



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO INGENIERÍA
MECÁNICA



**Análisis de la factibilidad técnica de la suplementación en la intermitencia
de recursos en la producción de hidrógeno verde con la gasificación por
plasma de RSU en la región del Bío-Bío**

POR

<Ignacio Andrés Elgueta Caorsi>

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción
para optar al título profesional de Ingeniero Civil Mecánico

Profesor Guía:
<Dra. Einara Blanco Machín>

Noviembre 2024

© 2024 Ignacio Andrés Elgueta Caorsi

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento

Resumen

Los vertederos de recolección de residuos municipales se encuentran en un crítico estado en la región del Bío-Bío, acercándose varios a su máxima capacidad y teniendo el principal acopio del gran Concepción clausurado el 2023 por las autoridades gubernamentales por llegar a su límite y generar daños significativos a las comunidades aledañas. La problemática también abarca distintas zonas del país, con transportes de residuos de Hualpén a Ñuble y de Ancud a Los Ángeles.

La necesidad de buscar alternativas al manejo de residuos se caracteriza como urgente. En el mismo contexto de tomar nuevas medidas con enfoque medioambiental, se sitúa la intermitencia en el recurso eólico renovable como un problema que significa un bajo factor de planta para la producción de hidrógeno verde.

En este contexto, el trabajo se centra en analizar la factibilidad en la suplementación del recurso eólico disponible a partir de la gasificación por plasma de residuos sólidos urbanos, así logrando un aumento en el factor de planta al mismo tiempo que se aborda la problemática de gestión de residuos.

Los sistemas de gasificación por plasma presentan un mejor aprovechamiento de los residuos, ya que permiten la gasificación completa con sus altas temperaturas y la obtención de un syngas con un poder calorífico mayor al de otros sistemas tradicionales de gasificación. Esta tecnología aplicada se simula en el software Aspen Plus, que permite modelar sistemas termoquímicos y caracterizar un syngas a partir de la definición de los RSU, su flujo másico y su composición. Los resultados de la simulación son similares a la literatura explorada, con un PCI de 11,97 MJ/kg para el syngas y un valor de 0,878 kW para gasificar un kilogramo de RSU.

Se definió un caso base de producción de hidrógeno verde a partir de recursos eólicos en la región, donde el factor de planta trató como el indicador principal de la suplementación a estudiar. Se encontró un aumento del 48,97% del factor de planta, casi llegando a un factor ideal con un 0,997. También se relacionó que, por cada 1kg de hidrógeno verde producido, se involucran 11,23 kg de residuos.

Palabras Clave: RSU, hidrógeno verde, recurso eólico, Aspen Plus, suplementación, factor de planta

Abstract

Municipal waste landfills are currently in a critical state in the Bío Bío región, with many of them reaching its maximum capacity and with the main landfill of the great Concepción closed by authorities in 2023 for reaching its limit and doing great damage to the nearby communities. The problem is also present in different parts of the country, having to transport waste from Hualpén to Ñuble and from Ancud to Los Ángeles.

The need to search for alternatives to waste management is characterized as urgent. In the same context of taking new measures with an environmental focus, the intermittency of the renewable eolic resources is placed as an issue that means a low capacity factor for a green hydrogen production plant.

In this context, this work is centered around the analysis of the factibility of the supplementation of the eolic resource available with the plasma gasification of municipal solid waste, therefore reaching an increase in the capacity factor while also taking into consideration the problema of waste management.

The plasma gasification systems present a better leverage of the waste treatment, since it allows for a complete gasification with its high temperatures and it gives a syngas with a heating value greater than the one you would get with traditional gasification systems. This applied technology is simulated in the Aspen Plus software, which allows to model thermochemical systems and to characterize a syngas from the definition of the MSW, its mass flow and its composition. The results of the simulation are similar to the literatura, with a LHV of 11,97 MJ/kg for the syngas and a value of 0,878 kW per every kilogram of waste gasified.

A base case was defined for the green hydrogen production from eolic resources in the región, where the capacity factor was treated as the main indicator of the supplementation to study. It was found that a 48,97% increase of the capacity factor was reached, to almos tan ideal capacity factor. It was also found that for every kilogram of green hydrogen produced, there are 11,23 kg of waste involved.

Keywords: MSW, green hydrogen, eolic resource, supplementation, capacity factor.

Índice

Índice.....	5
Lista de Tablas.....	7
Lista de Figuras.....	8
1 CAPITULO 1: Introducción.....	9
1.1 Contexto.....	9
1.2 Objetivos.....	11
1.3 Hipótesis.....	11
1.4 Metodología.....	12
1.5 Los RSU como un problema en aumento.....	13
1.6 Desafíos asociados al H2V.....	16
1.7 Residuos como alternativa al suplemento.....	18
1.8 Estado del Arte.....	19
2 CAPITULO 2: Estudio de Caso Base y Simulación del Proceso.....	20
2.1 Consideraciones y parámetros.....	20
2.2 Selección de equipos e indicadores.....	22
2.3 Simulación en Aspen Plus.....	23
2.4 Caracterización de residuos.....	24
2.5 Modelo a Simular.....	25
3 CAPITULO 3: Resultados y Discusión.....	30
3.1 Resultados simulación.....	30
3.2 Determinación de indicadores de suplementación.....	32

4 CAPITULO 4: Conclusiones.....	34
Referencias.....	35

Lista de Tablas

Tabla 1: Composición química de los RSU a partir de sus componentes en Chile. Extraído de [17].

Tabla 2: Equipos definidos en Aspen que permiten la simulación del sistema.

Tabla 3: Tabla 3: Flujos de entrada y salida en definidos en Aspen.

Tabla 4: Fracción másica de las especies en el syngas obtenido en la simulación.

Tabla 5: Fracción másica del stack a la salida de la turbina a gas.

Tabla 6: Parámetros del balance energético que se utilizarán en el cálculo de suplementación

Tabla 7: Resultados de la suplementación.

Lista de Figuras

Figura 1: Proyección de desechos generados por región a nivel mundial. Extraído de [23].

Figura 2: Tipos y ponderación de los tipos de manejo de residuos urbanos en el mundo. Extraído de [23].

Figura 3: Toneladas de residuos municipales producidos por cada región al año. Extraído de [25].

Figura 4: Tipos de consumo energético por región en Chile. Extraído de [24].

Figura 5: Proyección de la demanda global de energía suministrada con hidrógeno, en PetaWatt Hora. Extraído de [4].

Figura 6: Aerogenerador seleccionado para caso base. Extraído de [27].

Figura 7: Curva de potencia de aerogenerador seleccionado. Extraído de [27].

Figura 8: Recursos horarios entregados por unidad eólica.

Figura 9: Unidad de electrólisis seleccionada para la evaluación de suplementación. Extraído de [28].

Figura 10: Diagrama modelado en Aspen Plus de gasificación por plasma de RSU.

Figura 11: Diagrama completo de ciclo de gasificación integrada por plasma con ciclo combinado eléctrico.

Figura 12: Matriz horaria de factor de planta para el caso base definido.

Figura 13: Matriz con potencias ideales de suplementación horaria.

Figura 14: Matriz horaria del factor de planta obtenido tras la suplementación.

Figura 15: Matriz de producción horaria de H₂V en el caso base.

Figura 16: Matriz de producción horaria de H₂V para el caso suplementado.

Figura 17: Modelo de gasificación integrada por plasma.

CAPITULO 1: Introducción

1.1 Contexto

La situación de crisis medioambiental y el acelerado paso del calentamiento global han llegado a situaciones críticas con consecuencias que al presente se categorizan de alta magnitud y cada vez se asientan más en la irreversibilidad [1]. Esto llama a tomar medidas de abatimiento a gran escala para avanzar responsablemente ante los alarmantes desafíos climáticos actuales, en un mundo que se considera sobrepoblado con relación a los consumos energéticos y las emisiones asociadas a ellos, donde cada día el estilo de vida de las personas recae progresivamente en la modernización tecnológica, fenómeno que presenta una relación inherente con el aumento de las demandas de energía [2]. En el caso de Chile, las demandas energéticas tanto residenciales como industriales tienen un alto impacto en las emisiones contaminantes, las cuales van inherentemente asociadas al uso de combustibles fósiles; y se refleja en el hecho de que el sector energía se responsabiliza del 78% de las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel país [3] (Ministerio de Medio Ambiente, 2020). La descarbonización de la matriz energética junto con la integración de energías renovables a nivel nacional son un desafío que con el paso del tiempo va cobrando más importancia en los planes y la administración energética de los últimos años, destacando principalmente al plan de Descarbonización de la Matriz Eléctrica y la Estrategia Nacional de Electromovilidad [4], ambos basados en la meta principal de carbono neutralidad para el 2050 y que sugieren al hidrógeno como el combustible del futuro.

El hidrógeno se caracteriza por ser el elemento más abundante en el universo, junto con una alta densidad energética por kilogramo de hidrógeno y gran versatilidad, al poder transformarse en distintas formas de transmisión energética y con fines de uso en áreas de calefacción, pilas de combustible, producción química, movilidad, calderas y electrificación. La alta densidad energética del hidrógeno va acompañada de una alta demanda energética para la obtención y extracción del hidrógeno, principalmente en los procesos de electrólisis caracterizados por una alta demanda de electricidad, lo que define uno de los principales desafíos para obtener una producción que caracterice al hidrógeno como “verde”, al ser este obtenido a través de energías renovables [5].

Chile se presenta a nivel mundial como uno de los países con mejor disponibilidad de recursos renovables, ofreciendo un enorme potencial de desarrollo para energías limpias. Al ser un país largo se presentan variadas condiciones climáticas, siendo la zona centro sur de Chile un territorio con vientos fuertes que abunda en potencial de generación a partir de energía eólica.

Actualmente se encuentran diversos proyectos en el país que apuntan a la generación de hidrógeno verde y en el último año se han registrado más de 60, demostrando la respuesta de las grandes empresas ante la estrategia nacional de hidrógeno verde, principalmente en las

regiones de Antofagasta y Magallanes, los extremos norte y sur del país, donde destacan Hyex, Atacama Hydrogen HUB, Enel, Enap, AES Andes, Engie-Enaex y TCI Geocomp con el ambicioso “Hoasis”, mientras que en la región del Bio-Bio de la zona centro sur el primer hidrógeno verde se empezó a generar a escala piloto en la UCSC con fines de estudio y desarrollo de las aplicaciones del combustible en la zona. El resto de los proyectos en la región no ha completado sus fases de instalación y se encuentra en distintas etapas con variados fines [6]. Algunos proponen abastecer la demanda interna de las propias empresas o sectores específicos del país y otros apuntan a la exportación, actividad para la cual ya se ha hecho un tratado firmado con Alemania [7].

En el ámbito de la descarbonización; contaminación y cambio climático se adecúa también la situación actual con el manejo de residuos sólidos urbanos. En la región Del Bío Bío el manejo de residuos en el gran Concepción se encuentra en un estado complejo. Actualmente opera el último gran relleno sanitario disponible de la zona ubicado en Penco, el cual para el 2023 pasó a tener de 2 años de vida útil restante a cerca de 1. Esto se presenta tras el cierre oficializado a fines de abril del año pasado del relleno sanitario Hidronor en Copiulemu; en consecuencia, del colapso de la instalación respecto a su capacidad y la inviabilidad de expandirse según la negación del permiso por la Comisión de Evaluación Ambiental [8].

Las comunas del gran Concepción que contaban con Copiulemu han tenido que redirigir sus desechos hacia vertederos de otras comunas con capacidades limitadas, lo que ha puesto a las autoridades en alerta de la necesidad de una alternativa a la gestión existente. Sin embargo, no se han adjudicado nuevos rellenos ni presentado soluciones definitivas a la fecha, tras haber declarado por parte de la municipalidad de Concepción, que la solución más simple sería transportar los desechos a otra región, pero la poca capacidad restante que se pronostica en los rellenos sanitarios de otras regiones junto con los costos de transporte la hacen una solución compleja, ante lo que el GORE y la Subsecretaría de Desarrollo Regional han incrementado los fondos de las municipalidades afectadas en 2 mil 700 millones de pesos; para el incremento en el gasto de traslado, como en el caso de Hualpén, que ha tenido que redirigir sus residuos a un acopio de la región de Ñuble [9].

1.2 Objetivos

General:

- Caracterizar la factibilidad técnica de implementar una unidad de gasificación por plasma de RSU para suplementar el consumo del proceso de electrólisis en la región del Bío-Bío.

Específicos:

- Definir indicadores de producción que sean mejorados con la implementación de un sistema de gasificación por plasma en una planta de producción de hidrógeno verde.
- Analizar el proceso de gasificación por plasma de RSU en Aspen Plus para una instalación que maneje residuos municipales en la región del Bío-Bío.
- Implementar un método adecuado para enfrentarse a la intermitencia de los recursos renovables intermitentes.

