia.

De la misma manera que los parámetros, las variables creadas, junto con su descripción y tipo de dato, para resolver el problema de manera óptima se observan en la tabla N°21.

Tabla N°21: Variables modelamiento.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Variable | Descripción | Tipo |
| Xai | Cantidad de residuos en metros cúbicos enviados de aserradero “a” a localización “i” | Decimal >= 0 |
| Yi | 1; si abro planta en localización “i”. 0; otro | Binario |
| Cai | Cantidad de camiones que van de aserradero “a” a localización “i”. | Entero >= 0 |

Fuente: elaboración propia.

Las restricciones necesarias para modelar el problema planteado son las siguientes.

1. Satisfacer la demanda de las posibles plantas de biogás. Podemos notar que los parámetros a la izquierda de la sumatoria son constantes, debido a que no dependen de la composición del residuo.
2. La cantidad de residuos enviados deben ser menor a la producción de residuos.
3. Apertura de “m” fábricas. Para el caso base, m=1.
4. Número de camiones necesarios para transportar los residuos requeridos.
5. No negatividad de las variables.

Luego, para obtener los resultados deseados se definen ciertos supuestos necesarios. Estos son los siguientes:

1. Debido a que los volúmenes de residuos disponibles en cada aserradero sobrepasan notablemente la capacidad de carga de los camiones, se restringe el paso de un mismo camión por más de un aserradero, a fin de simplificar el planteamiento del problema.

2. Los volúmenes de residuos con destino a comercializar utilizados en el problema son aquellos presentados en la tabla N°14 y fueron asignados a cada uno de los 75 aserraderos con relación a sus rangos productivos y tipo de aserradero.

3. Las densidades utilizadas son aquellas presentadas en la tabla N°15 y fueron asignadas a los distintos aserraderos con relación a sus rangos productivos.

5. La empresa internacional de transporte Algevasa Logistics (AL) señala, en una publicación realizada en el año 2019, las capacidades de carga de los diferentes tipos de transporte terrestre junto con las normativas europeas. Se consideró un tipo camión de normativa N3, es decir, con capacidad de 25.000 kg, debido a que, dado el problema planteado, la cantidad promedio a transportar de un aserradero es de 50.000 kg aproximadamente.

6. El valor de costo variable fueron asignados de acuerdo con informe acerca del modelo de costos de transporte de carga publicado por la Subsecretaría de Transportes (2020).

7. El valor obtenido de la función objetivo se utiliza para obtener la localización ideal con el fin de minimizar las distancias recorridos en cuanto a costos y no representa un dato real.

Ahora, ya con los conjuntos, parámetros, variables y restricciones del problema definidos, se procede a definir la función objetivo del problema.

Esta, en términos verbales, es la sumatoria del conjunto de los aserraderos y las localizaciones en cuanto al producto enter los residuos enviados, el costo variable y la distancia recorrida.

Luego de ejecutar el código, y comprobar su correcto funcionamiento, se lleva a cabo el registro de los resultados.

Finalmente, en la tabla N°22 podemos ver los resultados del modelamiento.

Tabla N°22: Resultados Modelamiento.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Potencia Nominal | Planta 180 kW | Planta 360 kW | Planta 900 kW |
| Localización | Termoeléctrica Skretting,  Osorno | Termoeléctrica Skretting,  Osorno | Termoeléctrica Degoñ,  Ancud |
| Volúmen Enviado | 713,96 m3 | 1.510,67 m3 | 3.569,79 m3 |
| Número de Camiones | 19 | 35 | 91 |
| Función Objetivo | 981.571 U.M | 2.922.759 U.M | 45.389.888 U.M |

Fuente: elaboración propia.

Como se observa en la tabla N°22, la ubicación ideal para las plantas de biogás de potencia nominal de 180 kW y 360 kW es en la localización de la termoeléctrica Skretting de Osorno. Para una planta de biogás de potencia nominal 900 kW la ubicación ideal corresponde a la central termoeléctrica Degañ en Ancud, Chiloé.

El volumen total enviado desde los distintos aserraderos equivale a 713,96 m3, 1.510,67 m3 y 3.569,79 m3 para las plantas de biogás de escala pequeña, mediana y grande, respectivamente.

La cantidad de camiones utilizados para el trasnporte de estos fueron de 19, 35 y 91 para las plantas de biogás de escala pequeña, mediana y grande, respectivamente.

# 5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

## 5.1 DISPONIBILIDAD RESIDUOS FORESTALES

En el capítulo 4.1 se llevó a cabo el desarrollo del objetivo específico N°1 del trabajo. Este desarrollo buscó determinar la disponibilidad de residuos forestales en la región de Los Lagos junto con su clasificación, parámetros de los subproductos y los volúmenes por cada aserradero según tipo y rango productivo.

En primer lugar, se calcularon los residuos disponibles en los aserraderos permanentes, móviles tradicionales y móviles portátiles en cuanto a su rango productivo. En esta ocasión, los aserraderos permanentes generan la mayor parte de los residuos de la región, alcanzando los 8.703,5 m3 de un total de 11.658,25 m3 mensuales. Como podemos ver en la Ilustración N°11, los aserraderos permanentes se posicionan en rangos productivos mayores a los demás tipos de aserraderos, por ende, es lógico pensar que generan mayores volúmenes de residuos al pertenecer a rangos productivos más altos.

En segundo lugar, se calcularon los volúmenes mensuales generados en promedio por cada aserradero haciendo uso de la siguiente expresión matemática:

Donde:

VMP: Volumen mensual promedio de residuos por aserradero en metros cúbicos.

t: tipo de aserradero (permanente, móvil tradicional, móvil portátil).

r: rango de producción (pequeño, mediano).

En la primera sección del capítulo de Desarrollo y Resultados, se observó que el conjunto de aserraderos permanentes pequeños es aquel que genera el mayor volumen de residuos de la región, sin embargo, individualmente hablando, son los aserraderos permanentes medianos los que contienen mayor volumen de residuos debido a que su volumen total de residuos generados se divide entre 2 aserraderos a diferencia de los 32 permanentes pequeños. Esta información se puede observar en la tabla N°23.

Tabla N°23: Volumen en m3 promedio de residuos por tipo de aserradero, 2021.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Tipo de Aserradero por rango productivo | Número de Aserraderos | Volumen Mensual Promedio (m3) | Volumen Mensual Promedio por Aserradero (m3) |
| Permanente Mediano | 2 | 3.059,58 | 1.529 |
| Permanente Pequeño | 32 | 5.644 | 176,38 |
| Móvil Tradicional Pequeño | 6 | 238.2 | 39,70 |
| Móvil Portátil Pequeño | 104 | 2.716,48 | 26,12 |

Fuente: elaboración propia con base en INFOR, 2022c.

Para simplificar la visualización, se presenta la ilustración N°18.

Ilustración N°18: Volumen en m3 promedio de residuos por tipo de aserradero, 2021

Fuente: elaboración propia con base en INFOR, 2022c.

Este análisis nos entrega información relevante no incluida en el informe de subproductos del aserrío del INFOR del año 2022. Este nos lleva a concluir que la mayoría de los residuos forestales se generan en los aserraderos permanentes de rango productivo pequeño, debido a que estos son 32 en comparación a los 2 de rango productivo mediano. Sin embargo, no es así si es visto de manera individual.

Ahora, nos interesa conocer los volúmenes de residuos que están disponibles para ser comercializados. En la región, los aserraderos pequeños comercializan el 77% de sus residuos, mientras que los aserraderos medianos solo el 18,5% de estos. De esta forma, la balanza se equilibra, permitiendo una distribución más homogénea de los residuos a comercializar en la región en los distintos tipos de aserradero.

