UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

ACADEMIA DE CIENCIAS AERONÁUTICAS

VITACURA-SANTIAGO-CHILE

USO DEL HIDRÓGENO VERDE EN MOTORES DE AERONAVES A320-200 CASO APLICADO A LOS AEROPUERTOS ANDRES SABELLA Y DIEGO ARACENA.

LUCIANO ALEJANDRO VARGAS URIBE

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE

INGENIERO EN AVIACIÓN COMERCIAL

PROFESOR GUÍA: SR. CRISTIAN CARVALLO G.

PROFESOR CORREFERENTE: SR. MARTINUS POTTERS

Miércoles, 17 de agosto del 2022

Dedicatoria

El presente trabajo de título es posible gracias a todo el apoyo, cariño y experiencia que he recibido y sigo recibiendo el día a día, que me motiva y ayuda a crecer emocional, académicamente, además de formarme como persona y profesional.

Primero quiero agradecerles a mis compañeros, profesores, auxiliares y todos aquellos que estuvieron durante mi vida universitaria, que me aportaron con su amistad, conocimiento y sabiduría de la vida en general.

Segundo conmemoro a mi tía Angi que en segundo medio tuvimos muchas conversaciones sobre la FACH y la aviación militar, más específico la escuadra de los Halcones, que fue lo que me motivo a sumergirme en el mundo de la aviación en general. Ella fue la que inició mi interés por querer ser piloto comercial y estudiar la carrera de ingeniería en aviación comercial.

Tercero darle méritos a mi padre que fue con quien hablé largas horas y encendió mi interés por el hidrogeno verde y como este podría ser un avance tecnológico podía generar un cambio importante en todas las industrias, además de ayudarme con la recopilación de información respecto a las distintas iniciativas sobre el hidrógeno verde que estaba impulsando el gobierno de Chile.

Cuarto agradecerle a Catalina Zamora mi polola que me ha acompañado en mis momentos finales de esta etapa, dándome ánimos en los momentos de estrés, haciendo mucho más agradable este proceso que estoy viviendo.

Finalmente conmemorar a mi madre una mujer que considero mi ejemplo a seguir, capaz de conseguir cualquier cosa si se lo propone, que me dio todas las herramientas y siempre se preocupó de que nunca me faltara nada, todo lo que soy hoy en día se lo debo a ella y es fruto de su esfuerzo y de verdad te agradezco de corazón.

Resumen

Actualmente el mundo está inmerso en una crisis climática, donde las emisiones de CO_2 son uno de los tanto factores responsables. Chile en el año 2020 es considerado el país número 46 del ranking mundial y 4to del Sudamericano con 84.955 [kt] anuales de emisiones de CO_2.

En la aviación los niveles de emisiones de CO_2 según información del Ministerio del Medio Ambiente, en el 2018 ascienden a 3.669 [kt] teniendo un incremento de 1.550 [kt] que representa un aumento del 46% desde el año 2010. Bajo el supuesto de continuar con el mismo ritmo y sin considerar ninguna medida de mitigación como biocombustibles, por ejemplo, se tiene que para el año 2035 los niveles de CO_2 emitidos aumentarían al valor de 6.092 [kt] lo que es casi el triple de lo que se emitía en el año 2010. Esto plantea que si bien existen medidas de mitigación estas no son suficientes, ya que simplemente se está retrasando el crecimiento en vez de frenarlo. Bajo esta problemática las diferentes aplicaciones del hidrógeno, o más específico el hidrógeno verde pueden llegar a ser una solución. Esto implica grandes inversiones iniciales las cuales se pueden ver justificadas con los beneficios económicos sociales que puede generar un proyecto de este alcance.

Primero se hizo uso de la matriz de Marco Lógico para hacer una planificación general, donde luego se presenta una evaluación técnica y económica social para analizar la implementación del hidrógeno verde en motores de la aeronave A320 para los aeropuertos Andrés Sabella y Diego Aracena. Para eso se consideró un modelo de motor eléctrico y otro híbrido realizando las rutas Andrés Sabella – Chacalluta – Andrés Sabella y Diego Aracena – Chacalluta – Diego Aracena. Según los resultados obtenidos el análisis técnico demuestra que para el modelo eléctrico se requieren 4 motores con 2 celdas de combustible, 11,8 [kg] de H_2 verde para la ruta Andrés Sabella – Chacalluta – Andrés Sabella y 5,1 [kg] para Diego Aracena – Chacalluta – Diego Aracena por motor. Respecto al modelo hibrido los requerimientos son 2 motores con 2 celdas de combustible y las mismas cantidades de H_2 verde por motor. Por otro lado, el análisis económico indicó que para el motor eléctrico se requiere una inversión inicial de 575.009 UF, más costos de almacenamiento de 1.197 UF, transporte de 1850,6 UF y mantención de 143.750 UF que inician a partir del año 2025,