1.3 Hipótesis

La producción de hidrógeno verde en el Bío-Bío es una actividad que, debido a sus altos consumos energéticos y la intermitencia de sus recursos, se vería beneficiada con la implementación de una unidad de gasificación por plasma, aumentando así su viabilidad en un proyecto de la zona.

La gasificación por plasma de RSU ayudaría a solucionar el problema de gestión de residuos que enfrenta actualmente la región del Bío-Bío, valorizando lo que actualmente se consideran desechos problemáticos; al mismo tiempo que se podría aumentar el nivel de producción de una planta de hidrógeno, así abordando dos problemáticas importantes de la crisis climática y descarbonización desde una misma solución.

1.4 Metodología

Consiste en revisar la bibliografía pertinente para definir la tecnología de gasificación por plasma que mejor se adecúa al contexto de RSU, para así definir los parámetros correspondientes que permitan simular el proceso en Aspen Plus, llevando a dedicar un tiempo exclusivo a aprender a usar el software, para luego implementarlo y poder analizar los flujos de masa y energía pertinentes en el sistema de gasificación; con la consideración de un sistema de generación eléctrica de ciclo combinado destinado a la producción de hidrógeno verde.

Una vez planteada la estructura y distribución de los procesos y sus tecnologías correspondientes, se define un caso base con indicadores claves para determinar el nivel de operación y suplementación del sistema parcialmente alimentado por una unidad de gasificación por plasma. Así, obteniendo finalmente un diseño que mejore los niveles de producción en una planta de hidrógeno verde en la región del Bío-Bío de la forma más sostenible y viable. La mejora esperada se reflejaría principalmente en el nuevo factor de producción de planta, teniendo relevancia los datos de toneladas de residuos, caracterización del syngas y consumos en la gasificación por plasma, además de la destinada a suplementar la alimentación de la electrólisis. Los datos obtenidos y cambios frente al caso base desglosado, llevan a encontrar y definir las conclusiones del proyecto desde una perspectiva integral.

1.5 Los RSU como un problema en aumento

Los residuos se han ido presentando como una creciente problemática para distintas ciudades en el mundo. El aumento de la población mundial arrastra consigo un mayor crecimiento en la generación de desechos, por lo que el manejo de ellos debe basarse en métodos que sean conscientes del creciente flujo esperado en las siguientes décadas. Actualmente se generan al año más de 2 billones de toneladas de residuos en el mundo, y se espera que para el 2050 la cifra sea de 3.4 billones [10].

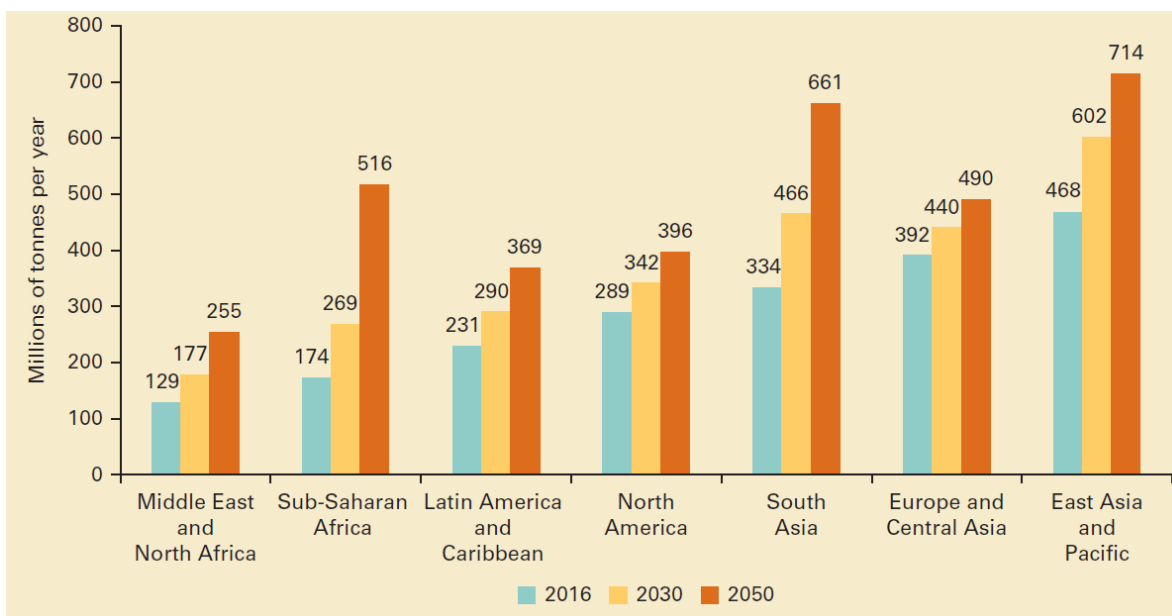


Figura 1.1: Proyección de desechos generados por región a nivel mundial. Extraído de [23].

Se presenta un escenario que no se ve beneficiado con la realidad de numerosas locaciones de acopio llegando a su máxima capacidad, debido a que el método principal que las ciudades en el mundo operan se basa en vertederos, como se observa en la figura 1.1.

Esto indica que la problemática en el manejo de residuos no solo es un problema crítico actual, sino que las estimaciones a nivel mundial de la generación de residuos pronostican un agravamiento de la situación y hacen un alarmante llamado a cambiar la manera en que se tratan y desechan los residuos municipales, ante la ya preocupante situación en que se encuentra su administración.

También se aprecia que esta problemática es un fenómeno que se está dando en todo el mundo, y las soluciones, así como el desarrollo e implementación de estas, requieren un efecto transversal en la población a nivel mundial, considerando que los países desarrollados son los más avanzados en materia de manejo de residuos y las áreas tercermundistas además

de actualmente verse un marco desfavorecido, las estimaciones de la figura 1 indican que la situación empeorará. Así siendo de suma importancia encontrar soluciones integrales teniendo en cuenta que todos los países comparten el mismo mundo y la contaminación de un país o continente termina afectándonos a todos los habitantes del planeta en un cierto grado.

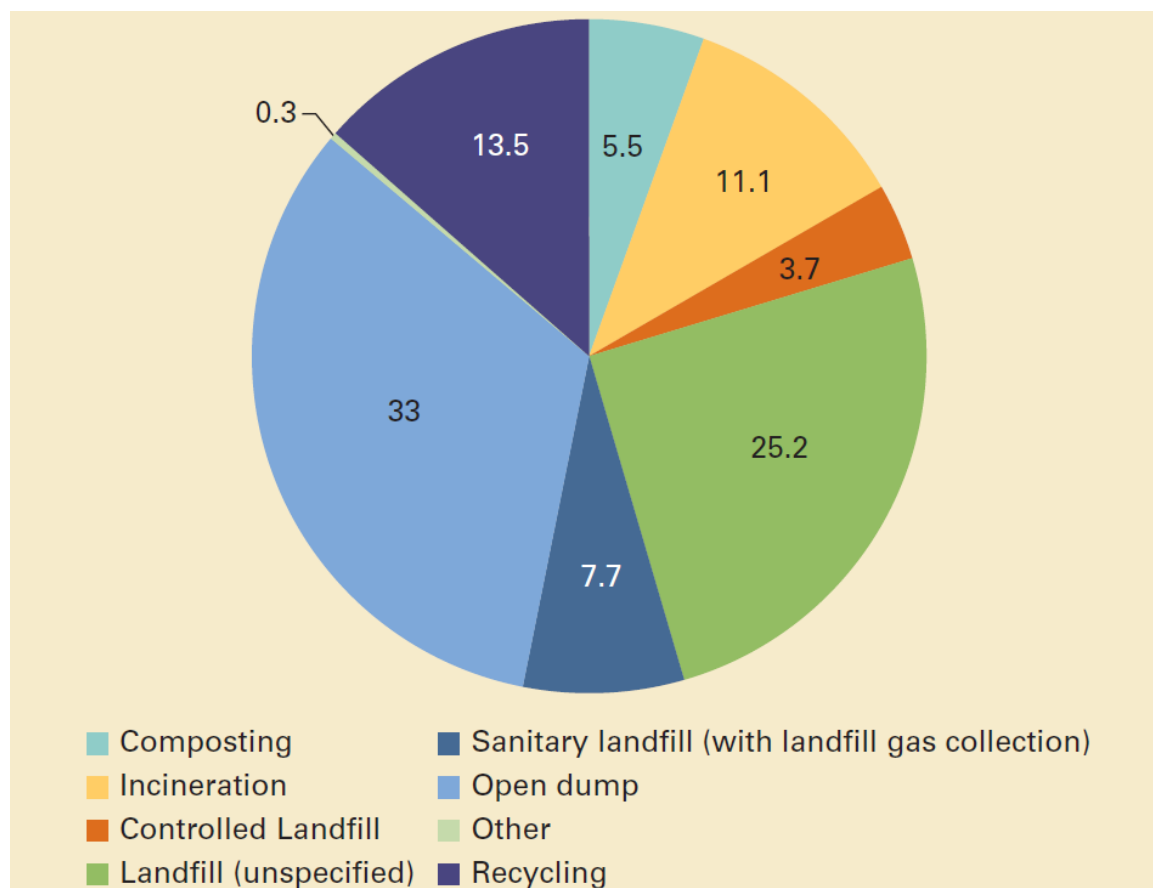


Figura 1.2: Ponderación de los tipos de manejo de residuos urbanos en el mundo. Extraído de [23].

Existen distintos tipos de manejo de residuos urbanos en el mundo, tal como se observa en la figura 1.2. En el caso de Chile, las municipalidades se encargan de gestionar el retiro de desechos de sus respectivos habitantes, y es una actividad que se externaliza a través de empresas recolectoras. Los métodos que operan en el país son:

- Basurales: lugar de disposición de residuos, en forma espontánea o programada, sin control sanitario ni ambiental.

- Vertederos: lugar de disposición de residuos, planificado para ese uso. Sin embargo, no cuenta con las medidas sanitarias mínimas establecidas en el Decreto Supremo N°189. Presenta problemas sanitarios y ambientales como vectores y olores.
- Relleno sanitario: sistema de disposición final de residuos sólidos diseñada, construida y operada para reducir riesgos sanitarios y ambientales. Las instalaciones cumplen las disposiciones del Decreto Supremo N°189.

Como se aprecia en la figura 1.3, la región del Bío es la tercera que más residuos municipales genera con 540.000 toneladas al año, siendo responsable del 9,5% de los residuos generados en el país y el 85% de ellos fueron destinados a rellenos sanitarios [25]. De los 4 rellenos que se instalaron en el Bio Bío, uno se encuentra cerrado y otro cercano a su límite, dejando a los otros 2 con un mayor flujo, el cual no incrementa solo por lo que ocurre en la región, pues la situación más al sur se evidencia crítica. Un ejemplo es la municipalidad de Ancud, que tiene que mandar sus desechos municipales a un relleno de Los Ángeles, llevando consigo un alto gasto que no todas las localidades se pueden permitir, ya que aun así es la única localidad de Chiloé que no dispone de basurales controlados [11].