Expresado de manera matemática:

Donde:

VCM: Volumen con destino a ser comercializado mensualmente en metros cúbicos.

VMP: Volumen mensual promedio de residuos por aserradero en metros cúbicos.

t: tipo de aserradero (permanente, móvil tradicional, móvil portátil).

r: rango de producción (pequeño, mediano).

C: Proporción del residuo a ser comercializado.

De esta forma se calculan los VCM, cuyos resultados se presentan en la tabla N°24.

Tabla N°24: Volumen con destino a ser comercializado mensualmente, 2021.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Tipo de Aserradero | Volumen Mensual Promedio  (VMP) (m3) | Comercializa (%) | Volumen Comercializado (VCM) (m3) |
| Permanente Mediano | 1.529 | 18,5% | 282 |
| Permanente Pequeño | 176,38 | 77% | 135,81 |
| Móvil Tradicional Pequeño | 39,70 | 77% | 30,57 |
| Móvil Portátil Pequeño | 26,12 | 77% | 20,11 |

Fuente: elaboración propia.

.

La información de la tabla N°24 se puede observar en la ilustración N°19.

Ilustración N°19: Volumen residuos disponibles versus comercializados, 2021.

Fuente: elaboración propia con base en INFOR, 2022c.

Como podemos ver en la ilustración N°19 (INFOR, 2022c), los aserraderos permanentes medianos comercialicen una pequeña parte de sus residuos, sin embargo, estas cantidades siguen siendo mayores a los volúmenes comercializados por los aserraderos permanentes pequeños a pesar de comercializar el 77% de sus residuos.

A continuación, se procedió a calcular la densidad de los residuos comercializados. Esto se llevó a cabo mediante una suma ponderada entre las densidades de los subproductos que componen los residuos forestales con las proporciones por rango productivo.

La densidad del residuo promedio de los aserraderos medianos resultó ser menor a la de los aserraderos pequeños. Esto ocurre debido a que el principal subproducto de los residuos de aserraderos medianos corresponde a aserrín, el cual tiene una densidad de 300 kg/m3, mientras que en los aserraderos pequeños el principal subproducto corresponde a lampazos con una densidad de 460 kg/m3. El hecho de generar residuos de densidad menor perjudica la generación de biogás, al necesitar mayor volumen para generar cierta cantidad de biogás en comparación a un residuo de densidad mayor.

## 5.2 RESIDUOS NECESARIOS

Para calcular los residuos necesarios para suplir la demanda de distintas escalas de plantas de biogás se utilizó un método para calcular la energía eléctrica producida a partir de cierto volumen de residuos (Ávila et al., 2020). En este caso en particular, se empleó de manera inversa para encontrar el volumen necesario para alcanzar cierta generación eléctrica.

En la tabla N°25 vemos el resumen de los resultados obtenidos.

Tabla N°25: Resumen Residuos necesarios.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Variable | Pequeña | Mediana | Grande |
| Peléctrica | 54 kW | 108 kW | 270 kW |
| Pnominal | 180 kW | 360 kW | 900 kW |
| Residuos mensuales | 713,96 m3 | 1.427,92 m3 | 3.576,05 m3 |

Fuente: elaboración propia.

Para el desarrollo de esta sección, se hizo uso de la densidad de residuos de aserraderos pequeños, es decir, de 405,82 kg/m3. Esto, ya que componen la mayor parte de los aserraderos de la región, sumado al hecho de que no conocemos de donde provenien los residuos, por ende, no conocemos su composición.

Vemos que las potencias eléctricas aportada por parte de las plantas de biogás de pequeña, mediana y gran escala equivalen a 54 kW, 108 kW y 270 kW, respectivamente. A modo de comprender de mejor manera lo que estos valores aportan, se estableceran ciertas equivalencias.

Energía Región Beta (2022), señala que el consumo eléctrico residencial por cliente equivale a 191 kWh/mes para la región de Los Lagos para el año 2022. Si multiplicamos las distintas potencias eléctricas obtenidas por unidad de tiempo, obtenemos los datos presentados en la tabla N°26.

Tabla N°26: Equivalencia casas.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Parámetros | Planta Pequeña | Planta Mediana | Planta Grande |
| Potencia Eléctrca (kW) | 54 | 108 | 270 |
| Generación eléctrica mensual (kWh/mes) | 38.880 | 77.760 | 194.400 |
| Consumo eléctrico residencial por cliente (kWh/mes) | 191 | 191 | 191 |
| Posible número de residencias a abastecer mensualmente | 203,56 | 407,12 | 1.017,80 |

Fuente: elaboración propia.

De esta forma, queda en evidencia que, mediante la implementación de una planta de biogás de pequeña, mediana y gran escala se podrían abastecer mensualmente un aproximado de 200, 400 y 1000 casas, respectivamente, con energia renovable.

En el informe Bosques Energía Sociedad número 15 de INFOR (2022d), el autor señala que la región de Los Lagos es, a nivel nacional, la región que más consume leña. Debido a esto, es que se usará la leña como segunda equivalencia.

El eucalipto es la principal especie consumida en forma de leña en la región (INFOR, 2022d). Su poder calorífico equivale a 4.800 kCal/kg (Rojas, Perret y Molina, 2007).

De acuerdo a Pepeenergy (2020), las estufas eléctricas consumen entre 800 y 2000 Watts. Se considerará como potencia base los 2000 Watts, equivalentes a 1719,69 kCal/h.

Luego, procedemos a dividir el poder calorífico del eucalitpo por la potencia de una estufa eléctrica.

Donde:

NE: Número de estufas eléctricas de 2000 W por hora.

De esta forma, NE equivale a 2,79 estufas eléctricas. Esto significa que si dejamos, hipotéticamente, 2,79 estufas eléctricas de 2000 Watts funcionando por una hora, se libera la misma energía que al consumir 1 kg de leña de eucalipto.

Ahora, calculamos el número de estufas eléctricas de 2000 Watts que son capaces de abastecer las distintas escalas de plantas de biogás.

Donde:

N: Número de estufas eléctricas de 2000 Watts para cada potencia eléctrica.

Los resultados de esta sección se presentan en la tabla N°27.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Parámetros | Planta Pequeña | Planta Mediana | Planta Grande |
| Potencia (kW) | 54 | 108 | 270 |
| Potencia Estufa Eléctrica (kW) | 2 | 2 | 2 |
| N | 27 | 54 | 135 |

Tabla N°27: Número de estufas.

Fuente: elaboración propia.

Podemos observar que las plantas de de biogás pequeña, mediana y gran escala pueden abastecer a 27, 54 y 135 estufas eléctricas, respectivamente.

Finalmente, realizamos la división entre N y NE para encontrar la cantidad de kilogramos de leña de eucalipto equivalente a la potencia de las distintas plantas de biogás.

Donde:

E: Kilogramos de leña de eucalipto hora.

N: Número de estufas eléctricas de 2000 Watts para cada potencia eléctrica.

NE: Número de estufas eléctricas de 2000 Watts por hora.

Los resultaods obtenidos se pueden observar en la tabla N°28.

Tabla N°28: Kilogramos de leña de eucalipto.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Parámetros | Planta Pequeña | Planta Mediana | Planta Grande |
| Potencia eléctrica (kW) | 54 | 108 | 270 |
| E (kg\*hora) | 9,68 | 19,36 | 48,39 |
| E (kg\*mes) | 6.969,6 | 13.939, 2 | 34.838,71 |

Fuente: elaboración propia.

De esta forma, hipotéticamente, si la gente dejara de consumir leña para hacer uso de la energía renovable generada por plantas de biogás de escala pequeña, mediana y grande, se dejarían de consumir de manera aproximada 6.9, 13.9 y 34.8 toneladas, respectivamente, de leña de eucalipto.