donde los indicadores del VAN y TIR son -70.827 y 5% respectivamente, siendo sensibles a la variación del precio social del CO_2. En cambio, para el motor hibrido se requiere una inversión inicial de 201.254 UF con costos de almacenamiento de 598 UF, transporte de 925,3 UF y mantención de 70.438 UF que inician a partir del año 2025, donde los indicadores del VAN y TIR son 58.894 y 19% respectivamente, siendo menos sensibles que el modelo eléctrico a la variación del precio social del CO_2. El Payback se presentó en el año 2027.

Por lo tanto, se consideró que la implementación del hidrógeno verde en los motores de la aeronave A320-200 para las rutas Andrés Sabella – Chacalluta – Andrés Sabella y Diego Aracena – Chacalluta – Diego Aracena es una estrategia viable y rentable desde el punto de vista social con la utilización de motores híbridos, dado los valores obtenidos del VAN, TIR y sensibilidad a los precios sociales del CO_2.

Abstract

Currently the world is immersed in a climate crisis, where CO_2 emissions are one of the many responsible factors. Chile in 2020 is considered the 46th country in the world ranking and 4th in South America with 88.955 [kt] of CO_2 emissions per year.

In aviation, the scenario is just as worrying, where the levels of CO_2 emissions according to information from the Ministry of the Environment, in 2018 amounted to 3.669 [kt], having an increase of 1.550 [kt], which represents an increase of 46% from the year 2010. Under the assumption of continue at the same rate and without considering any mitigation measures such as biofuels, for example, by the year 2035 the levels of CO_2 emitted would increase to a value of 6.092 [kt], which is almost triple what was emitted in the year 2010. This raises that although there are mitigation measures, these are not enough, because they are simply delaying growth instead of stopping it. Under this problem, the different applications of hydrogen, or more specifically green hydrogen, can become a solution. This implies large initial investments which can be justified by the economic and social benefits that a project of this scope can generate.

First, the Logical Framework matrix was used to do an overall planning, where a technical and social economic evaluation is then presented to analyze the implementation of green hydrogen in the engines of the A320 aircraft for the Andrés Sabella and Diego Aracena airports. For this, an electric motor model and another hybrid model applied to the Airbus 320-200 aircraft were considered, performing the Andrés Sabella – Chacalluta and Diego Aracena – Chacalluta routes. According to the results obtained, the technical analysis shows that for the electric model, 4 engines with 3 fuel cells are required, 18 [kg] of green H_2 for Andrés Sabella – Chacalluta – Andrés Sabella route and 7,2 [kg] for Diego Aracena – Chacalluta – Diego Aracena route, per engine. Regarding the hybrid model, the requirements are 2 engines with 3 fuel cells and the same amounts of green H_2 per engine. On the other hand, the economic analysis indicated that an initial investment of 575.009 UF is required for the electric motor, plus storage costs of 1.197 UF, transportation of 1.850,6 UF and maintenance of 143.750 UF starting in 2025, where the NPV and IRR social indicators are -70.827 and 5% respectively, being sensitive to the variation of the social price of CO_2.

Instead, for the hybrid engine an initial investment of 201.254 UF is required with storage costs of 598 UF, transportation of 925,3 UF and maintenance of 70.438 UF starting in 2025, where the NPV and IRR social indicators are 58.894 and 19% respectively, being less sensitive than the electric model to the variation of the social price of CO_2. The Payback was introduced in the year 2027.

Therefore, it was considered that the implementation of green hydrogen in the engines of the A320 aircraft for Andrés Sabella – Chacalluta – Andrés Sabella and Diego Aracena – Chacalluta – Diego Aracena routes is a viable and profitable strategy from the social the point of view with the use of hybrid engines, given the values obtained from the NPV, social IRR and sensitivity to the social prices of CO_2.