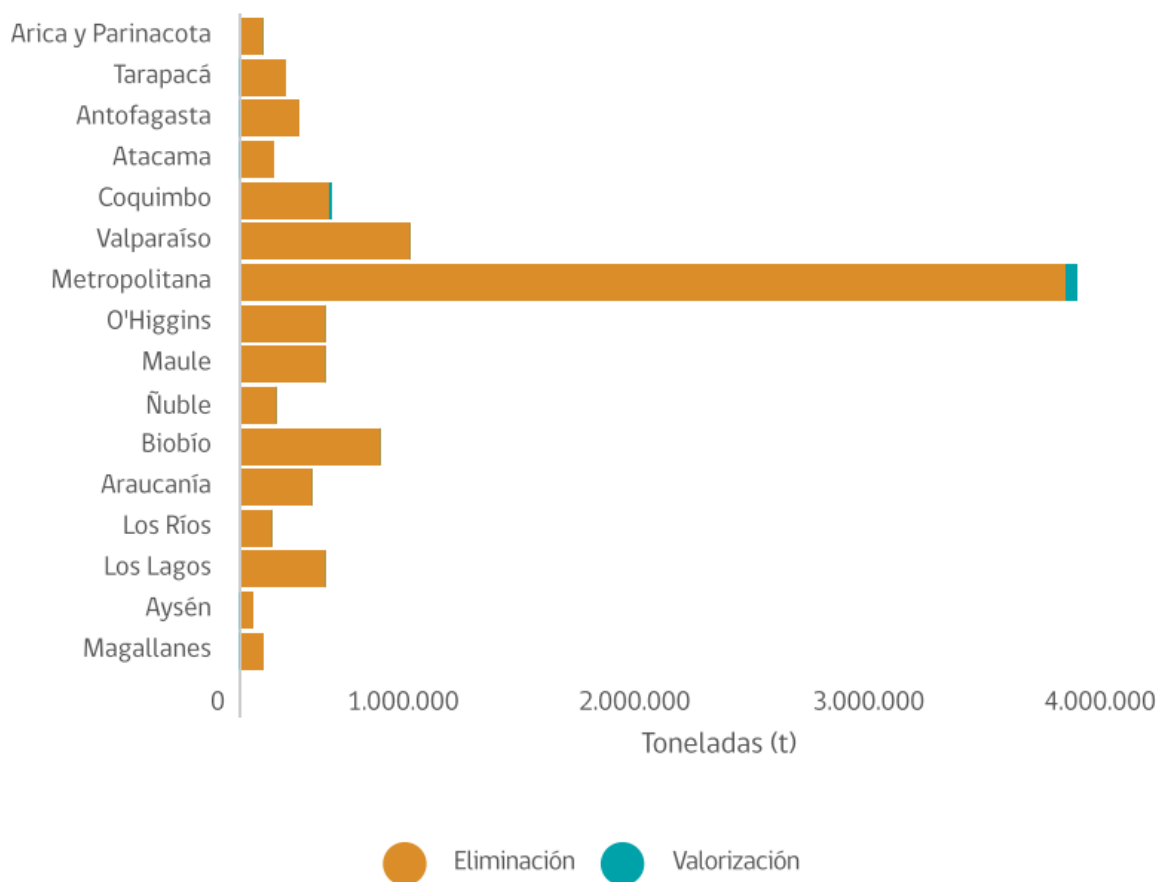


Figura 1.3: Toneladas de residuos municipales producidos por cada región al año.
Extraído de [25].

1.6 Desafíos asociados al H2V

Uno de los protagonistas de la carbono-neutralidad ha sido el hidrógeno verde, que a nivel mundial ha posicionado a Chile como uno de los potenciales productores más idóneos, estimando que el país posee los recursos para producir el hidrógeno verde más barato del mundo. El llamativo potencial de generación renovable junto con el cambio de las normativas y exigencias medioambientales han llevado al desarrollo de numerosos proyectos a lo largo del país, centrándose en los extremos norte y el sur, por los altos recursos solares y eólicos, respectivamente. Sin embargo, más hacia la zona central las condiciones medioambientales siguen siendo favorables en recursos. Se tiene una alta actividad industrial y consumos de transformación energética como se observa en la figura 1.4, responsabilizando de la matriz a distintas industrias que en los últimos años han tenido que explorar alternativas de producción descarbonizadas y sostenibles, para lo cual el hidrógeno verde es un posible actor.

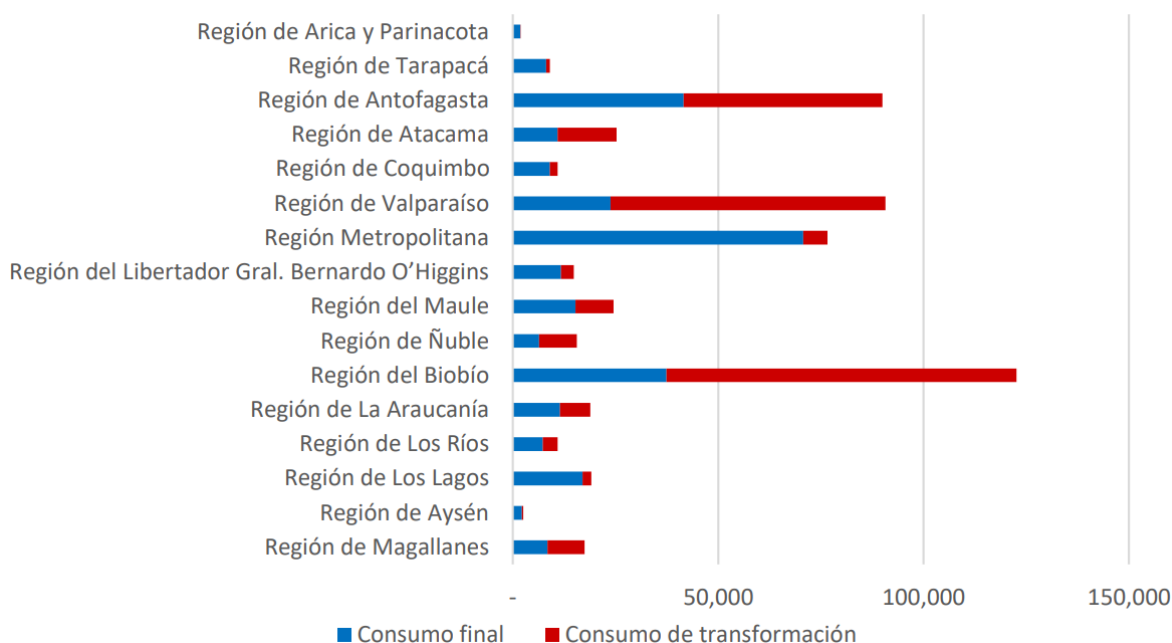


Figura 1.4: Tipos de consumo energético por región en Chile. Extraído de [24].

Los altos costos de las tecnologías renovables no convencionales han ido cambiando en los últimos años y se proyecta un comportamiento en el mercado que permita una mayor accesibilidad a la incorporación de la sostenibilidad en las actividades humanas con potencial de impacto ambiental. Si bien el costo de producción del combustible es uno de los principales factores, este no es el único, y es de importancia identificar las variables asociadas a éste, como lo es la disponibilidad de los recursos con los que se dispone. Al arrancar

actividades de generación eólica o solar; los proyectos en su etapa de estudio de factibilidad consideran factores de planta que no suelen superar el 50% [12], aunque se presenten horas con disponibilidad de recursos mayor a la que permite el 100% de producción. Lo ideal para aumentar el factor de planta es conectar el sistema a la red eléctrica o el almacenamiento de energía en las horas donde haya excedentes, pero las tecnologías de baterías a gran escala todavía implican una gran inversión económica y no tienen presencia en la industria local a gran escala [13]. Esto considerando que, si un sistema se conecta a una red que no es 100% renovable, se pierde la carbono neutralidad del combustible.

Junto con las problemáticas asociadas a la alta cantidad de energía renovable necesaria para el H₂V, están las tecnologías de electrólisis, que con su alto consumo no suelen tener una eficiencia energética mayor al 60% [14] y no han sido introducidas al mercado en un grado que garantice su estabilidad y viabilidad de costos, realidad que se proyecta paulatinamente cambie en los próximos años. El hidrógeno verde contempla distintas tecnologías con sus propios mercados asociados, por lo que se espera que el desarrollo en conjunto de ellas sea simbiótico.

Otra arista es el mercado del hidrógeno verde. Lo primero es ir a donde ya se utiliza hidrógeno gris y reemplazar su uso, pero se estima que no será suficiente para establecer al hidrógeno verde con todo su potencial y acción descarbonizante en el contexto energético mundial, ya que actualmente el hidrógeno gris tiene aplicaciones limitadas principalmente industriales o de transporte a gran escala; como se observa en la figura 1.5, ante lo cual el avance de las economías para la electromovilidad a base de hidrógeno y baterías es una gran limitante [13]. Como el almacenamiento por sí solo se caracteriza por sus altos costos y la aplicación es limitada, se plantea en conjunto el amoníaco y metanol verdes a base de hidrógeno verde, poniendo a estos precursores de combustible como carriers del hidrógeno que faciliten su transporte e introducción al mercado [14].

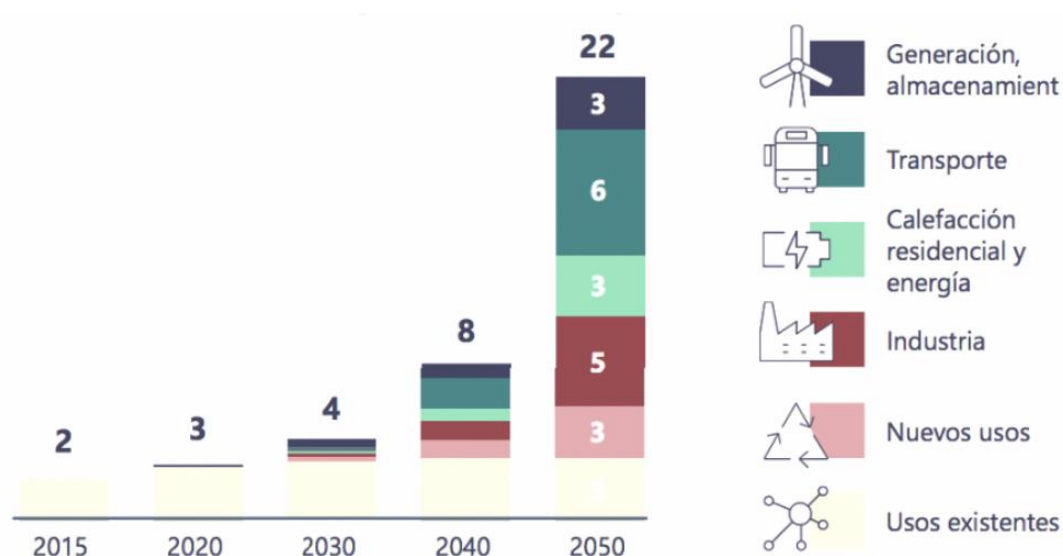


Figura 1.5: Proyección de la demanda global de energía suministrada con hidrógeno, en PetaWatt Hora. Extraído de [4].

1.7 Residuos como alternativa al suplemento

Centrando el esfuerzo en aumentar el factor de planta de una instalación de hidrógeno verde, se tiene que, en caso optimistas con buena disponibilidad de recursos, ronda el valor de 0,5 [26]. Para Chile se define sobre el 40% considerando que es un país con fuerte cantidad de recursos renovables [12].

Al considerar sus tecnologías asociadas, se tienen altos consumos con la justificación de que al producir H₂V a niveles de aplicación industrial con una incidencia relevante en la matriz, se necesita invertir energía renovable que por sí sola ya espreciada en el actual contexto energético. Una arista para aumentar la viabilidad del hidrógeno verde sería compensar esa energía invertida en el mismo contexto de renovabilidad energética y cuidado medioambiental, ante lo cual como fuente energética alternativa se proponen los residuos sólidos que protagonizan una gestión crítica en el país.

Si bien los residuos municipales no son vistos ni tratados como un recurso renovable, se propone que su valorización energética está cada día más pasando a ser una necesidad ante la creciente generación de residuos [23]. Y es ese aumento en su cantidad, lo que lleva a posicionarlos como un recurso que los expertos aluden seguirá aumentando. Así trazando una analogía en el concepto de que los recursos eólicos no se acaban, de la misma manera que la generación de RSU y la necesidad de tratarlos no solo no se acaba, sino que aumenta.

No es nuevo el concepto de usar residuos como fuente de energía para las ciudades, donde se tienen actualmente actividades de incineración de residuos para recuperar gases de valor agregado. Sin embargo, esto trae consigo emisiones en el proceso y no se caracteriza como

una actividad carbono neutral. Lo que sí se viene levantando en los últimos años como un nuevo concepto; con experiencias exitosas en países como Suecia o Corea del Sur, es el proceso de gasificación por plasma [15]. Esto permite, con una antorcha de plasma o plasma por inducción de microondas generar una nube de plasma que gasifique y desintegre molecularmente todo el depósito de residuos introducido a un tubo receptor, que en su parte inferior entrega en forma de vitrificado el compilado inorgánico de metales y vidrio que no se pudo gasificar.

La gasificación por plasma de residuos sólidos urbanos permite la obtención de un syngas, con potencial de reemplazar el uso de gas natural en aplicaciones como; por ejemplo, un ciclo combinado con turbina a gas de generación eléctrica que puede suplementar a la unidad de electrólisis, con una inyección según la disponibilidad horaria del recurso renovable.

CAPITULO 2: Estado del Arte

El ministerio de energía de Chile [16] desarrolló un explorador eólico en una plataforma web que permite directamente acceder a datos de generación horaria a partir de recursos eólicos localizados y un modelo de turbina seleccionado. Como se observa en la figura 2.1, La zona de Los Ángeles es la ciudad en la región del Bío-Bío con mayores recursos eólicos en su perímetro, esto la hace una zona con alto potencial de desarrollo de potencia eólica.