Este análisis fue desarrollado para entregar un mejor entendimiento de los resultados obtenidos en cuanto a las distintas potencias eléctricas de las plantas.

Por último, la región de Los Lagos actualmente tiene una capacidad instalada de 138.000 kW (Energía Región Beta, 2023). Dadas las potencias eléctricas generadas, podemos ver el incremento porcentual en la capacidad instalada de la región en la tabla N°29.

Tabla N°29: Incremento en capacidad instalada, 2022.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Parámetros | Planta Pequeña | Planta Mediana | Planta Grande |
| Potencia Eléctrica (kW) | 54 | 108 | 270 |
| Incremento en la capacidad instalada | 0,039% | 0,078% | 0,20% |

Fuente: elaboración propia.

## 5.3 MODELAMIENTO

El modelamiento matemático se basa en una minimización de los costos de transportar residuos forestales desde una variedad de aserraderos distribuidos a lo largo de la región a una posible localización para distintas escalas de plantas de biogás.

Para el modelamiento se consideraron 75 aserraderos de un total de 144 enumeradas en el Anexo N°2.

En cuanto a las plantas de biogás, se consideraron 5 posibles localizaciones en la región de Los Lagos, las cuales fueron elegidas bajo dos criterios: i) Que se encuentren alejadas entre sí, y ii) que se encuentren inmersas en sectores altamente poblados de aserraderos. Estas fueron obtenidas del compendio cartográfico del Ministerio de Energía (2020) disponible en el Anexo N°3. Las plantas eléctricas utilizadas fueron:

1. Termoeléctrica Trapén, Trapén Sur, Puerto Montt.
2. Termoeléctrica Skretting, Panamericana Sur, Osorno.
3. Hidroeléctrica Piruquina, Dalcahue.
4. Termoeléctrica Degoñ, Ancud.
5. Termoeléctrica Río Azúl, Palena.

El costo asignado al transporte es del tipo 192 U.M/(ton\* km) (Subsecretaria del Transporte, 2020)

En cuanto a los residuos disponibles de los distintos aserraderos, las estimaciones de sus respectivos volúmenes fueron asignados según su rango productivo, tipo de aserradero y destino a ser comercializados. Además, se les asigno una densidad específica, las cuales fueron calculadas mediante una suma ponderada entre las proporciones de los subproductos que componen los distintos residuos.

Se consideró un tipo camión de normativa N3, es decir, con capacidad de 25.000 kg, debido a que, dado el problema planteado, la cantidad promedio a transportar de un aserradero es de 50.000 kg aproximadamente (AL, 2019).

Los resultados obtenidos fueron los presentados en la tabla N°30.

Tabla N°30: Resultados modelamiento resumen.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Potencia Nominal | Planta 180 kW | Planta 360 kW | Planta 900 kW |
| Localización | Termoeléctrica Skretting,  Osorno | Termoeléctrica Skretting,  Osorno | Termoeléctrica Degoñ,  Ancud |
| Volúmen Enviado | 713,96 m3 | 1.510,67 m3 | 3.569,79 m3 |
| Número de Camiones | 19 | 35 | 91 |
| Función Objetivo | 127.808,7 U.M | 380.567,6 U.M | 5.910.142 U.M |

Fuente: elaboración propia.

Como podemos observar en la tabla N°30, la ubicación ideal tanto para la planta pequeña como mediana corresponde a la Termoeléctrica Skretting, Osorno. Para la planta grande, la ubicación ideal es en la Termoeléctrica Degoñ en Ancud. Mayores detalles de los valores de las variables del problema se pueden ver en el Anexo N°5.

Podemos observar, que a medida que se incrementa la potencia nominal, los residuos necesarios aumentan de manera proporcional. Sin embargo, no ocurre lo mismo con los camiones. Se puede ver que, al duplicar la potencia nominal de 180 kW a 360 kW, es decir, el doble, la cantidad de camiones no alcanzan a duplicarse. Ocurre algo similar al incrementar la potencia a 900 kW, pero la disminución de los camiones es proporcionalmente menor. Esto evidencia que, a medida que se incrementa la potencia nominal, la cantidad de camiones a utilizar aumenta de manera decreciente. Esto ocurre, ya que a medida que aumenta la potencia nominal, las distancias a recorrer para obtener los residuos son también mayores, logrando así tener mayor variedad de aserraderos con distintos volúmenes disponibles de residuos a distancias similares, por ende, el camión no debe conformarse con el aserradero más cercano, si no que puede “optar” por otro a igual o similar distancia que presente mayor volumen de residuos.

En cuanto a la función objetivo, en este caso, los costos de transporte, ocurre lo contrario a los camiones. A medida que se incrementa la potencia nominal, los costos de transporte aumentan de manera creciente. Esto ocurre debido al gran número de camiones a utilizar para suplir la demanda. Los aserraderos con mayor volumen de residuos se agotan y los camiones deben dirigirse a aserraderos que, no solo se encuentran a grandes distancias de la ubicación de la planta de biogás, sino que también poseen volúmenes de residuos menores.

# 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La región de Los Lagos, para el año 2021, presentó una amplia disponibilidad de residuos forestales distribuidos en sus 144 aserraderos operativos para el período. El volumen total de residuos constatados para el período equivale a 139.899 metros cúbicos. La clasificación de estos se realizó en cuanto a los subproductos que lo componen, es decir, las proporciones de aserrín, viruta, lampazos, despuntes y corteza. Además, se obtuvieron las densidades de los subproductos de los residuos con el fin de estimar la densidad promedio de estos. También, se clasificaron en cuanto al tipo de aserradero y rango productivo, debido a que estos generan cantidades distintas de subproductos al hacer uso de diferentes tecnologías en el proceso del aserrado. Además, se clasificaron por destino, con el fin de obtener los volúmenes para cada aserradero de residuos disponibles a ser comercializados. Finalmente, se logró estimar los volúmenes disponibles a ser comercializados en cada aserradero haciendo uso de las clasificaciones mencionadas. Se constató, que, si bien la mayor parte de los residuos de la región son generados por aserraderos de rango productivo pequeño, es decir, con una producción de madera aserrada anual menor a 10.000 metros cúbicos, es en los aserraderos de rango productivo mediano, es decir, entre 10.000 y 100.000 metros cúbicos de producción de madera aserrada anual, en los que se encuentra mayor concentración de residuos forestales, especialmente en los permanentes, a pesar de la baja tasa de comercialización de residuos que manejan.

El desarrollo para obtener los residuos forestales necesarios para suplir la potencia nominal de diferentes escalas de plantas de biogás se llevó a cabo mediante un método publicado en el año 2007 por la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH en conjunto con la Comisión Nacional de Energía. La metodología de este implicaba proponer un volumen de biomasa, en conjunto con sus parámetros, para calcular la potencia nominal o energía eléctrica generada. Se hizo uso invertido de este método, es decir, se comenzó de atrás para adelante, proponiendo la potencia nominal que sea obtener, y, utilizando los parámetros de los residuos previamente calculados, en conjunto con el potencial del biogás, el poder calorífico inferior, entre otros, se obtuvieron los volúmenes de residuos mensuales necesarios para alcanzar la potencia nominal propuesta. La potencia eléctrica obtenida de las distintas escalas de plantas de biogás corresponde a 54 kW, 108 kW y 270 kW, respectivamente, por ende, el aporte de energía eléctrica mensual para cada una equivale a 38.880 kWh, 77.760 kWh y 194.400 kWh por mes, generando un incremento de un 0,039%, 0,078% y 0,20%, respectivamente, en la capacidad instalada de la región. Energía Región Beta (2022) señala que el consumo mensual promedio residencial por cliente equivale a 191 kWh/mes. De esta forma, sabemos que las distintas escalas de plantas pueden suplir, de manera estimada, la demanda energética promedio de 200, 400 y 1.000 casas de la región, respectivamente, promoviendo así el uso de energías renovables sustentables. Además, utópicamente, eliminarian el consumo de 6.9, 13.9 y 34.8 toneladas de leña de eucalipto por mes, permitiendo así una disminución en la extracción de recursos naturales y la contaminación ambiental de la región como iniciativa de economía circular.