Índice

Contenido

Dedicatoria 2
Resumen 3
Abstract 5
Índice 7
Glosario 9
Introducción 11
Capítulo 1: Antecedentes Generales 14
Justificación del tema 14
Objetivos (Generales y específicos) 18
Metodología 18
Alcance 19
Capítulo 2: Estado del Arte 20
Antecedentes 20
Marco teórico 21
Zona norte de la red aeroportuaria nacional. 21
Aeronave Airbus A320-200 22
Motores turbofán híbridos 23
Celdas de combustible 26
Tipos de combustibles 32
Hidrógeno Gris 33
Hidrógeno Azul 34
Hidrógeno Verde 34
Marco Lógico 36

Indicadores financieros VAN, TIR y Payback. 36
Propuesta metodológica 38
Esquema paso a paso metodología Marco Lógico. 39
Capítulo 3: Desarrollo 40
Análisis de involucrados 40
Árbol de problemas 41
Árbol de objetivos 42
Análisis de alternativas 42
Matriz de Marco Lógico 43
Estructura analítica del proyecto 43
Resumen narrativo del proyecto 44
Indicadores objetivamente verificables 45
Medios de verificación 46
Supuestos 47
Cálculo y análisis 48
Evaluación Técnica 49
Evaluación Económica 57
Capítulo 4: Conclusiones 64
Referencias 68
Anexos 74

Glosario

Carbono neutral: Se refiere a conseguir emisiones de dióxido de carbono netas iguales a cero equilibrando la cantidad de dióxido de carbono liberado a la atmósfera con una cantidad equivalente retirada de la atmósfera.

Convertidor catalítico de CO: Es un componente del motor de combustión interna que sirve para el control y reducción de los gases nocivos expulsados por el motor.

Cogeneración: Procedimiento mediante el cual se obtiene simultáneamente energía eléctrica y energía térmica útil (vapor, agua caliente, etc).

Dióxido de carbono (CO_2): Molécula compuesta por carbono y oxígeno que existe como gas incoloro en condiciones de temperatura y presión estándar. Es considerado un gas de efecto invernadero.

Fuentes fósiles: Energía que se obtiene a partir de combustibles fósiles.

Fuente renovables: Energía que se obtiene a partir de fuentes naturales virtualmente inagotables.

Gas natural: es un hidrocarburo mezcla de gases ligeros de origen natural. Principalmente contiene metano, y a veces un pequeño porcentaje de dióxido de carbono, nitrógeno, ácido sulfhídrico o helio.

Gases de efecto invernadero (GEI): Son gases atmosféricos que absorbe y emite radiación y son los principales actores en el calentamiento global. Los principales GEI en la atmósfera terrestre son el vapor de agua (H_2O), el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4), el óxido nitroso (N_2O) y el ozono (O_3).

Hidrocarburos: Los hidrocarburos son compuestos orgánicos conformados únicamente por átomos de carbono e hidrógeno.

Junta de Aeronáutica Civil (JAC): Es organismo chileno, que depende del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones. Este Gestiona políticas públicas que promuevan el desarrollo del transporte aéreo comercial nacional e internacional.

Kilotoneladas (kt): Unidad de masa, que equivale a mil toneladas métricas.

Metano (CH_4): Es el hidrocarburo alcano más sencillo, cuya fórmula química es CH_4.

Ministerio del Medio Ambiente (MMA): Ministerio del Estado Chileno que se encarga de colaborar con en el diseño y aplicación de políticas, planes y programas en materia ambiental.

Motor TurboFan: Generación de motores de reacción que ha reemplazado a los turborreactores. Lo que hace básicamente es absorber una gran cantidad de aire, lo acelera y lo expulsa por la parte trasera a gran velocidad para proporcionar el empuje al avión.

Monóxido de carbono (CO): Gas carbonosos cuya fórmula química es CO, es un gas incoloro y altamente tóxico. Puede causar la muerte cuando se respira en niveles elevados. Se produce por la combustión deficiente de sustancias como gas, gasolina, queroseno, carbón, petróleo, tabaco o madera.

Reactor catalítico tubular: Equipo diseñado para realizar la reacción de la mezcla de hidrocarburos con vapor de agua.

PEC: Convertidor electrónico de potencia.

ICE: Motor de combustión interna.

EM: Motor eléctrico.