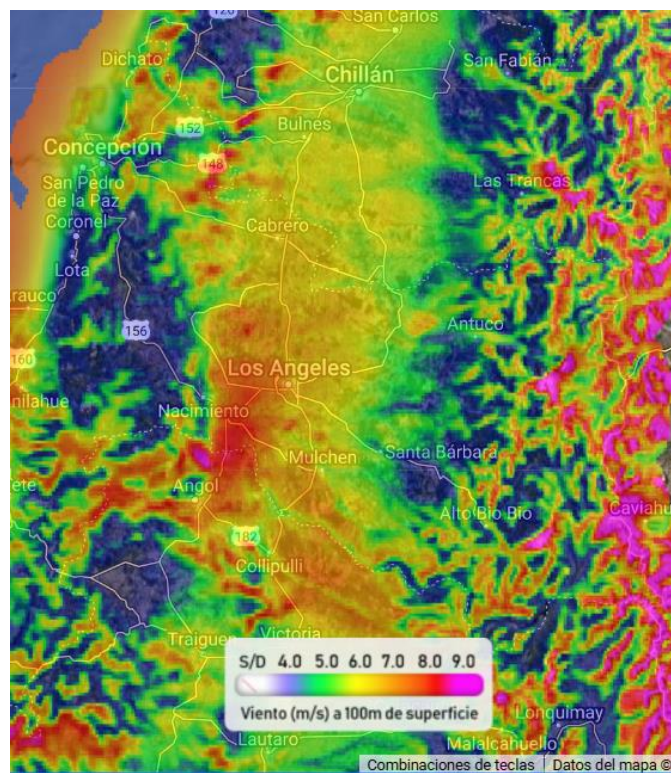


Figura 2.1: Mapa de la región del Bío-Bío con representación de recursos eólicos. Extraído de [16].

Así lo demuestra el mapa de proyectos eólicos aledaños a Los Ángeles, presentado en la figura 2.2. Se encuentran 18 en total, con 4 activos y 14 en construcción, estando indicados en verde y azul respectivamente. En Chile se tienen 88 proyectos de generación eólica, por lo que la actividad de tal rubro se identifica próspera en el área [29].

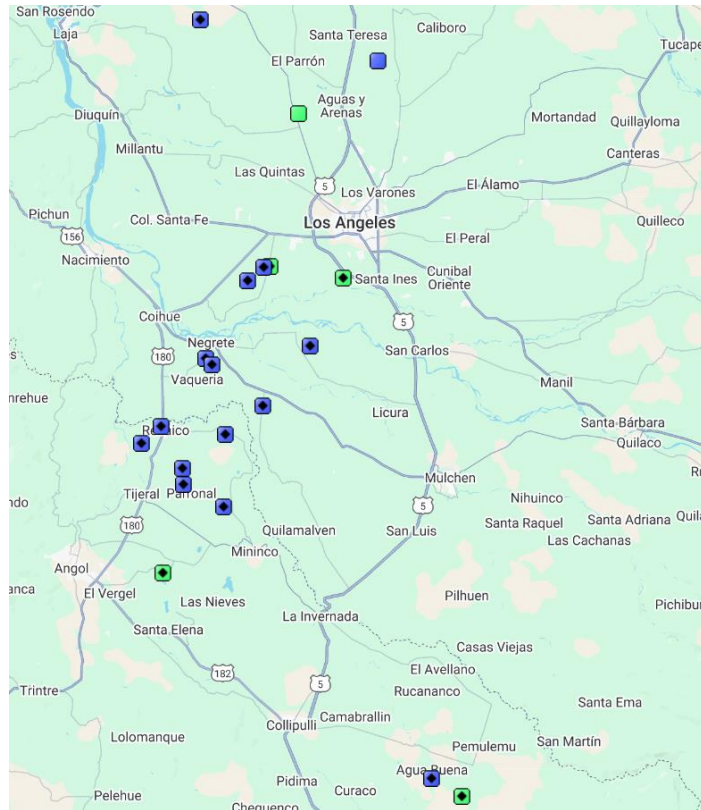


Figura 2.2: Mapa de proyectos eólicos en el área de Los Ángeles. Extraído de [29].

La gasificación por plasma consiste en un proceso térmico donde los residuos se exponen a altas temperaturas, sobre los 2000 °C, así permitiendo la degradación completa de residuos municipales, aprovechando incluso materiales que dentro de los residuos no se consideran reciclables. Esto se presenta en un análisis realizado por Munir et al. [30], donde se destaca que los procesos de gasificación por plasma conllevan desafíos relacionados a ser tecnologías nuevas que no han sido escaladas a nivel industrial, principalmente por sus altos costos económicos y altas demandas energéticas, por lo cual su aplicación se ha limitado principalmente al trato de desechos tóxicos.

La empresa Europlasma opera con antorchas de plasma para degradar y revalorizar componentes tóxicos en distintas industrias. Como se observa en la figura 2.3 a través de una antorcha de plasma hacen inertes desechos tóxicos, de ceniza o asbestos, para usarlo como vitrificado de alquitrán en pavimentos y áreas construcción. Actualmente cuenta con instalaciones en Francia, Bulgaria, Corea del Sur y Japón [31].

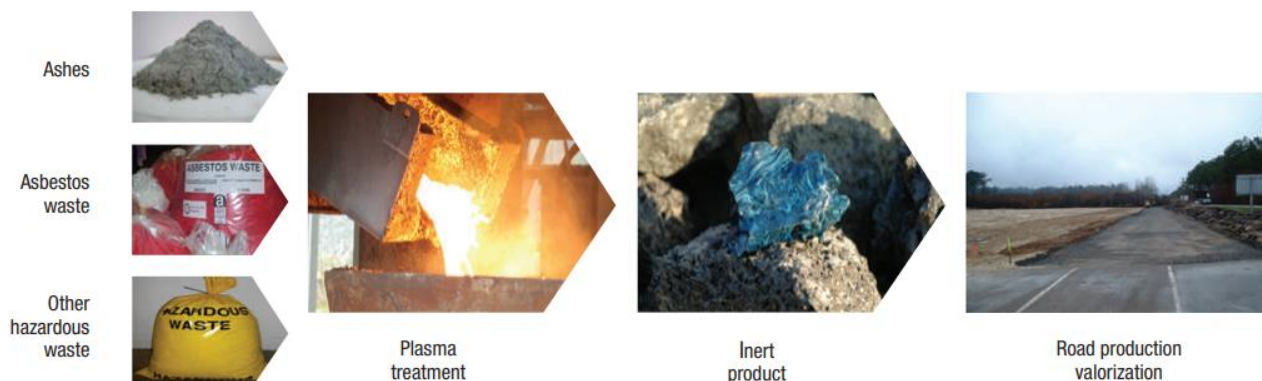


Figura 2.3: Diagrama de aplicaciones de tratamiento por plasma de la empresa Europlasma. Extraído de [31].

A V Surov et al. [19] estudian las aplicaciones químicas que se les puede dar a antorchas de plasma con harto voltaje, indicando que los sistemas de plasma inducido por microondas presentan una eficiencia superior al resto, con un 90%.

En un experimento realizado por Jie et al., se modeló y ejecutó un sistema atmosférico de plasma inducido por microondas para el tratamiento de desechos médicos [32]. Aquí se trabajó con un módulo de microondas que operaba hasta los 1100 °C de temperatura y una potencia de salida de 1.5 kW, en base a un magnetrón de 2450 MHz de frecuencia. El ensamblado del sistema se visualiza en la figura 2.4, donde además se expone el almacenamiento del producto de la gasificación por plasma, para aprovecharlo en un sistema de conversión termoeléctrica, así logrando la revaloración de los residuos médicos, que se acompaña del vitrificado resultante del proceso correspondiente a la materia inorgánica que entra al reactor.

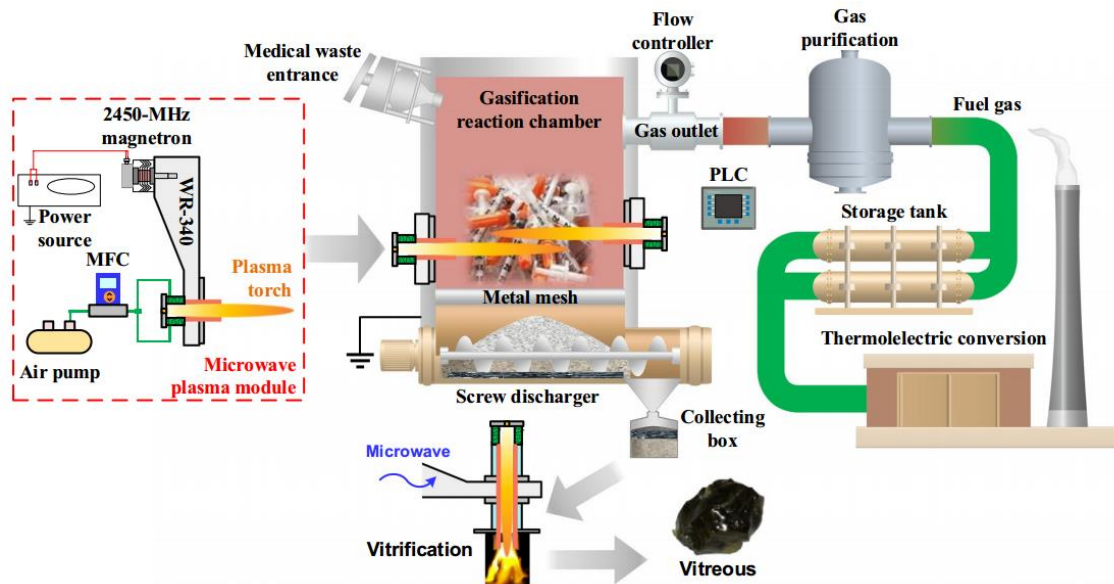


Figura 2.4: Diagrama de sistema integrado de gasificación de plasma inducido por microondas. Extraído de [32].

En otro estudio experimental realizado por Hadidi et al. [33], se propone a las antorchas de plasma en base a microondas como un tratamiento termal con potencial de escalabilidad en la industria. Una de las grandes ventajas de un sistema con microondas sobre los arcos de plasma convencionales; AC y DC, es la corta vida útil del electrodo que lo conforma y que supone elevados costos de reemplazo y mantención, además de ser sensible a la erosión en ambientes oxidativos si se usan electrodos de grafito. En este experimento se identifica la baja eficiencia del plasma inducido por microondas al acoplar antorchas para obtener una mayor potencia de salida, siendo ésta de un 50%, pero aquí se propone reestructura las cavidades resonantes que usualmente se usan para mantener la llama de plasma, pero que limitan la potencia transmitida. Se encuentra un sistema de acoplado en serie que valida una eficiencia de 95%, así demostrando poder ser usada en aplicaciones de alto consumo.

Guerra et al. [17] definieron un sistema de generación eléctrica asociado a la gasificación por plasma de residuos sólidos urbanos, donde se define los componentes y procedimientos principales a considerar en este tipo de sistemas, y además se caracteriza químicamente a los residuos sólidos municipales en Chile, en específico en la región metropolitana, pero se asume igual para el Bío-Bío.

Chiesa et al. [20] hacen un análisis termodinámico de sistemas combinados de generación eléctrica, donde encuentran que el estándar para considerar antes de mayores intervenciones específicas o de flujos de cogeneración, es de un 60%.

Mazzoni et al. [18] modelaron en Aspen un sistema de gasificación por plasma de RSU donde le acoplaron una unidad de ciclo combinado de generación eléctrica con flujos de cogeneración, considerando mezcla con petróleo y análisis del sistema completo de gasificación con sus respectivos valores de temperatura y razones de aire combustible y transferencias de temperatura que permiten desglosar y definir un sistema propio en Aspen Plus. Como se observa en la figura 2.5, en este trabajo se consideraron unidades de gasificación por plasma, enfriamiento y compresión de gas, remoción de gases ácidos, turbina a gas, turbina a vapor, caldera de recuperación de calor y unidad de separación de aire para la entrada de la antorcha de plasma. Todo esto para simular un sistema de gasificación integrado de plasma.