La localización ideal para cada escala de planta de biogás fue encontrada mediante el desarrollo de un modelo matemático con el objetivo de minimizar los costos de transporte de los residuos. Para llevarlo a cabo, se hizo uso de las estimaciones de los volúmenes de residuos a ser comercializados previamente calculados en conjunto con las localizaciones de 75 aserraderos y 5 posibles plantas de biogás a lo largo de la región. Además, se llevó a cabo el registro de las distancias entre los aserraderos y las posibles plantas de biogás. Para las plantas de pequeña y mediana escala, es decir, de potencias nominales de 180 y 360 kW, respectivamente, la localización ideal fue hallada en la Termoeléctrica Skretting en Osorno y para la planta de 900 kW, esta fue en la Termoeléctrica Degoñ en Ancud. A medida que aumenta la potencia nominal de la planta de biogás, los residuos necesarios para suplir la demanda aumentan de manera proporcional. La cantidad de camiones también aumentan, pero de manera decreciente y los costos de transporte, es decir, la función objetivo, aumentan, pero de manera creciente.

# 7. BIBLIOGRAFÍA

Algevasa Logistics (2019). *La capacidad de carga en el transporte*. Barcelona: AL. Disponible en: https://www.algevasa.com/la-capacidad-de-carga-en-el-transporte/#:~:text=Livianos%3A%20cuya%20capacidad%20est%C3%A1%20entre,y%20las%207%2C5%20t oneladas [Consultado 21-08-2023]

Aqualimpia (2017). Aqualimpia. Disponible en: https://www.aqualimpia.com/digestion-anaerobica/#:~:text=La%20metanog%C3%A9nesis%20es%20la%20ultima,H2)%20y%20di%C3%B3xido%20de%20carbono. [Csonultado 11-04-2023]

Ávila, M., Bahamondes, P., De La Cerda, C., Elliot, B., Moraga, A., Quiroz, A., Soto, P. (2020). *Guía para el instalador*. Santiago: Deutsche Gesellschaft für

Internationale Zusammenarbeit GmbH. Disponible en: https://4echile.cl/wpcontent/uploads/2020/10/Gu%C3%ADa-para-el-instalador.pdf [Consultado 29-06-2023]

Banco Mundial (2018). *Los desechos a nivel mundial crecerán un 70 % para 2050, a menos que se adopten medidas urgentes*. Washington: BM. Disponible en: https://www.bancomundial.org/es/news/press-release/2018/09/20/global-waste-to-grow-by-70-percent-by-2050-unless-urgent-action-is-taken-world-bank-report [Consultado 11-05-2023]

Barria, C., Sandoval, S. y Gerson, R. (2017). *Maderas. ciencia y tecnología*. Concepción: n/a. Disponible en: https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci\_abstract&pid=S0718-221X2017000300010&lng=n&nrm=iso [Consultado 20-07-2023]

Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (2022). *Actividades económicas Los Lagos*. Santiago: BCN. Disponible en: <https://www.bcn.cl/siit/nuestropais/nuestropais/region10/> [Consultado 21-03-2023]

BioTech (2022). BioTech, Disponible en: http://biotech-spain.com/es/articles/optimizaci-n-de-producci-n-y-rendimiento-de-una-planta-de-biog-s-con-residuos-org-nicos/ [Consultado 13-11-2022]

Cardemil Winkler, M. (2021). *Industria forestal en Chile.* Santiago: n/a. Disponible en: https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/32419/1/N\_68\_21\_Industria\_Forestal\_en\_Chile.pdf [Consultado 10-06-2023]

Carrasco Allendes, J. L. (2015). *EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE BIOGÁS PARA AUTOABASTECIMIENTO ENERGÉTICO*. Trabajo Fin de Grado. Universidad de Chile. Disponible en: https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/133520/Evaluacion-tecnica-y-economica-deuna-planta-debiogas.pdf?sequence=1 [Consultado 01-05-2023]

CENSO (2017)*.* CENSO Disponible en: http://www.censo2017.cl/ [Consultado 23-05-2023]

Comisión Nacional de Energía (2007). *PROYECTOS DE BIOMASA.* Santiago: CNE. Disponible en: https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/guiabiomasaeia.pdf [Consultado 17-06-2023]

Comisión Nacional de Energía (2022a). *INFORME PRELIMINAR DE PREVISIÓN*

*DE DEMANDA 2022-2042.* Santiago: CNE. Disponible en: https://www.cne.cl/wp-content/uploads/2022/12/Informe-Preliminar-Prevision-de-Demanda-2022-2042.pdf [Consultado 13-03-2023]

El Mostrador (2021). El Mostrador. Disponible en: https://www.elmostrador.cl/noticias/opinion/columnas/2021/10/12/crisis-energetica-mundial-como-impacta-en-chile/ [Consultado 10-03-2023]

Ellen MacArthur Foundation (2018). *Pilares de la economía circular*. Isle of Wight: EMF. Disponible en: https://ellenmacarthurfoundation.org/es/temas/presentacion-economia-circular/vision-general [Consultado 16-05-2023]

Energía Región Beta (2022). Energía Región Beta. Disponible en: https://energiaregion.cl/region/LAGOS [Consultado 22-08-2023]

Ente Nacional para la Energía Eléctrica (2019).Ente Nacional para la Energía Eléctrica. Disponible en: https://corporate.enelx.com/es/question-and-answers/what-are-cogeneration-systems#:~:text=La%20cogeneraci%C3%B3n%20es%20un%20sistema,dos%20fuentes%20de%20producci%C3%B3n%20separadas [Consultado 21-07-2023]

Fundeen (2023). Fundeen. Disponible en: https://www.fundeen.com/blog-energias-renovables/cuales-son-los-beneficios-del-biogas [Consultado 10-4-2023]

Generadoras de Chile (2023). Generadoras de Chile. Disponible en: http://generadoras.cl/generacion-electrica-en-chile [Consultado 01-08-2023]

Genia Bioenergy (2023). Genia Bioenergy. Disponible en: https://geniabioenergy.com/plantas-biogas-pequena-escala/ [Consultado 05-07-2022]

Gobierno Regional de Los Lagos (2019)*. Estrategia Regional de Desarrollo Los Lagos*. Puerto Montt: GORE. Disponible en: https://www.goreloslagos.cl/resources/descargas/erd\_2030/ERD\_LosLagos\_2030.pdf [Consultado 04-03-2023]

Grupo Sinelec (2023). Grupo Sinelec. Disponible en: https://blog.gruposinelec.com/actualidad/energias-renovables-tipos-y-caracteristicas/ [Consultado 06-03-2023]

Gunt Hamburg (2023). Gunt Hamburg. Disponible en: https://www.gunt.de/es/productos/2e-energy/biomasa/planta-de biogas/083.64200/ce642/glct-1:pa-150:ca-675:pr-70 [Consultado 02-03-2023]

Instituto Forestal (2007). *Disponibilidad de residuos madereros*. Santiago: INFOR. Disponible en: https://energypedia.info/images/0/0f/Potencial\_Residuos\_Madereros\_GTZ.pdf [Consultado 04-05-2023]