Introducción

Chile es un país que se extiende por el borde occidental de Sudamérica por la costa del océano Pacífico. Tiene un largo de 4.200 km y un ancho de 360 km lo cual lo hace un país donde los medios de transportes tanto por tierra como por aire son de mucha utilidad al momento de tener la necesidad de moverse o mover algo de un lugar a otro, sobre todo por aire si es que se quiere recorrer grandes distancias como desde el norte (Arica) hasta el sur (Punta Arenas). Bajo esta situación Chile puede considerarse un país muy dependiente de los medios de transporte, lo que por supuesto tiene un costo llevar este estilo de vida. Chile el 2020 fue el país número 46 en el ranking mundial de emisiones de dióxido de carbono (CO_2) (Ver anexo 1) y el 4to a nivel sudamericano (Ver anexo 2) (Expansión, Diario Económico Español, 2022).

La posición respecto a otros países podría hacer pensar que no se está en una situación tan crítica, pero ¿cómo han ido evolucionando las emisiones anuales de CO_2 en Chile? En la (Tabla1) se puede distinguir cuanto es a la variación anual en [kt] y la variación anual porcentual entre los años 2010-2020. Lo importante a destacar es que a pesar de que las variaciones anuales disminuyen, las emisiones totales emitidas cada año van en continuo crecimiento.

Tabla 1: Emisiones de CO2 anuales emitidas en el territorio nacional [2010 hasta 2020].

Años	CO2 Totales Kts	Variación anual	Variación Anual %
2010	72.059	----------	----------
2011	78.654	6.595	8,4%
2012	80.842	2.188	2,7%
2013	84.980	4.138	4,9%
2014	78.462	-6.518	-8,3%
2015	84.052	5.590	6,7%
2016	88.523	4.471	5,1%
2017	89.352	829	0,9%
2018	88.955	-397	-0,4%
2019	90.583	1.628	1,8%
2020	84.556	-6.027	-7,1%

Fuente: Elaboración propia en base a información (INE, Instituto Nacional de Estadística de Chile, s.f.).

Dado esto, es válido estar cuestionándose la siguiente pregunta, ¿qué tan grave puede llegar a ser este crecimiento? La ciencia ha advertido que el mundo experimentará una crisis

climática causada por la acción humana a menos de que se tomen medidas a escala global (MinEnergía, Ministerio de Energía, 2020). Para comprender la magnitud y seriedad de la situación, está lo ocurrido en enero del 2018 en el sur de California (CA) cuando en Montecito CA ocurrió una serie de sucesos en cadena (Ver anexo 3) que terminaron ocasionando la muerte de 23 personas y más de 400 hogares dañados. Tanto sequías, olas de calor, incendios, inundaciones, precipitaciones, entre otras catástrofes naturales pueden llegar a producir distintas situaciones de peligros, existen un mayor potencial catastrófico cuando estos se complementan y forman un efecto cascada, que es lo que está ocasionando el cambio climático. (AghaKouchak, y otros, 2020)

Dado esto, países como Australia, Países bajos, Alemania, China, Arabia Saudita y Chile ya están liderando propuestas de proyectos para evitar el cambio climático. Algunos nombres de los proyectos son: Asian Renewable Energy Hub (Australia); NortH2 (Países bajos); AquaVentus (Alemania); Sinopec Xinjiang Kuqa (China); Helios Green Fuels Project (Arabia Saudita); HyEx y Highly Innovative Fuels (HIF) (Chile).

Por otro lado, respecto a la legislación chilena, el 17 de mayo de 2016 se promulgó la Ley de Reciclaje y Responsabilidad Extendida del Productor (REP). Esta consiste en que los fabricantes e importadores de productos prioritarios están en la obligación de recuperar un porcentaje de ellos una vez que terminan su vida útil, en otras palabras, cuando pasan a ser residuos. Adicionalmente obliga a que los productores consideren los costos para el manejo de su producto una vez que pasa a ser residuo, por lo tanto, se considera como un incentivo a producir productos que tengan bajos costos de tratamiento cuando ya no sirven. Estos porcentajes son regulados por el Ministerio del Medio Ambiente de Chile. (Ministerio de Relaciones Exteriores, 2016).

En temática de acuerdos internacionales, uno de los más contingentes al tema es el que entró en vigor el 22 de junio del 2020 es un decreto donde se promulga un acuerdo entre la República de Chile y la República Federal de Alemania para proyectos de: “descarbonización en el sector de energía chileno”. (RR.EE., Ministerio de Relaciones Exteriores (MINREL Min., 2021). En resumen, este tiene como objetivo principal contribuir a la protección del clima y a un desarrollo sostenible en Chile mediante ciertas medidas para la mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Chile será el encargado

de ejecutar los proyectos y Alemania facilitará los recursos humanos, materiales y un financiamiento para el proyecto.