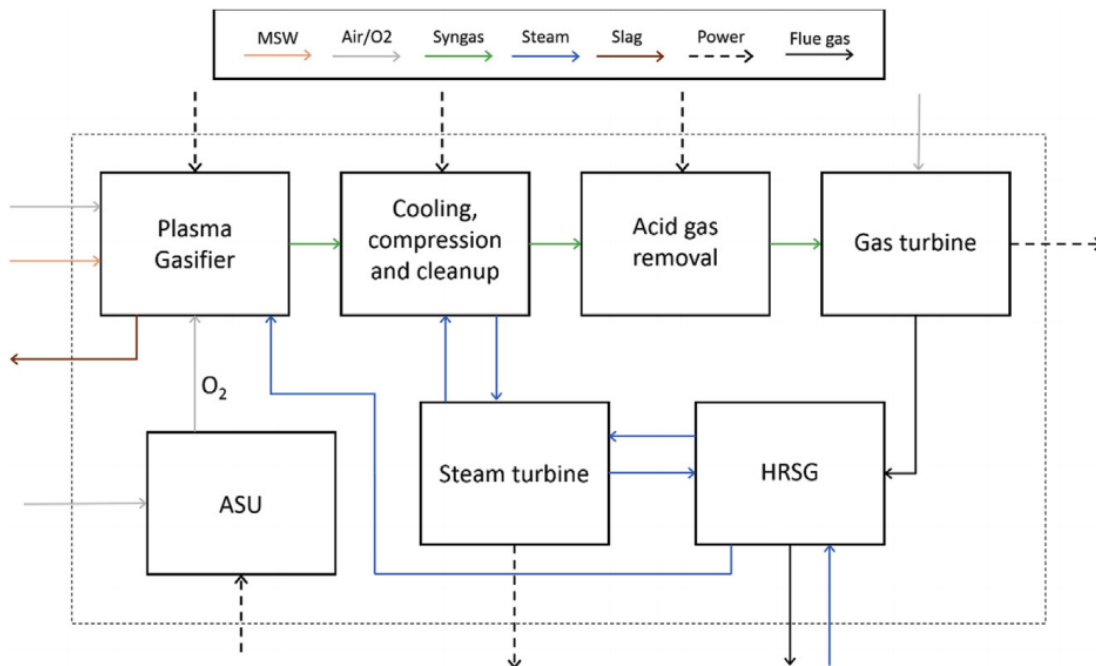


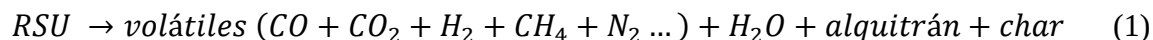
Figura 2.5: Diagrama de flujo de una planta de ciclo integrado con gasificación. Extraído de [18].

Un estudio experimental con respaldo de simulación en Aspen Plus entrega la composición de un syngas proveniente de residuos sólidos urbanos en la etapa de pirólisis al alcanzar los 550 K, además de especificar la descomposición de los residuos sólidos a volátiles. La composición se aprecia en la siguiente tabla 2.1.

Tabla 2.1: Composición de syngas tras etapa de pirólisis a 550 K. Extraído de [22].

Componente	Fracción Másica
O_2	0,01
CH	0,0544
CO	0,1955
H_2O	0,08
Cl_2	0,002
CO_2	0,105
C_6H_6O	0,0086
$C_{10}H_8$	0,0207
C_7H_8	0,0089
C	0,1673
N_2	0,005
C_6H_6	0,0091
Ceniza	0,2689
H_2	0,0544
H_2S	0,0012
COS	0,002
NO	0,002
NO_2	0,005

Este proyecto [22] también nos indica que a esa temperatura la descomposición de los residuos sólidos se tiene la siguiente expresión:



Las especies volátiles por considerar en este análisis son: C , O_2 , CO , CO_2 , H_2O , H_2 , H_2S , CH_4 , C_6H_6O , C_6H_6 , C_2H_6 , $C_{10}H_8$, C_7H_8 , SO_2 , COS , N_2 , NO , NO_2 , HCL , Cl_2 , HCN y ceniza.

En la literatura asociada a simulaciones en Aspen de procesos de gasificación por plasma se presentan distintas variables, parámetros y resultados importantes a considerar en el trabajo. La potencia necesaria para gasificar un kilogramo de residuos es un indicador de gran importancia con distintas referencias, como se puede apreciar en la tabla 2.2.

Tabla 2.2: Potencia para gasificar 1 kg de RSU por plasma según la literatura.

Potencia para gasificar 1 kg de RSU (kW/kg)	Fuente
0,799 - 0,864	Zhan et al. [34]
0,817	Byun et al. [35]
0,845	Bosmas et al. [36]

El poder calorífico del syngas obtenido, junto con su composición son dos indicadores imprescindibles al considerar una simulación de gasificación. Los resultados de la literatura de gran relevancia se muestran en las tablas 2.3 y 2.4, respectivamente.

Tabla 2.3: PCI de syngas obtenido por gasificación por plasma según la literatura.

PCI (MJ/kg)	Fuente
9,4	Mazzoni et al. [18]
11,4	Perna et al. [37]
4,2	Minutillo et al. [38]

Tabla 2.4: Potencia para gasificar 1 kg de RSU por plasma según la literatura.

Fracción molar (%)	Sesotyo et al. [39]	Mazzoni et al. [18]	Agon et al. [40]
H_2	20,01	60,01	58,37
CO	32,28	32,35	33,04
CO_2	0	7,03	4,18
CH_4	5,73	2,5e-5	4,4

Otro factor que varía en los trabajos revisados consiste en la temperatura a la que opera la antorcha de plasma, indicada en la tabla 2.4.

Tabla 2.4: Temperatura de gasificación por plasma en el reactor según la literatura.

Temperatura Plasma (°C)	Fuente
2500	Mazzoni et al. [18]
1226	Agon et al. [40]
2500	Sesotyo et al. [39]

CAPITULO 3: Estudio de Caso Base y Simulación del Proceso

3.1 Consideraciones y parámetros

Para conceptualizar el potencial de la suplementación en la producción de hidrógeno verde, se consideran en el caso base dos unidades de potencia que definen principalmente el comportamiento de la generación del hidrógeno verde, siendo estas las unidades de electrólisis y de generación eólica.

Lo principal es entender la cantidad de recursos que el sistema eólico aporta y el consumo de este por la unidad de electrólisis, lo cual se demuestra a partir de sus matrices horarias y que nos lleva a obtener el factor de planta anual, según los recursos eólicos obtenidos del explorador eólico del ministerio de energía, que, a partir del lugar y el modelo seleccionado con su respectiva curva de potencia, entrega directamente la matriz horaria con los recursos disponibles [16].

Con la consideración de dos aerogeneradores para la zona seleccionada, se define a Los Ángeles como la zona del Bío-Bío idónea para simular producción de hidrógeno verde a partir de recursos eólicos. Esto debido a los altos recursos del área respecto al resto de la región, considerando además que previamente se mencionó se trata de la comuna que recibe residuos municipales de Ancud además de la propia zona.

En un catastro realizado por la SUBDERE [41] se cuantificaron los residuos que recibe cada comuna en la región del Bío-Bío, encontrando que la comuna de Los Ángeles recibe 76.450 toneladas de residuos sólidos domiciliarios al año.

3.2 Selección de equipos



Figura 3.1: Aerogenerador seleccionado para caso base. Extraído de [27].

Se selecciona a partir de la herramienta de recurso eólico del gobierno de Chile el modelo de la figura 3.1. Un aerogenerador de la marca Vestas, modelo V136 de 3,4 MW con su curva de potencia respecto a la velocidad del viento, demostrada en la figura 3.2.

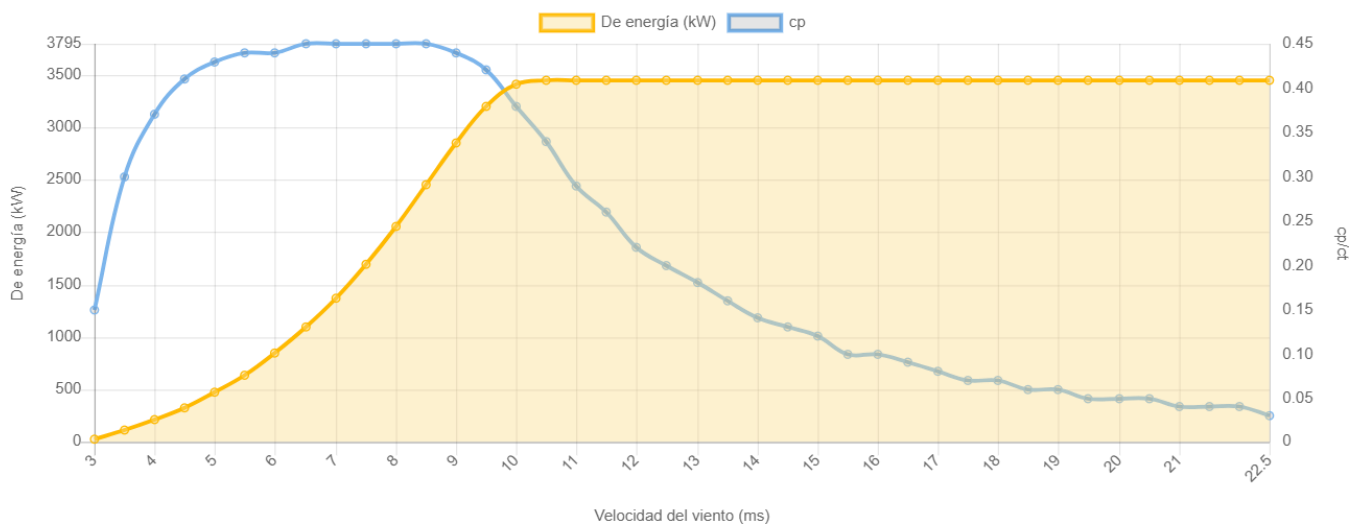


Figura 3.2: Curva de potencia de aerogenerador seleccionado. Extraído de [27]

Para la generación de hidrógeno verde se elige un electrolizador de la marca NEL modelo M3000 con una potencia de carga máxima de 13.459 kW y que opera en un rango del 10 al 100%, con una producción a carga completa de 265,35 kg/h, así pudiendo observar directamente la generación horaria de hidrógeno. La unidad de electrólisis se caracteriza del tipo PEM y se demuestra en la figura 3.3.

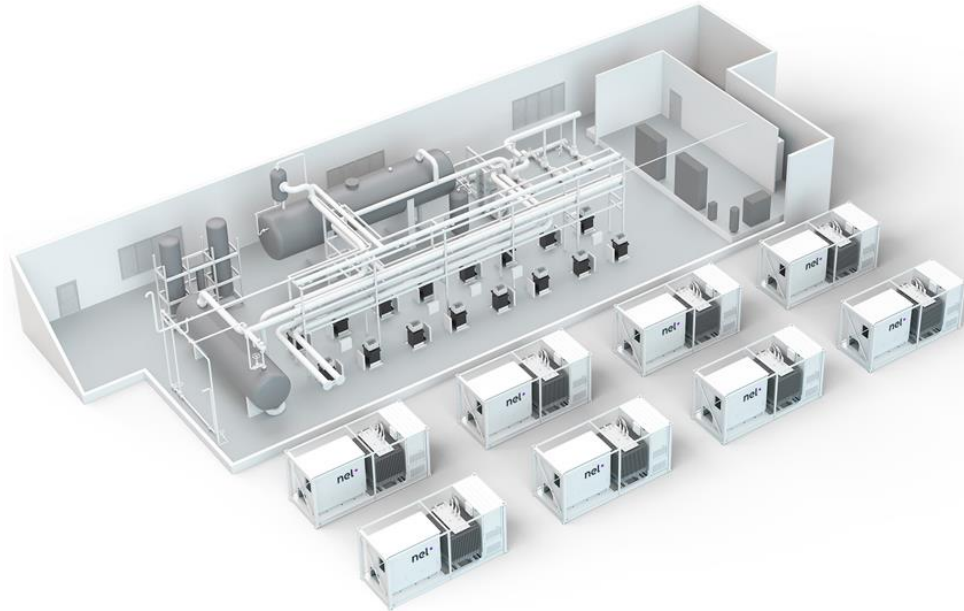


Figura 3.3: Unidad de electrólisis seleccionada para la evaluación de suplementación. Extraído de [28].

La antorcha de plasma también constituye un elemento con un consumo energético importante. En este trabajo se considera una antorcha inducida por microondas, ya que se estima es la más adecuada al contexto de trato de residuos sólidos urbanos, en especial respecto a su alta eficiencia y durabilidad. En la figura 3.4 se presenta el modelo seleccionado, correspondiente al diseño GLP540 de la marca SAIREM. Este generador de microondas entrega una potencia de salida constante de hasta 100 kW, con un magnetron que soporta condiciones extremas de temperatura, humedad y polvo. Está especificada la aplicación de gasificación por plasma como uno de sus posibles usos, siendo compatible para ser conectada en serie y generar una mayor potencia de salida en acople.



Figura 3.4: Unidad de electrólisis seleccionada para la evaluación de suplementación. Extraído de [42].

3.3 Definición de indicadores y caso base

La definición del caso base y sus respectivos indicadores es lo que demuestra la factibilidad técnica de suplementar la disponibilidad intermitente de recurso eólico, a partir de la mejora en el factor de planta y en la cuantificación de hacer partícipe a los residuos urbanos como fuente de energía para producir hidrógeno verde.

El factor de planta es un indicador de la cantidad que se produce respecto a lo que se podría producir si el sistema se operara con una potencia de carga del 100% en todas sus horas de funcionamiento, lo cual es muy lejano en la realidad de sistemas renovables con recursos intermitentes como los solares y eólicos.