Instituto Forestal (2021a). *Pino radiata representa el 97,2% de la producción nacional de madera aserrada. Principal destino, el mercado local.* Santiago: INFOR. Disponible en: https://wef.infor.cl/index.php/destacados/industria-primaria/pino-radiata-representa-el-97-2-de-la-produccion-nacional-de-madera-aserrada-principal-destino-el-mercado-local [Consultado 22-04-2023]

Instituto Forestal (2022a). *La industria del aserrío 2022.* Santiago: n/a. Disponible en: https://wef.infor.cl/index.php/publicaciones/boletines-estadisticos/la-industria-del-aserrio [Consultado 14-03-2023]

Instituto Forestal (2022b). *Estadísticas regionales.* Santiago: INFOR. Disponible en: https://wef.infor.cl/index.php/sector-forestal/estadisticas-regionales/region-de-los-lagos [Consultado 21-03-2023]

Instituto Forestal (2022c). *SUBPRODUCTOS MADEREROS DE LA INDUSTRIA DEL ASERRÍO 2022.* Santiago: INFOR. Disponible en: https://wef.infor.cl/index.php/publicaciones/boletines-estadisticos/subproductos-madereros-del-aserrio [Consultado 10-04-2023]

Instituto Forestal (2022d). *Bosques Energía Sociedad N°15.* Santiago: INFOR. Disponible en: https://observatoriobes.infor.cl/media/2023/02/BES15\_liviano-28DIC.pdf [Consultado 26-08-2023]

Instituto Forestal (2023). *Mapa Industria*. Santiago: INFOR. Disponible en: https://wef.infor.cl/index.php/mapa-industria [Consultado 07-11-2022]

Keil, G. D., Taraborelli, C. (2022). *Proceso de aserrado: sierras y mecanismos*

*Complementarios.* Buenos Aíres: n/a. Disponible en: http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/144526/Documento\_completo.pdf?sequence=1 [Consultado 19-06-2023]

Lesmes, R., Oliva, L. O., Palacios, A., Lesmes, N. L. (2006). *Coeficientes de residuos de la industria forestal.* Santiago de Cuba: n/a. Disponible en: https://www.redalyc.org/pdf/4455/445543751004.pdf [Consultado 23-06-2023]

Maderea (2021). Maderea. Disponible en: https://www.maderea.es/productos-de-madera-procedentes-de-aserraderos/ [Consultado 27-08-2023]

Martínez, G., J.M., Cellini, M.V., Lencinas, B. D., P.L., Vukasovic, R. F., 2002. *Funciones de rendimiento volumétrico en pie y en aserradero para la Lenga.* En: Nothofagus

pumilio. Ciencias Forestales 15(1-2):32-45. [Consultado 20-08-2023]

Ministerio de Agricultura (2021). *Estadísticas Forestales del Ministerio de Agricultura de Chile*. Santiago: MdA. Disponible en: <https://www.conaf.cl/nuestros-bosques/bosques-en-chile/estadisticas-forestales/> [Consultado 24-04-2023]

Ministerio de Energía (2020), *Compendio Cartográfico, Proyectos e Instalaciones de generación eléctrica en Chile*. Santiago: MdE. Disponible en: <https://www.energia.gob.cl/sites/default/files/compendio_cartografico_junio_2020.pdf> [Consultado 22-06-2023]

Ministerio de Energía (2023a). *Energía 2050*. Santiago: MdE Disponible en: https://www.energia.gob.cl/sites/default/files/energia\_2050\_-\_politica\_energetica\_de\_chile.pdf [Consultado 10-03-2023]

Ministerio de Energía (2023b). *Hoja de Ruta 2050*. Santiago: MdE. Disponible en: https://www.energia.gob.cl/sites/default/files/hoja\_de\_ruta\_cc\_e2050.pdf [Consultado 10-03-2023]

Ministerio del Medio Ambiente (2021). *Estrategia Climática de Largo Plazo 2050.* Santiago: MdMA. Disponible en: https://cambioclimatico.mma.gob.cl/estrategia-climatica-de-largo-plazo-2050/descripcion-del-instrumento/ [Consultado 17-05-2023]

Muñoz G., N. (2021). “Crisis energética mundial, ¿cómo impacta en Chile?” *El Mostrador.*

Santiago: n/a. Disponible en: https://www.elmostrador.cl/noticias/opinion/columnas/2021/10/12/crisis-energetica-mundial-como-impacta-en-chile/ [Consultado 10-03-2023]

Naciones Unidas (2021). *Si no actuamos, nos quedamos sin planeta: la ONU lanza un plan a diez años para restaurar los ecosistemas dañados*. New York: ONU. Disponible en: https://news.un.org/es/story/2021/06/1492922 [Consultado 12-05-2023]

Naciones Unidas (2023). *¿Qué son las energías renovables?* New York: ONU. Disponible en: https://www.un.org/es/climatechange/what-is-renewable-energy [Consultado 11-03-2023]

National Geographic (2022). National Geographic*.* Disponible en: https://www.nationalgeographic.com.es/naturaleza/2022-ya-ha-entrado-numeros-rojos-materia-sostenibilidad\_18629 [Consultado 10-05-2023]

Parlamento Europeo (2023). *Economía circular: definición, importancia y beneficios*. Estrasburgo: PE. Disponible en: https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/economy/20151201STO05603/economia-circular-definicion-importancia-y-beneficios [Consultado 22-08-2023]

PlanET Biogás Global (2023). PlanET Biogás Global. Disponible en: https://planet-biogas.com/es/beneficios-del-biogas/#:~:text=El%20biog%C3%A1s%20puede%3A,la%20calidad%20de%20la%20energ%C3%ADa [Consultado 10-4-2023]

Prensa Portal Innova (2022). Prensa Portal Innova. Disponible en: https://portalinnova.cl/el-gran-desafio-energetico-que-hoy-enfrenta-chile-yelmundo/#:~:text=Desde%20hace%20m%C3%A1s%20de%20una,cambio%20clim%C3%A1tico%2C%20entre%20otras%20variantes [Consultado 05-04-2023]

Peña F., E. y Acuña C., E. (2012). *Residuos de la cosecha forestal: Aprovechamiento*. Universidad de Concepción: n/a. Disponible en: https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/20.500.14001/7856/NR40206.pdf?sequence=15&isAllowed=y [Consultado 04-03-2023]

Pepeenergy (2020). Pepeenergy. Disponible en: https://www.pepeenergy.com/blog/descubre-cuanto-consumen-electrodomesticos-casa/#:~:text=Las%20estufas%20tambi%C3%A9n%20funcionan%20convirtiendo,en%20los%20modelos%20m%C3%A1s%20potentes. [Consultado 26-08-2023]

Propanogas (2023). *Poder Calorífico: PCI y PCS del gas propano en kWh/kg o kWh/m3.* Madrid: n/a. Disponible en: https://propanogas.com/faq/poder-calorifico-gas-propano [Consultado 30-06-2023]

Proyecto Energías Renovables No Convencionales en Chile (2007). *Potencial de Biogás*. Santiago: PERNCC. Disponible en: https://energypedia.info/images/d/dc/Potencial\_Biogas\_Chile.pdf [Consultado 10-04-2023]

Repsol Global (2018). Repsol Global. Disponible en: https://www.repsol.com/es/sostenibilidad/economia-circular/index.cshtml [Consultado 14-05-2023]

Recytrans Soluciones Globales para el Reciclaje (2020). Recytrans Soluciones Globales para el Reciclaje. Disponible en: https://www.recytrans.com/blog/como-funcionan-las-plantas-de-biogas/ [Consultado 11-03-2023]