La relación matemática para el factor de planta en este trabajo se define como:

$$FP = RH/PE_{max} \quad (2)$$

Donde, RH corresponde a los recursos horarios, y PE_{max} a la potencia de carga máxima de la unidad de electrólisis definida previamente.

Asociados al factor de planta, se encuentra la idea definir la cantidad de energía necesaria para producir hidrógeno que provendría de residuos urbanos, asentándose el análisis para la

producción de 1 kg de H₂V y así definir una relación entre la cantidad de hidrógeno que la planta suplementada entregaría, y la cantidad de residuos necesarios para aumentar el factor de esa planta.

Con estos dos indicadores principales de producción para el caso base se evalúa la suplementación de este sistema con uno a partir de gasificación de residuos urbanos. Ya que, si bien los residuos municipales no se consideran derechamente un recurso renovable, en el contexto energético actual podría tratarse de manera similar a como si lo fueran.

La matriz horaria de recursos eólicos presentada en la tabla 3.1 asume una potencia horaria para un día típico en un mes en un año típico, así demostrando el comportamiento para cada hora del día en cualquier mes del año.

Se considera además un funcionamiento de 8 horas diarias en un año a evaluar, para lo cual se caracteriza una matriz horaria con sus pertinentes recursos de alimentación de la unidad de electrólisis. Esto significa que hay 96 horas en un año que muestran una distinta disponibilidad de recursos, y la suplementación de ellos tiene que adecuarse de la manera en que el factor de planta aumente lo más posible.

Tabla 3.1: Matriz horaria de recursos eólicos a partir de dos aerogeneradores, en kW.

Hora	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
0:00-1:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1:00-2:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2:00-3:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3:00-4:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4:00-5:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5:00-6:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6:00-7:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7:00-8:00	1630	2370	3260	4350	10290	9640	15250	11350	6790	6720	2980	2890
8:00-9:00	1390	2020	3280	4240	10130	9770	14560	12100	6130	6670	2400	2290
9:00-10:00	2310	2260	2270	4340	10520	10110	12970	12020	4410	5520	2290	3040
10:00-11:00	3160	3000	2510	4150	11060	10820	12500	11560	4000	6160	3260	4210
11:00-12:00	3610	3380	3250	3830	11160	9730	11280	11420	3880	6910	6140	5030
12:00-13:00	4130	4020	3970	4050	9710	10710	11880	12270	4380	8150	8340	6180
13:00-14:00	5210	4660	4730	4310	9820	11200	10800	11980	5900	9420	8620	7340
14:00-15:00	5710	5590	4940	4730	10170	11220	11770	12820	6380	9880	9420	7440
15:00-16:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16:00-17:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17:00-18:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18:00-19:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19:00-20:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20:00-21:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21:00-22:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22:00-23:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23:00-0:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Al aplicar la ecuación 2 a la tabla 3.1 se obtiene la matriz con el factor de planta reflejado por cada horario, entonces el promedio de todos ellos refleja el factor de planta del sistema. A continuación, se presenta la tabla 3.2 con la matriz del factor de planta, de la cual el promedio es de 0,51.

Tabla 3.2: Matriz horaria de factor de planta.

Hora	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiemb	Octubre	Noviemb	Diciembre
0:00-1:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1:00-2:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2:00-3:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3:00-4:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4:00-5:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5:00-6:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6:00-7:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7:00-8:00	0,121	0,176	0,242	0,323	0,765	0,716	1,000	0,843	0,504	0,499	0,221	0,215
8:00-9:00	0,103	0,150	0,244	0,315	0,753	0,726	1,000	0,899	0,455	0,496	0,178	0,170
9:00-10:00	0,172	0,168	0,169	0,322	0,782	0,751	0,964	0,893	0,328	0,410	0,170	0,226
10:00-11:00	0,235	0,223	0,186	0,308	0,822	0,804	0,929	0,859	0,297	0,458	0,242	0,313
11:00-12:00	0,268	0,251	0,241	0,285	0,829	0,723	0,838	0,848	0,288	0,513	0,456	0,374
12:00-13:00	0,307	0,299	0,295	0,301	0,721	0,796	0,883	0,912	0,325	0,606	0,620	0,459
13:00-14:00	0,387	0,346	0,351	0,320	0,730	0,832	0,802	0,890	0,438	0,700	0,640	0,545
14:00-15:00	0,424	0,415	0,367	0,351	0,756	0,834	0,874	0,953	0,474	0,734	0,700	0,553
15:00-16:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16:00-17:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17:00-18:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18:00-19:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19:00-20:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20:00-21:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21:00-22:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22:00-23:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23:00-0:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Además, se encuentra la producción de hidrógeno según la producción que funciona en el rango 10-100% con un máximo de 265,32 kg/h, dependiendo este valor directamente del factor de planta en cada horario. En la tabla 3.3 se presenta la matriz de producción en kg de hidrógeno verde, la cual representa la ecuación:

$$H2V = FP * HE \quad (3)$$

Donde H2V corresponde a producción de hidrógeno verde horaria y HE es la producción de salida del electrolizador, dependiendo directamente del factor de carga del sistema. Para cada mes se multiplica el día típico por la cantidad de días que el mes tiene. La producción anual del sistema se encuentra de 396.898 kg de hidrógeno verde para el caso base.

Tabla 3.3: Matriz horaria de producción de hidrógeno, en kg.

Hora	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
0:00-1:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1:00-2:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2:00-3:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3:00-4:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4:00-5:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5:00-6:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6:00-7:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7:00-8:00	32	47	64	86	203	190	265	224	134	132	59	57
8:00-9:00	27	40	65	84	200	193	265	239	121	131	47	45
9:00-10:00	46	45	45	86	207	199	256	237	87	109	45	60
10:00-11:00	62	59	49	82	218	213	246	228	79	121	64	83
11:00-12:00	71	67	64	76	220	192	222	225	76	136	121	99
12:00-13:00	81	79	78	80	191	211	234	242	86	161	164	122
13:00-14:00	103	92	93	85	194	221	213	236	116	186	170	145
14:00-15:00	113	110	97	93	200	221	232	253	126	195	186	147
15:00-16:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16:00-17:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17:00-18:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18:00-19:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19:00-20:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20:00-21:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21:00-22:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22:00-23:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23:00-0:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

El factor de planta calculado a partir de las matrices horarias corresponde a 0,51 y la producción anual de hidrógeno se define en 396.898 kg. Esto demuestra que las unidades esenciales de generación eólica y electrólisis, por sí solas producen prácticamente la mitad del hidrógeno que podrían estar produciendo, y en el contexto de crisis energética y descarbonización es que nace la necesidad de reforzar esa cantidad, y añadirles a esas dos unidades un sistema que permita mejorar el nivel de producción del supuesto combustible del futuro, siempre con el enfoque de que lo “verde” como prefijo al hidrógeno no puede perder su significado.

3.4 Simulación en Aspen Plus

Aspen Plus es un software de simulación de procesos termoquímicos que permite estudiar el comportamiento de flujos y los parámetros relevante para flujos de masa y energía en algún ciclo termodinámico, siendo en este caso útil para uno de gasificación por plasma.

Lo que caracteriza a la gasificación por plasma son las altas temperaturas de la antorcha del gasificador que permiten la desintegración completa de los residuos ingresados además de favorecer la disminución de formación de metano y fomentan la producción de CO y H_2 y por ende se obtiene un syngas con un poder calorífico mayor al de otros sistemas de gasificación convencionales [21]. De los dos tipos principales de antorchas inducidas por

plasma: de arco eléctrico y de microondas, se considera uno de microondas por su mayor eficiencia de un 90% para ese tipo de sistemas [19].

3.5 Caracterización de residuos

La caracterización de la composición química de residuos sólidos es de principal importancia al empezar la simulación en Aspen, para lo cual se presenta la siguiente tabla de composición de RSU en Chile, en específico para la región metropolitana pero que en este trabajo se considera igual a los RSU del Bío Bío.

Tabla 3.4: Composición química de los RSU a partir de sus componentes en Chile. Extraído de [17].

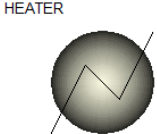
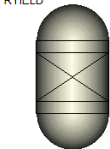
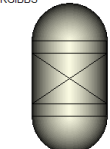
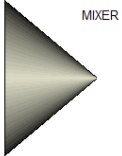
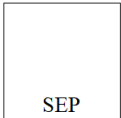
Componentes principales	% En base húmeda	Humedad típica	% En peso base seca	% En peso base seca					
				C	H	O	N	S	Ceniza
Residuos alimentos	49,20	70	25,81	48,0	6,4	37,6	2,6	0,4	5,0
Residuos jardín poda	4,96	60	3,47	46,0	6,0	38,0	3,4	0,3	6,3
Papel	10,18	6	16,73	49,1	6,1	43,0	-	0,2	1,5
Cartón	3,33	5	5,53	43,0	5,9	44,8	0,3	0,2	5,0
Plásticos	10,07	2	17,26	60,0	7,2	22,8	-	-	10,0
Tetrapack	0,70	10	1,10	32,9	5,0	38,6	0,1	0,1	23,3
Pañales y celulosas sanitarias	4,95	60	3,46	48,4	7,6	38,8	0,5	0,4	4,1
Gomas	0,11	2	0,19	69,7	8,7	-	--	1,6	20,0
Cueros	0,07	10	0,11	60,0	8,0	11,6	10,0	0,4	10,0
Vidrio	3,94	2	6,75	0,5	0,1	0,4	-	-	98,9
Metales	1,80	2	3,08	4,5	0,6	4,3	-	-	90,5
Madera	0,83	60	0,58	50,1	6,4	42,3	0,1	0,1	1,0
Textiles	1,97	10	3,10	48,0	6,4	40,0	2,2	0,2	3,2
Suciedad y Cenizas	4,20	8	6,76	24,3	3,0	4,0	0,5	0,2	68,0
Misceláneos	3,69	6	6,07	24,3	3,0	4,0	0,5	0,2	68,0
Total	100	42,81	100	42,24	5,44	28,57	0,97	0,21	22,57

El programa permite la inclusión de cualquier sólido tras una previa composición elemental química detallada, para lo que además se requiere la composición elemental y proximal de los residuos, información que no se tiene en específico para los residuos en Chile o en la región, pero que la literatura presenta para un estudio de sistemas de gasificación por plasma de residuos municipales realizado en Corea del Sur [22], y se utiliza esta información para estimar la etapa de gasificación del flujo originalmente sólido.

3.5 Modelo a Simular

En la tabla 3.5 se presentan los equipos incluidos en la simulación y su función en el sistema.

Tabla 3.5: Equipos definidos en Aspen que permiten la simulación del sistema.

Equipo en Aspen	Nombre	Rol
	Heater	Simula el intercambio de calor entre flujo y equipos. Se usa para la entrada de los RSU y la formación del plasma.
	RYield	Simula la descomposición de los RSU sólidos a gaseos. A 276,85 °C, según el estudio de pirólisis [22].
	RGibbs	Reacciones ocurridas para la formación de syngas por el método de reducción de energía libre de Gibbs. Se modela a 2500 y 1200 °C, para representar las interacciones a altas y bajas temperaturas.
	MIXER	Simula la mezcla de flujos para el aire reforzado con oxígeno que forma el plasma.
	SEP	Separación de componentes en un fluido. Se usa para el separado de humedad a la entrada del gasificador y aislar el vitrificado en el producto. Separa el 85% de la humedad que no

		es parte de los reactores según la literatura.
--	--	--

Para el modelo en el software se considera el descrito por Mazzoni et al. [18], el cual es capaz de representar un reactor de lecho fluidizado con sus partes primordiales y se observa en la figura 3.5. Aquí los RSU entran como un sólido que simula su entrada al gasificador con un intercambio de calor a los 100 °C que permite después separar la mayoría de la humedad de los reactores e ingresar al HTR que representa la zona del reactor a mayor temperatura y después un reactor LTR que simula la sección con menos temperatura, posterior a una separación del vitrificado, que representa la materia inorgánica principalmente de vidrios y metales que no logran gasificarse y fluye desde el fondo del reactor para separarse de los volátiles que conforman el syngas.