Roams (2023). Roams. Disponible en: https://energia.roams.es/energia-renovable/biogas/planta/ [Consultado 13-05-2023]

Rojas, P., Perret, S. y Molina, M. P. (2007). *Ensayos de Hibridación Artificial*. Disponible en: <https://revista.infor.cl/index.php/infor/article/download/285/286/326#:~:text=Su%20madera%20es%20de%20alto,la%20celulosa%20y%20el%20papel>. [Consultado 27-08-2023]

Rosso, F. C. (2021). *La Economía Circular como metodología para implementar en las Startups*. Bengaluru: n/a. Disponible en: https://wfglobal.org/latam/la-economia-circular-como-metodologia-para-implementar-en-las-startups/ [Consultado 12-05-2023]

Subsecretaria de Transportes (2020). *Actualización de Modelo de Costos de Transporte de Carga para el Análisis de Costos Logísticos, del Observatorio Logístico.* Santiago: SdT. Disponible en: https://www.subtrans.gob.cl/wpcontent/uploads/2020/09/Actualizacio%CC%81n-de-Modelo-de-Costos-de-Transporte-de-Carga-para-el-Ana%CC%81lisis-de-Costos-Logi%CC%81sticos-del-Observatorio-Logi%CC%81stico.pdf [Consultado 27-07-2023]

Tauro, R. J., Caballero, J. L., Salinas, M. A., Ghilardi, A. y Arroyo, J. M. (2021). *Evaluación del potencial energético de los recursos biomásicos en Honduras.* Honduras: n/a. Disponible en: https://www.cepal.org/es/publicaciones/47650-evaluacion-potencial-energetico-recursos-biomasicos-honduras [Consultado 05-06-2023]

Torrecilla del Rey, A. (2021). *Potencial de distintos residuos orgánicos para la producción de biogás vía digestión y codigestión anaerobia.* Grado en Ingeniería Química.

Universidad de Valladolid. Disponible en: https://uvadoc.uva.es/handle/10324/48763 [Consultado 02-06-2023]

Trejo, J., Ninin, P. y Rosso, F. (2011). *Calidad de los productos aserrados de madera como efecto de la calidad del acabado del filo de las sierras de cintas.* Mérida: Autana Books. Disponible en: http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\_arttext&pid=S1316-48212011000400007#:~:text=El%20aserrado%20de%20la%20madera,del%20empleo%20de%20sierras%20de [Consultado 27-08-2023]

Varnero, M. (2011). *Manual del Biogás*. Santiago: FAO (Organización de las Naciones

Unidas para la Alimentación y la Agricultura), p. 33-55. Disponible en: https://www.energia.gob.cl/sites/default/files/manual\_de\_biogas.pdf [Consultado 03-05-2023]

Vegetarianos Hoy (2022). Vegetarianos Hoy. Disponible en: https://vegetarianoshoy.org/primera-planta-de-biogas-transformara-residuos-en-energia-limpia-en-chile/ [Consultado 01-08-2023]

# 8. ANEXOS

## ANEXO 1: CÁLCULOS RESIDUOS NECESARIOS

Para el caso de una planta de biogás de pequeña escala, es decir , los pasos son los siguientes (GIZ, 2020):

1. Calcular la energía primaria.

2. Calcular la producción total de gas metano.

3. Calcular la producción total de biogás.

4. Calcular la cantidad de sólidos volátiles en kilogramos.

5. Finalmente, calcular los residuos necesarios para alcanzar la meta de potencia.

Para el caso de una planta de biogás de mediana escala, es decir , los pasos son los siguientes:

1. Calcular la energía primaria.

2. Calcular la producción total de gas metano.

3. Calcular la producción total de biogás.

4. Calcular la cantidad de sólidos volátiles por día en kilogramos

5. Finalmente, calcular los residuos necesarios para alcanzar la meta de potencia.

Para el caso de una planta de biogás de gran escala, es decir , los pasos son los siguientes:

1. Calcular la energía primaria.

2. Calcular la producción total de gas metano.

3. Calcular la producción total de biogás.

4. Calcular la cantidad de sólidos volátiles por día en kilogramos

5. Finalmente, calcular los residuos necesarios para alcanzar la meta de potencia.

.

## ANEXO 2: LISTA ASERRADEROS

1. Sociedad Maderas Retel, Puerto Montt.
2. Mario Contreras Ojeda, Puerto Montt.
3. Francisco Alberto Silva Santibáñez. Puerto Montt.
4. Sociedad Forestal Com. Chamiza Ltda. Puerto Montt.
5. Jorge Veloso, Puerto Montt.
6. Sociedad Com. Pallets del Sur SPA, Osorno.
7. Maderas del Sur Ltda., Osorno.
8. Sociedad Castillo y Castillo Ltda. Osorno
9. Maderas de Exportación S.A. Osorno
10. Sociedad Maderera Gálvez y di Genova Ltda. Osorno
11. Sociedad Forestal, Constructora e Inmobiliaria Bahamonde Hnos. Ltda. Dalcahue.
12. Alberto Muñoz Bahamonde, Dalcahue.
13. Oscar Becker Álvarez, Dalcahue.
14. Pedro Triviño Barrientos, Dalcahue.
15. Dionisio Obando Cárdenas, Dalcahue.
16. José Diaz Vidal, Ancud.
17. Luz Eliana Sánchez Espicel, Ancud.
18. Luis Vargas, Ancud.
19. Maderas Leonel Alvarado Díaz E.I.R.L., Ancud.
20. Gustavo Barrientos, Ancud.
21. Orlando Patricio Retamales Jaramillo, Palena.
22. Rosario Castro Jaramillo, Palena.
23. Benedicto Toro – Toro, Palena.
24. Jorge Toro – Toro, Palena.
25. Heriberto Antonio Vallejo Chacano, Palena.
26. Com. Manantial SPA, Rio Negro.
27. Soc. Com. Forestal Los Pinos Ltda, Puyehue.
28. Víctor Manuel Vega Vargas, Calbuco.
29. Aserradero y Comercial Luis Fritzche Subiabre, Calbuco.
30. Soc. Forestal y Maderera Serko Ltda., Frutillar.
31. José Daniel Ojeda Díaz, Calbuco.
32. Maderas M y R Ltda, Calbuco.
33. Servicios Forestales Carolina Solís EIRL, Río Negro.
34. Soc. Com. Maderas y Servicios Newen Ltda., Frutillar.
35. Comercializadora de Madera Express Ltda, Osorno.
36. Com. Demaihue Ltda, Fresia.
37. Soc. Maderera Toledo y Bahamonde Ltda, Ancud.
38. Soc. Maderera Gálvez y Di Genova Ltda., Osorno.
39. Aserraderos San Francisco Ltda., Frutillar.
40. Aserradero Jaime Hofmann Oyarzún EIRL, Frutillar.
41. Javier Hausdorf Kahler, Puerto Varas.
42. Alejandro Alex Sánchez Pérez, Chonchi.
43. Roberto Ludwig Schilling Distribuidora de Maderas EIRL, Purranque.
44. Luis Mauricio Uribe Álvarez, Quellón.
45. Soc. Comercial Ltda., Puerto Varas.
46. Juan Cañulef Martínez, Osorno.
47. Mario Ruiz San Martín, Frutillar.
48. Maderera y Agrícola Eliseo Catalán Navarro EIRL, Osorno.
49. Servitrans SPA, Frutillar.
50. Juan Luis Mayorga Ruiz, Purranque (N°1).
51. Juan Luis Mayorga Ruiz, Purranque (N°2).
52. Quirino Jaramillo Arriagada, Osorno.
53. Víctor Segundo Delgado Muñoz, Osorno.
54. José Liberto Pañil, Osorno.
55. Eduardo Vargas, Osorno.
56. Ricardo Soto Aguile, Los Muermos.
57. Marcelo Godoy Seron, Los Muermos.
58. Fernando Gonzáles González, Los Muermos.
59. Francisco Hernández Oyarzún, Los Muermos.
60. Mario Segovia, Los Muermos.
61. Pedro Nolasco Segovia Bustamante, Los Muermos.
62. José Tomás Peranchiguay Marín, Palena.
63. Jorge Rubén Ancapi Linai, Hualalhue.
64. Amador Aliante Fuentes, Los Muermos.
65. José Rolando Uribe Ruiz, Palena.
66. Orlando Ríos Muñoz, Puerto Montt.
67. José Ascencio Mancilla, Puerto Montt.
68. Hugo Bustamante Hernández, Puerto Montt.
69. Jaime Ulises Vásquez Montiel, Puerto Montt.
70. Roberto Cristián Morales Maldonado, Frutillar.
71. Stefania Barria Oyarzo, Frutillar.
72. Com. Demaihue Ltda., Fresia.
73. Soc. Aserradero Fresia Ltda., Fresia.
74. Carlos Armando Andrade Paredes, Maujín.
75. Tatiana Procelia Gallardo Pérez, Maujín