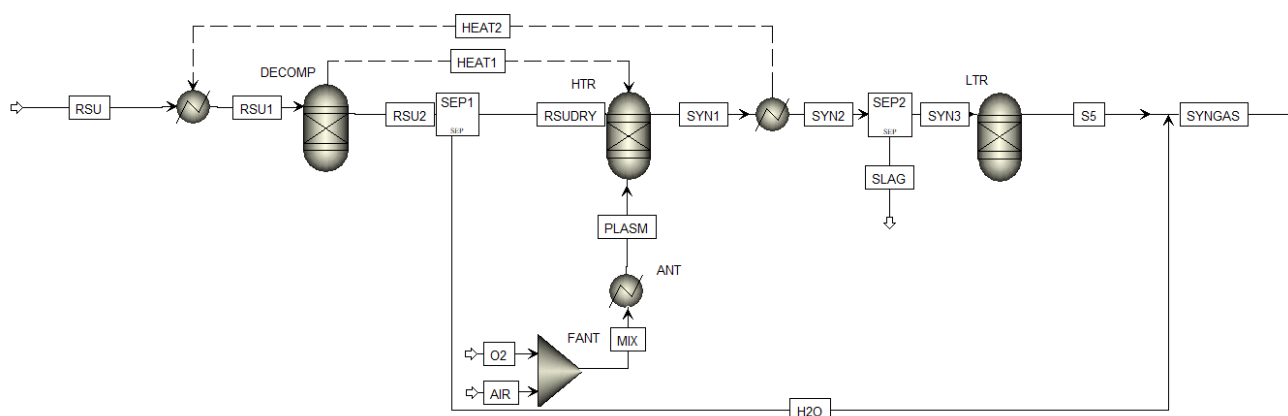


Figura 3.5: Diagrama modelado en Aspen Plus de gasificación por plasma de RSU.

Los flujos de entrada que se definen en el sistema son el flujo másico de residuos y de aire de gasificación para la antorcha de plasma. Según el modelo desarrollado por Montiel-Bohórquez et al. [43], los parámetros de cantidad de residuos y aire de gasificación que entran al modelo corresponden a 5,83 y 3,11 kg por unidad de tiempo. A partir de esa razón es como se definen los flujos de entrada en una relación similar, éstos se presentan en la tabla 3.6:

Tabla 3.6: Input de flujos principales en Aspen Plus.

Flujo másico RSU (kg/h)	5
Flujo másico aire plasma (kg/h)	3

El flujo másico del aire plasma corresponde a la suma de oxígeno y aire que se inyecta a la antorcha de microondas como fluido de trabajo. Se considera que cada uno aporta un flujo de 1,5 kg/s. El O_2 considerado que se adhiere al gas del plasma se obtiene como el subproducto del proceso de electrólisis del agua en el hidrógeno verde, así añadiendo a la idea principal de suplementación también una posibilidad de cogeneración que en este modelo de Aspen se refleja en el oxígeno que permite cumplir los requerimientos del diseño de la literatura, junto con ignorar las potencias de consumo de alguna unidad de separación de aire en la estimación de la suplementación a encontrar.

Para la simulación se define un flujo másico de 5 kg/s de sólidos de RSU, que luego se descomponen en un reactor RYield para obtener su equivalencia en gases livianos, humedad, alquitrán y char. Luego en base al modelo ya mencionado se separa el 85% del agua para ser incorporada a la salida del gas, y así suponer que no participa en los reactores a alta y baja temperatura, los cuales se modelan según un reactor de equilibrio multifase basado en la minimización de la energía libre de Gibbs.

Un indicador principal para encontrar la potencia que la unidad de gasificación aporta para la suplementación del recurso renovable, es la energía que consume la gasificación completa de 1 kg de residuos, y ese valor lo entrega el software para el sistema. Por lo que la potencia que consumen los reactores en el Aspen Plus para las temperaturas definidas se divide para encontrarse en su razón hacia 1 kg de RSU.

Si bien este trabajo no considera el análisis de los componentes de un ciclo combinado de generación eléctrica y el efecto que aquello tenga en la factibilidad de suplementación, en la figura 3.6 se presenta el diagrama completo de la literatura seleccionada para trabajar en Aspen [18], la cual incluye a la salida del syngas una unidad de enfriamiento y limpieza de partículas, unidad de limpieza de sulfuro, y un ciclo Brayton-Rankine.

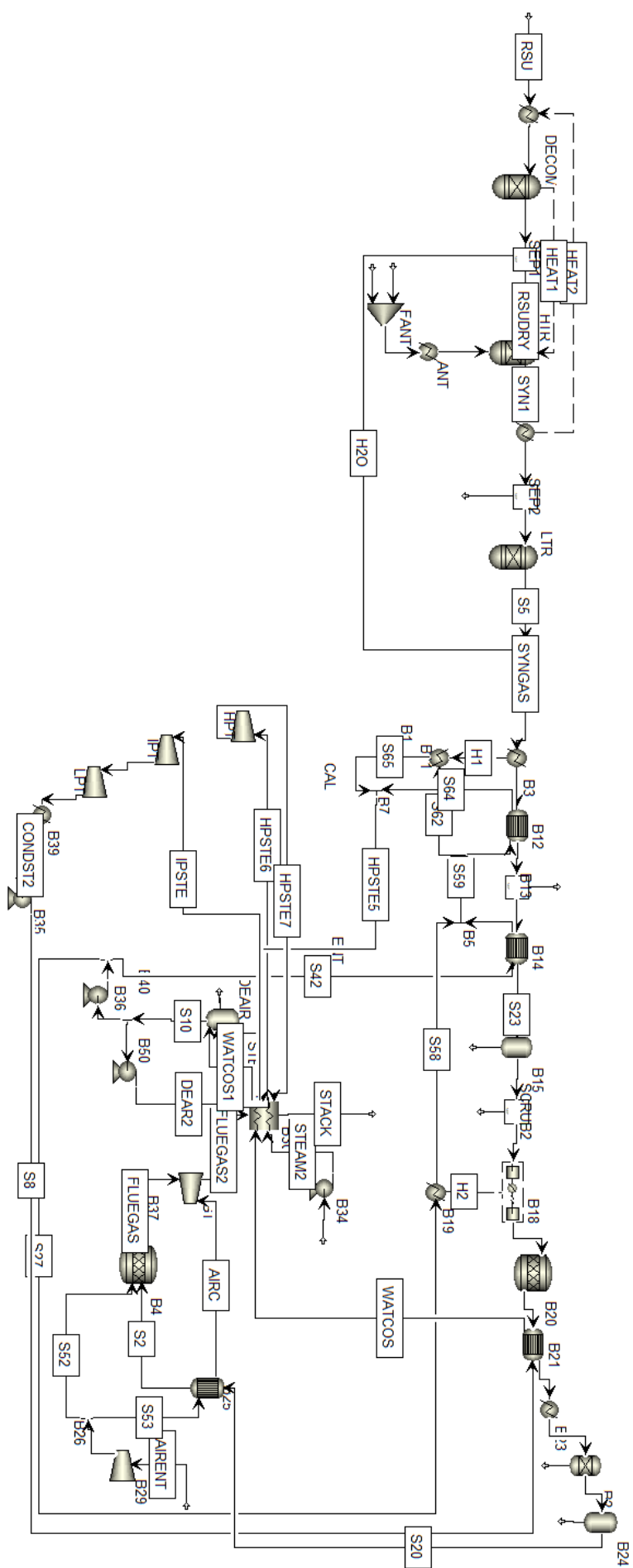


Figura 3.6: Diagrama completo de ciclo de gasificación integrada por plasma con ciclo combinado eléctrico.

CAPITULO 4: Resultados y Discusión

4.1 Resultados simulación

Para los resultados del modelo lo principal a obtener del software aspen plus son el PCI del syngas obtenido y las potencias de consumo asociadas a la gasificación por completo de los residuos, como se aprecia en la tabla 4.1, valores entregados por Aspen Plus tras la simulación.

Tabla 4.1: Resultados de la simulación en Aspen Plus.

PCI syngas (MJ/kg)	11,97
Potencia para gasificar un kilo de RSU (kW)	0,878
Vitrificado (kg/h)	1,35
Syngas (kg/h)	6,64

En la tabla 4.2 se presenta la fracción molar del syngas respecto a sus especies importantes a considerar y comparar.

Tabla 4.2: Resultados de la composición del syngas en Aspen Plus.

Fracción molar	(%)
H_2	0,39
CO	0,37
CO_2	0,012
CH_4	4,61e-6

Las dos tablas 4.1 y 4.2 indican una similitud importante respecto a los valores obtenidos en la simulación en Aspen y en la literatura, siendo el potencia para gasificar un kilo de RSU el valor más próximo.

A partir del caso base previamente definido, se considera la caracterización del syngas que entra a un sistema de generación eléctrica de ciclo combinado. Esto en la literatura indica una eficiencia de 0,6 [25]. Por lo que se toma ese valor para definir la energía obtenida por el syngas a partir de su flujo másico y su poder calorífico inferior, el cual es de 11,97 MJ/kg, presentado en la tabla 4.1.

4.2 Determinación de indicadores de suplementación

La energía encontrada necesaria para gasificar un kilogramo de RSU se define según la ecuación (2), donde las potencias de consumo en la antorcha y en los reactores simulados las arroja el mismo Aspen Plus, así considerando todas las etapas del reactor y sus potencias asociadas, como la potencia necesaria para gasificar los residuos municipales.

Se definen los indicadores con sus respectivas fórmulas a calcular:

$$\dot{Q}_{gas} = \frac{P_{ant} + P_{reac}}{\dot{m}_{RSU}} \quad (2)$$

Donde $\dot{Q}_{gas}$ es la potencia necesaria para gasificar 1 kg de residuos, P_{ant} es la potencia de consumo de la antorcha y P_{reac} es la potencia de consumo en los reactores, ambos valores arrojados por la simulación en Aspen Plus, y que sumadas representan la potencia consumida para la gasificación. $\dot{m}_{RSU}$ es el flujo de residuos que entran al sistema, que en Aspen se define como 5 kg/s; así permitiendo encontrar el resto de los valores.

$$\dot{Q}_{plas} = PCI_{syn} * \dot{m}_{syn} * 1h/3600s \quad (3)$$

Donde $\dot{Q}_{plas}$ es la potencia que sale del sistema de gasificación por plasma con el flujo del syngas; representado por $\dot{m}_{syn}$, y PCI_{syn} como el poder calorífico inferior del syngas encontrado.

$$P_{net} = \dot{Q}_{plas} - \dot{Q}_{gas} \quad (4)$$

Donde P_{net} es la potencia neta del sistema de gasificación por plasma.

$$\dot{Q}_{igcc} = \dot{Q}_{plas} * 0,6 \quad (5)$$

Con $\dot{Q}_{igcc}$ como el flujo de energía que sale del ciclo combinado hacia suplementar la unidad eólica.

A partir de las variables previamente definidas, queda la interrogante de la cantidad de residuos que se utilizaría, lo cual incide directamente en la potencia de instalación de la antorcha de plasma y en el suplemento hacia el recurso eólico. Según el dato previo de la recepción de 76.450 toneladas de residuos domiciliarios en Los Ángeles, se considera que 3000 kg de residuos gasificados por hora sería una buena magnitud de suplementación, ya que con 8 horas diarias operacionales se dispondrían de 8.760 toneladas de residuos gasificados al año, lo cual es considerable respecto al total generado por la comuna. Otra limitante a la cantidad de residuos es la unidad de antorcha de plasma, ya que, con el modelo de antorcha de microondas previamente mencionado, se necesitarían de 27 de ellas conectadas en serie como lo describe la literatura.

Tabla 4.3: Parámetros del ciclo que se utilizarán en el cálculo de suplementación

Flujo másico de RSU para suplementar (kg/h)	3000
Potencia neta gasificación por plasma (kW)	10632
Potencia generada en ciclo combinado (kW)	6379

A partir de estos valores presentados en la tabla 4.3, se interfiere en las matrices horarias para hacer el análisis de suplementación.

Para encontrar la matriz suplementada es necesario definir la ecuación que la representa:

$$FP1 = (RH + \dot{Q}_{igcc})/PE_{max} \quad (4)$$

En la tabla 4.4 se muestra la matriz horaria suplementada con un nuevo factor de planta por el flujo de potencia generada en el ciclo combinado, constante para cada horario.

Tabla 4.4: Matriz horaria suplementada con generación de ciclo combinado

Hora	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiemb	Octubre	Noviembre	Diciembre
0:00-1:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1:00-2:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2:00-3:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3:00-4:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4:00-5:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5:00-6:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6:00-7:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7:00-8:00	0,595	0,650	0,716	0,797	1,239	1,190	1,607	1,317	0,978	0,973	0,695	0,689
8:00-9:00	0,577	0,624	0,718	0,789	1,227	1,200	1,556	1,373	0,929	0,970	0,652	0,644
9:00-10:00	0,646	0,642	0,643	0,796	1,256	1,225	1,438	1,367	0,802	0,884	0,644	0,700
10:00-11:00	0,709	0,697	0,660	0,782	1,296	1,278	1,403	1,333	0,771	0,932	0,716	0,787
11:00-12:00	0,742	0,725	0,715	0,759	1,303	1,197	1,312	1,322	0,762	0,987	0,930	0,848
12:00-13:00	0,781	0,773	0,769	0,775	1,195	1,270	1,357	1,386	0,799	1,080	1,094	0,933
13:00-14:00	0,861	0,820	0,825	0,794	1,204	1,306	1,276	1,364	0,912	1,174	1,114	1,019
14:00-15:00	0,898	0,889	0,841	0,825	1,230	1,308	1,348	1,426	0,948	1,208	1,174	1,027
15:00-16:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16:00-17:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17:00-18:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18:00-19:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19:00-20:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20:00-21:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21:00-22:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22:00-23:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23:00-0:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Como desde el mes de mayo empiezan a haber excedentes de energía requeridas para ciertos horarios. Parte en mayo y va acumulando excedentes por cuatro meses. Esto se interpreta como que el ciclo combinado debe operar combustionando menos syngas y generar menos electricidad que suplemente al recurso eólico. Lo importante de esto es que el syngas sobrante

de los horarios que necesitan menos suplementación, se puede usar para generar más suplemento de energía en otros horarios, y así alcanzar un factor de planta aún más alto.