## Mapa Descripción generada automáticamenteMapa Descripción generada automáticamenteANEXO 3: COMPRENDIO CARTOGRÁFICO

Mapa

Descripción generada automáticamente

Una captura de pantalla de una computadora

Descripción generada automáticamente

Imagen que contiene Diagrama

Descripción generada automáticamente

## ANEXO 4: CÓDIGO DE PYHTON

import xlsxwriter as xl

import gurobipy as gp

from gurobipy import GRB,quicksum

from itertools import product

import xlrd

import time as tiempo

def problema(dir\_result,A,I,CC,CV,p,d,dens,dis,w,m):

################################################################# IMPLEMENTAR MODELO DE COSECHA EN GUROBI #######################################################################

#Se plantea el modelo a Optimizar

modelo = gp.Model("PT2")

modelo.modelSense = GRB.MINIMIZE

# Variables independientes del modelo (Sub indices)

X\_a\_i = modelo.addVars({(a,i) for a in A for i in I}, vtype = GRB.CONTINUOUS) #cantidad enviada de (a) a (i)

Y\_i = modelo.addVars({(i) for i in I}, lb=0, ub=1, vtype = GRB.BINARY) # 1 si abro planta en i

C\_a\_i = modelo.addVars({(a,i) for a in A for i in I}, vtype = GRB.INTEGER) # cantidad de camiones de a a i tipo k

# Función Objetivo

modelo.setObjective((quicksum([X\_a\_i[a,i] \* CV[0] \* dis[a,i] for a in A for i in I])))

#Restricciones

a=1

i=1

#1. capacidad de producción de los proveedores

for a in A:

expr = quicksum([X\_a\_i[a,i] \* w[a,i] for i in I])

modelo.addConstr((expr <= p[a]), f"Restricción 1\_{a}\_{i}")

#2. demanda de las fábricas

for i in I:

expr = quicksum([0.00062125 \* X\_a\_i[a,i] \* dens[a] for a in A])

modelo.addConstr((expr == d[i] \* Y\_i[i]), f"Restricción 2\_{i}")

#3. apertura de (m) fábricas

expr = quicksum([Y\_i[i] for i in I])

modelo.addConstr((expr == m), "Restricción 3")

#4. no negatividad de las variables

for a in A:

for i in I:

modelo.addConstr((X\_a\_i[a,i] >= 0), f"Restricción 4\_a\_{a}\_{i}")

modelo.addConstr((C\_a\_i[a,i] >= 0), f"Restricción 4\_b\_{a}\_{i}")

#5. Cantidad de camiones

for a in A:

for i in I:

expr = quicksum([C\_a\_i[a,i] \* CC[0]])

expr2 = quicksum([X\_a\_i[a,i]])

modelo.addConstr((expr >= expr2), f"Restricción 5\_{a}\_{i}")

################################################################# ESCRITURA DE EXCEL Y RESULTADOS ########################################################################

tc1 = tiempo.time()

modelo.setParam("TimeLimit", 30.0)

modelo.Params.LogToConsole=0 #Se utiliza este comando para que gurobi no imprima en consola la información de la optimización

modelo.optimize()

modelo.printStats()

for s in Y\_i:

print (Y\_i[s])

if modelo.status == GRB.INFEASIBLE:

print("El modelo es infactible.")

modelo.computeIIS()

restricciones\_infactibles = modelo.getConstrs()

print("Restricciones infactibles:")

for restriccion in restricciones\_infactibles:

print(restriccion.ConstrName)

estados = [gp.GRB.LOADED, gp.GRB.INFEASIBLE, gp.GRB.OPTIMAL, gp.GRB.UNBOUNDED, gp.GRB.INF\_OR\_UNBD, gp.GRB.CUTOFF, gp.GRB.USER\_OBJ\_LIMIT, gp.GRB.NODE\_LIMIT, gp.GRB.ITERATION\_LIMIT, gp.GRB.INTERRUPTED, gp.GRB.INTERRUPTED, gp.GRB.TIME\_LIMIT, gp.GRB.SOLUTION\_LIMIT, gp.GRB.NUMERIC, gp.GRB.SUBOPTIMAL]

for estado in estados:

if modelo.status == estado:

print(f"El modelo tiene estado {estado}:",modelo.status)

tc2 = tiempo.time()

tc = tc2 - tc1

#Tiempo que se demora

print('Tiempo: ',tc)

#Valor de la funcion objetivo

print('OBJ: ',modelo.objVal)

#Escribir resultados variables en excel

wb = xl.Workbook(dir\_result)

worksheet = wb.add\_worksheet('FO')

r=0

col=0

worksheet.write(r, col, 'FO')

worksheet.write(r+1, col, modelo.getObjective().getValue())

worksheet.write(r, col+1, 'tiempo')

worksheet.write(r+1, col+1,tc)

wr\_var(wb,'X',X\_a\_i,('A','I'),A,I)

wr\_var(wb,'Y',Y\_i,('I'),I)

wr\_var(wb,'C',C\_a\_i,('A','I'),A,I)

totalenviado = 0

for (a,i) in product(A,I):

totalenviado += X\_a\_i[(a,i)].x

wb.close()

print ("Total enviado", totalenviado)

return (modelo.getObjective(),totalenviado,tc)

############################################################# LECTURA ARCHIVOS DE EXCEL ######################################################################################

def main(dir\_inst,dir\_result):

instancia = xlrd.open\_workbook(dir\_inst, ignore\_workbook\_corruption=True)

#Leer indices y parametros

#Variables independientes del modelo (Sub indices)

A=sets\_list(instancia.sheet\_by\_name('A'))

I=sets\_list(instancia.sheet\_by\_name('I'))

#K=sets\_list(instancia.sheet\_by\_name('K'))

CC=sets\_list(instancia.sheet\_by\_name('CC'))

#CF=sets\_list(instancia.sheet\_by\_name('CF'))

CV=sets\_list(instancia.sheet\_by\_name('CV'))

#Parametros del modelo

p=param\_dicc(instancia.sheet\_by\_name('P'))

d=param\_dicc(instancia.sheet\_by\_name('D'))

dens=param\_dicc(instancia.sheet\_by\_name('Dens'))

dis=param\_dicc(instancia.sheet\_by\_name('Distancia'))

w=param\_dicc(instancia.sheet\_by\_name('W'))

m=param\_dicc(instancia.sheet\_by\_name('M'))