Para continuar, se suman los excedentes de factor de planta para cada horario marcado en verde y se empiezan a utilizar en septiembre. Así se encontró un excedente anual de factor de planta de 10,985, equivalente a 147.844 kW. Estos se van sumando para cada horario desde septiembre, completando el factor de planta hasta 1, para ir obteniendo la producción máxima. Esto ocurre hasta la hora 2 del mes de abril, ya que hasta que comience mayo no quedan excedentes de energía. Esto se observa en la tabla 4.5, donde se realizó la matriz de suplemento para las horas alejadas de la producción máxima después de la primera evaluación de suplementación con energía de residuos.

Tabla 4.5: Matriz de suplementación a partir de excedentes de energía.

Hora	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiemb	Octubre	Noviemb	Diciembre
0:00-1:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1:00-2:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2:00-3:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3:00-4:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4:00-5:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5:00-6:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6:00-7:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7:00-8:00	0,405	0,350	0,284	0,203	0,000	0,000	0,000	0,000	0,022	0,027	0,305	0,311
8:00-9:00	0,423	0,376	0,282	0,200	0,000	0,000	0,000	0,000	0,071	0,030	0,348	0,356
9:00-10:00	0,354	0,358	0,357	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,198	0,116	0,356	0,300
10:00-11:00	0,291	0,303	0,340	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,229	0,068	0,284	0,213
11:00-12:00	0,258	0,275	0,285	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,238	0,000	0,070	0,152
12:00-13:00	0,219	0,227	0,231	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,201	0,000	0,000	0,067
13:00-14:00	0,139	0,180	0,175	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,088	0,000	0,000	0,000
14:00-15:00	0,102	0,111	0,159	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,052	0,000	0,000	0,000
15:00-16:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16:00-17:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17:00-18:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18:00-19:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19:00-20:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20:00-21:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21:00-22:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22:00-23:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23:00-0:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Ahora se obtiene un nuevo factor de planta con la suplementación de los excedentes. Y los únicos horarios que se mantienen en la tabla 4.5 son las horas 3 a 8 de abril, mientras que el resto del año pasa a ser 1. Esto significa que el nuevo factor de planta promedio pasa a ser 0,997. Con nuevo factor de planta prácticamente ideal se tiene la mejora respecto al caso base.

También se tiene una relación entre la cantidad de hidrógeno verde producido, y los residuos involucrados, con una razón entre las toneladas de residuos estimadas anualmente a la suplementación, y la cantidad de hidrógeno producido. Así encontrando, que por cada kg de H₂V producido, se involucran 11,23 kg de residuos urbanos.

Tabla 4.5: Resultados finales

Factor de Planta Caso Base	0,51
Factor de Planta Suplementado	0,997
Producción Anual Caso Base (kg)	398.898
Producción Anual Suplementada (kg)	779.806
Aumento de Factor de Planta (%)	48,97
Cantidad de residuos asociados a 1kg de H2V (kg)	11,23
Energía que proviene de RSU al suplementar (%)	48,97

CAPITULO 5: Conclusiones

Con la realización del trabajo es caracterizada la factibilidad de suplementación a partir de la previa definición y mejora de indicadores, que corresponde al factor de planta de la producción de hidrógeno verde en el Bío Bío y el aumento de este. Esta factibilidad recae en la mejora del factor de planta según las potencias que intervienen en el sistema para cada unidad y equipo previamente destacado en las unidades eólicas y de gasificación por plasma.

En el software Aspen Plus se logra analizar el proceso de gasificación por plasma, así obteniendo valores de flujos y propiedades como el poder calorífico inferior, que al caracterizar el syngas, permiten un análisis partiendo desde el uso de residuos hasta todos los flujos involucrados

La definición de un caso base y sus respectivos indicadores de factor de planta y producción de hidrógeno verde en kg son fundamentales en la adecuada implementación de un método que refleje los beneficios al tratar con recursos renovables intermitentes.

A partir de los resultados obtenidos, se considera que un aumento del 48,97% en el factor de planta es un resultado que bordea lo ideal, debido a que sube el factor de planta prácticamente a 1, así demostrando que una distribución organizada de los recursos eólicos es bastante efectiva en la mejora de las condiciones y parámetros de desempeño de una planta.

Referencias

- [1] SGR (2023) *The point of no return: how close is the world to irreversible climate change?*. <https://www.sgr.org.uk/resources/point-no-return-how-close-world-irreversible-climate-change>
- [2] CNBC (2024). *Global energy demand will outpace population growth through 2050, kuwait oil CEO says*. <https://www.cnbc.com/2024/03/19/global-energy-demand-will-outpace-population-growth-through-2050-kuwait-oil-ceo-says-.html>
- [3] Ministerio de Medio Ambiente (2020). 4to Informe Bienal de Actualización de Chile Sobre Cambio Climático.
- [4] Ministerio de Energía (2022). Estrategia Nacional de Electromovilidad.
- [5] M. Awad et al. “A review of water electrolysis for green hydrogen generatino considering PV/wind/hybrid/hydropower/geothermal/tidal and wave/biogas energy systems, economic analysis, and its application”. 2024
- [6] Bio Bio Chile (2024). *UCSC presenta nueva planta de hidrógeno verde: es la primera de estas características en la región*. <https://www.biobiochile.cl/noticias/nacional/region-del-bio-bio/2024/06/26/ucsc-presenta-nueva-planta-de-hidrogeno-verde-es-la-primerade-estas-caracteristicas-en-la-region.shtml>
- [7] Ministerio de Energía (2021). *Chile y Alemania firman acuerdo para impulsar hidrógeno verde*. <https://energia.gob.cl/noticias/nacional/chile-y-alemania-firman-acuerdo-para-impulsar-el-hidrogeno-verde#:~:text=Chile%20y%20Alemania%20firman%20acuerdo%20para%20impulsar%20el%20hidr%C3%B3geno%20verde,-29%20Jun%202021&text=Ambos%20pa%C3%ADses%20acordaron%20fortalecer%20la,del%20llamado%20%E2%80%9Ccombustible%20del%20futuro%E2%80%9D>
- [8] Bio Bio Chile (2023). *Pese a cierre de relleno Hidronor: Municipio de Hualpén sigue retirando los residuos domiciliarios*. <https://www.biobiochile.cl/noticias/nacional/region-del-bio-bio/2023/05/03/pese-a-cierre-de-relleno-hidronor-municipio-de-hualpen-sigue-retirando-los-residuos-domiciliarios.shtml>
- [9] Bio Bio Chile (2023). *Crisis de basura en Hualpén: municipio informa que residuos domiciliarios serán llevados a Ñuble*. <https://www.biobiochile.cl/noticias/nacional/region-del-bio-bio/2023/05/03/pese-a-cierre-de-relleno-hidronor-municipio-de-hualpen-sigue-retirando-los-residuos-domiciliarios.shtml>
- [10] The Economic Times (2019). *The world's 2-billion-ton trash problem just got more alarming*. <https://economictimes.indiatimes.com/news/international/world-news/the-worlds-2-billion-ton-trash-problem-just-got-more-alarming/articleshow/70186945.cms?from=mdr>

- [11] Ministerio del Medio Ambiente (2020). *Resumen del Estado del Medio Ambiente para la Ciudadanía*. <https://sinia.mma.gob.cl/estado-del-medio-ambiente/informe-del-estado-del-medio-ambiente-2020/>
- [12] Ministerio del Medio Ambiente (2021). *CHILE, GREEN HYDROGEN*. <https://www.bye.cl/wp-content/uploads/2021/01/CHILE-GREEN-HYDROGEN.pdf>
- [13] C. Martínez de Leon, C. Ríos y J.J. Brey. “Cost of green hydrogen: Limitations of production from a stand-alone photovoltaic system”. 2023.
- [14] UC Chile (2024). *Boosting Chile’s green Hydrogen Revolution*. <https://www.uc.cl/en/news/boosting-chiles-green-hydrogen-revolution/>
- [15] Korea Times (2024). *Korea, Sweden to join forces for green transition*. https://www.koreatimes.co.kr/www/nation/2024/08/113_373538.html
- [16] Ministerio de Energía (2022). *Explorador Eólico*. <https://eolico.minenergia.cl/potencia>
- [17] N. Guerra. “Generación Eléctrica Mediante Gasificación por Plasma de Residuos Sólidos Urbanos”. 2016.
- [18] L. Mazzoni, I Janajreh, S. Elagroudy, C. Ghenai. “Modeling of plasma and entrained flow co-gasification of MSW and petroleum sludge”. 2020.
- [19] A. V. Surov et al. “High voltage AC plasma torches with long electric arcs for plasma-chemical applications”. 2017.
- [20] P. Chiesa, E. Macchi. “A Thermodynamic Analysis of Different Options to break 60% Electric Efficiency in Combined Cycle Power Plants. 2004.
- [21] S Farzad et al. “A critical review on biomass gasification, co-gasification, and their environmental assesments. 2016.
- [22] A Tungalag et al. “Yield Prediction of MSW gasification including minor species through Aspen Plus simulation”. 2019.
- [23] The World Bank. “*WHAT A WASTE 2.0*”. https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/trends_in_solid_waste_management.html
- [24] CEP (2024). *La permisología como impuesto a la inversión: ¿Cómo salir de la maraña regulatoria?*. <https://www.cepchile.cl/investigacion/voces-del-cep-05-mayo-2024/>
- [25] Ministerio del medio Ambiente (2021). Residuos.
- [26] Canary Media (2021). *How much renewables expansion is needed for a global green hydrogen economy?*. <https://www.canarymedia.com/articles/hydrogen/how-much-renewable-capacity-would-world-need-for-green-hydrogen>
- [27] Wind Turbine Models. <https://www.wind-turbine-models.com/turbines/1282-vestas-v136-3.45>
- [28] NEL Hydrogen. <https://nelhydrogen.com/landing-pages/large-electrolysers/>

- [29] The Wind Power. *Parques eólicos en Chile*. https://www.thewindpower.net/country_windfarms_es_57_chile.php
- [30] Munir et al. "Plasma gasification of municipal solid waste for waste-to-value processing". 2019.
- [31] Europlasma. "plaquette-europlasma-industries-01-UK". <https://europlasma-industries.com/wp-content/uploads/2017/12/plaquette-europlasma-industries-01-UK.pdf>
- [32] Jie et al. "An atmospheric microwave plasma-base distributed system for medical waste treatment". 2022.
- [33] Hadidi et al. "Efficient, modular microwave plasma torch for thermal treatment". 2015.
- [34] Zhang et al. "Gasification of municipal solid waste in the plasma gasification melting process". 2012.
- [35] Byun et al. "Thermal Plasma Gasification of Municipal Solid Waste". 2011.
- [36] Bosmans et al. "The crucial role of Waste-to-Energy technologies in enhanced landfill mining: a technology review". 2012.
- [37] Perna et al. "Hydrogen from intermittent renewable energy sources as gasification medium in integrated waste gasification combined cycle power plants: A performance comparison". 2016.
- [38] Minutillo et al. "Modelling and performance analysis of an integrated plasma gasificatino cimbind cycle (IPGCC) power plant". 2009.
- [39] Sesotyo et al. "Plasma gasification with municipal solid waste as a method of energy self sustained for better urban built environment: modeling and simulation". 2019.
- [40] Agon et al. "Plasma gasification of refuse derived fuel in a single-stage system using different gasifying agents". 2016.
- [41] SUBDERE (2022). Diagnóstico y catastro regional de residuos sólidos domiciliarios

Región del Biobío.

- [42] SAIREM. “915 MHz Microwave Generator”. <https://cdn.sairem.com/wp-content/uploads/2020/04/SAIREM-GLP540-GLP720-GLP1000-MK146-EN.pdf>
- [43] Montiel-Bohórquez et al. “Modelling of an integrated plasma gasificatino combined cycle power plant using aspen plus”. 2021.