#Ejecutar modelo

costostransporte,totalenviado,tc = problema(dir\_result,A,I,CC,CV,p,d,dens,dis,w,m)

############################################################# INICIO ######################################################################################

#Lectura de hoja excel para creacion de variables independientes

def sets\_list(sheet):

l=list(sheet.cell\_value(t,0) for t in range(1,sheet.nrows))

return l

#Diccionario parametros

#Lectura de hoja excel para creación de parametros del modelo

def param\_dicc(sheet):

rows=sheet.nrows

cols=sheet.ncols

if cols==1:

return sheet.cell\_value(1,0)

elif cols==2:

d={}

for row in range(1,rows):

d[sheet.cell\_value(row,0)]=sheet.cell\_value(row,1)

return d

else:

d={}

for row in range(1,rows):

d[tuple(sheet.cell\_value(row,c) for c in range(cols-1))]=sheet.cell\_value(row,cols-1)

return d

#Escritura en hoja de excel de los resultados del modelo

#Parametros -> directorio del excel, "string de variable dependiente", resultados de variable dependiente, "string de variables independientes de la variable dependiente",

# resultados de variables dependientes

def wr\_var(book,sheet,var,param,\*arg): # wr\_var(wb,'X',X\_a\_i,('A','I'),A,I)

# wr\_var(wb,'Y',Y\_i ,('I') ,I)

r=0

worksheet=book.add\_worksheet(sheet)

P=len(param)

if len(param)>1:

for p in range(P):

worksheet.write(r,p,f'{param[p]}')

worksheet.write(r,P, sheet)

r+=1

for i in product(\*arg):

if var[i].x >1e-6:

for p in range(P):

worksheet.write(r,p,i[p])

worksheet.write(r,P, var[i].x)

r+=1

else:

worksheet.write(r,P-1, sheet)

r+=1

for i in arg[0]:

if var[i].x >1e-6:

worksheet.write(r,P-1, var[i].x)

r+=1

#----------------- INICIO --------------------#

if \_\_name\_\_=="\_\_main\_\_":

#Dirección del archivo de instancia

dir\_inst='Datos\_PT2\_Hermann\_Reisenegger\_Toma2.xls'

#Nombre del archivo excel de resultados

dir\_result='Resultados\_PT2\_Hermann\_Reisenegger.xlsx'

main(dir\_inst,dir\_result)

## ANEXO 5: RESULTADOS MODELAMIENTO

Resultados planta de biogás de potencia nominal de 180 kW. Ver Anexo N°2 para conocer los nombres de los aserraderos.

Tabla N°31: Función Objetivo 180kW.

|  |
| --- |
| Función Objetivo U.M |
| 981.571 |

Fuente: elaboración propia.

|  |
| --- |
| Y |
| 0 |
| 1 |
| 0 |
| 0 |
| 0 |

Tabla N°32: Resultados variable Y 180 kW.

Fuente: elaboración propia.

Tabla N°33: Resultados variables X y C 180 kW.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| A | I | X | C |
| 6 | 2 | 20,11 | 1 |
| 7 | 2 | 135,81 | 3 |
| 9 | 2 | 20,11 | 1 |
| 31 | 2 | 135,81 | 3 |
| 32 | 2 | 20,11 | 1 |
| 33 | 2 | 70,17 | 2 |
| 34 | 2 | 20,11 | 1 |
| 56 | 2 | 135,81 | 3 |
| 57 | 2 | 20,11 | 1 |
| 59 | 2 | 135,81 | 3 |

Fuente: elaboración propia.

Resultados planta de biogás de potencia nominal de 360 kW. Ver AnexoN°2 para conocer los nombres de los aserraderos.

Tabla N°34: Función Objetivo 360 kW.

|  |
| --- |
| Función Objetivo U.M |
| 2.922.759 U.M |

Fuente: elaboración propia.

|  |
| --- |
| Y |
| 0 |
| 1 |
| 0 |
| 0 |
| 0 |

Tabla N°35: Resultados variable Y 360 kW.

Fuente: elaboración propia.

Tabla N°36: Resultados variables X y C 360 kW.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| A | I | X | C |
| 6 | 2 | 20,11 | 1 |
| 7 | 2 | 135,81 | 3 |
| 8 | 2 | 282 | 5 |
| 9 | 2 | 20,11 | 1 |
| 10 | 2 | 262,53 | 5 |
| 31 | 2 | 135,81 | 3 |
| 32 | 2 | 20,11 | 1 |
| 33 | 2 | 135,81 | 3 |
| 34 | 2 | 20,11 | 1 |
| 35 | 2 | 135,81 | 3 |
| 56 | 2 | 135,81 | 3 |
| 57 | 2 | 20,11 | 1 |
| 58 | 2 | 30,57 | 1 |
| 59 | 2 | 135,81 | 3 |
| 60 | 2 | 20,11 | 1 |

Fuente: elaboración propia.

Resultados planta de biogás de potencia nominal de 900 kW. Ver AnexoN°2 para conocer los nombres de los aserraderos.

Tabla N°37: Función Objetivo 900 kW.

|  |
| --- |
| Función Objetivo U.M |
| 45.389.888 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla N°38: Resultados variable Y 900 kW.

|  |
| --- |
| Y |
| 0 |
| 0 |
| 0 |
| 1 |
| 0 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla N°39: Resultados variables X y C 900 kW.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| A | I | X | C |
| 1 | 4 | 20,11 | 1 |
| 2 | 4 | 135,81 | 3 |
| 3 | 4 | 135,81 | 3 |
| 4 | 4 | 135,81 | 3 |
| 5 | 4 | 135,81 | 3 |
| 11 | 4 | 20,11 | 1 |
| 12 | 4 | 135,81 | 3 |
| 13 | 4 | 20,11 | 1 |
| 14 | 4 | 135,81 | 3 |
| 15 | 4 | 20,11 | 1 |
| 16 | 4 | 135,81 | 3 |
| 17 | 4 | 20,11 | 1 |
| 18 | 4 | 135,81 | 3 |
| 19 | 4 | 135,81 | 3 |
| 20 | 4 | 135,81 | 3 |
| 26 | 4 | 135,81 | 3 |
| 27 | 4 | 20,11 | 1 |
| 28 | 4 | 135,81 | 3 |
| 29 | 4 | 135,81 | 3 |
| 30 | 4 | 20,11 | 1 |
| 33 | 4 | 98,52 | 2 |
| 36 | 4 | 20,11 | 1 |
| 37 | 4 | 30,57 | 1 |
| 38 | 4 | 135,81 | 3 |
| 39 | 4 | 20,11 | 1 |
| 40 | 4 | 135,81 | 3 |
| 41 | 4 | 20,11 | 1 |
| 42 | 4 | 20,11 | 1 |
| 43 | 4 | 135,81 | 3 |
| 44 | 4 | 135,81 | 3 |
| 45 | 4 | 20,11 | 1 |
| 51 | 4 | 20,11 | 1 |
| 52 | 4 | 135,81 | 3 |
| 53 | 4 | 20,11 | 1 |
| 54 | 4 | 135,81 | 3 |
| 55 | 4 | 20,11 | 1 |
| 61 | 4 | 20,11 | 1 |
| 62 | 4 | 20,11 | 1 |
| 63 | 4 | 135,81 | 3 |
| 64 | 4 | 20,11 | 1 |
| 65 | 4 | 20,11 | 1 |
| 66 | 4 | 135,81 | 3 |
| 67 | 4 | 135,81 | 3 |
| 68 | 4 | 20,11 | 1 |
| 69 | 4 | 20,11 | 1 |
| 70 | 4 | 30,57 | 1 |

Fuente: elaboración propia.