Ya entendiendo un poco la situación que existe en el país, se puede ver una disposición de parte del gobierno sobre este tipo de proyectos o iniciativas de mitigaciones de las emisiones de GEI. Es por esta razón que se han presentado estrategias nacionales y se ha abierto el debate sobre una alternativa que podría ser la solución o una oportunidad de lograr ser cero emisiones, el hidrógeno verde (MinEnergía, Ministerio de Energía, 2020). Lo que nos lleva a cuestionarnos sobre ¿Cuál es el impacto en las emisiones de CO_2 que podría ocasionar una implementación del hidrógeno verde en los motores de la aeronave A320-200? ¿Cuál es el potencial que tiene el hidrógeno verde?, ¿Cuál es el aporte de la industria aeronáutica respecto a las emisiones de CO_2 ?, ¿Es posible de implementar con la tecnología que se tiene actualmente?, ¿Es rentable?

Capítulo 1: Antecedentes Generales

Justificación del tema

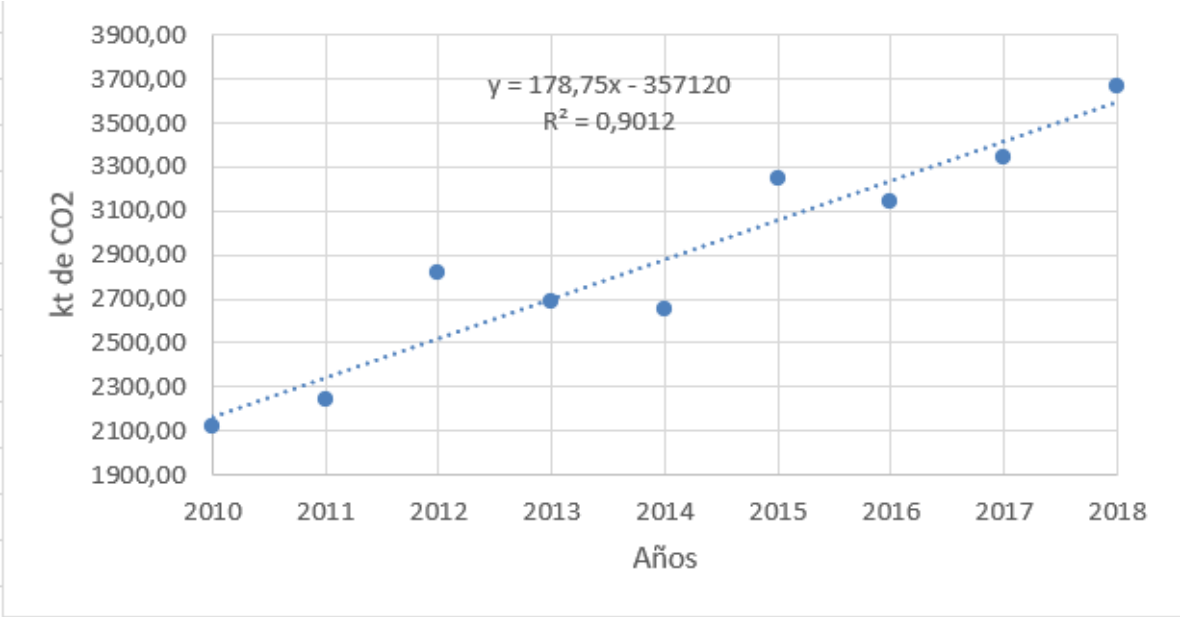
La situación en la industria aeronáutica sobre las emisiones de CO_2, no se aleja mucho de lo que ocurre en Chile, lo cual se ve con bastante claridad en la (Tabla 2) y la (Gráfica 1).

Tabla 2: Emisiones de CO_2 anuales emitidas por la aviación comercial [2010 hasta 2018].

Años	Emisiones de CO2 (kt)	Variación Anual	Variación Anual %
2010	2119,30	-	-
2011	2236,85	117,55	5%
2012	2821,36	584,51	21%
2013	2686,98	-134,38	-5%
2014	2655,52	-31,46	-1%
2015	3250,31	594,79	18%
2016	3140,27	-110,04	-4%
2017	3345,15	204,88	6%
2018	3669,03	323,88	9%
Total	**25924,75**	**1550**	**42%**

Fuente: Elaboración propia en base a datos del Ministerio del Medio Ambiente (MMA, Ministerio del Medio Ambiente, 2020).

Gráfico 1: Emisiones de CO_2 anuales emitidas por la aviación comercial [2010 hasta 2018].



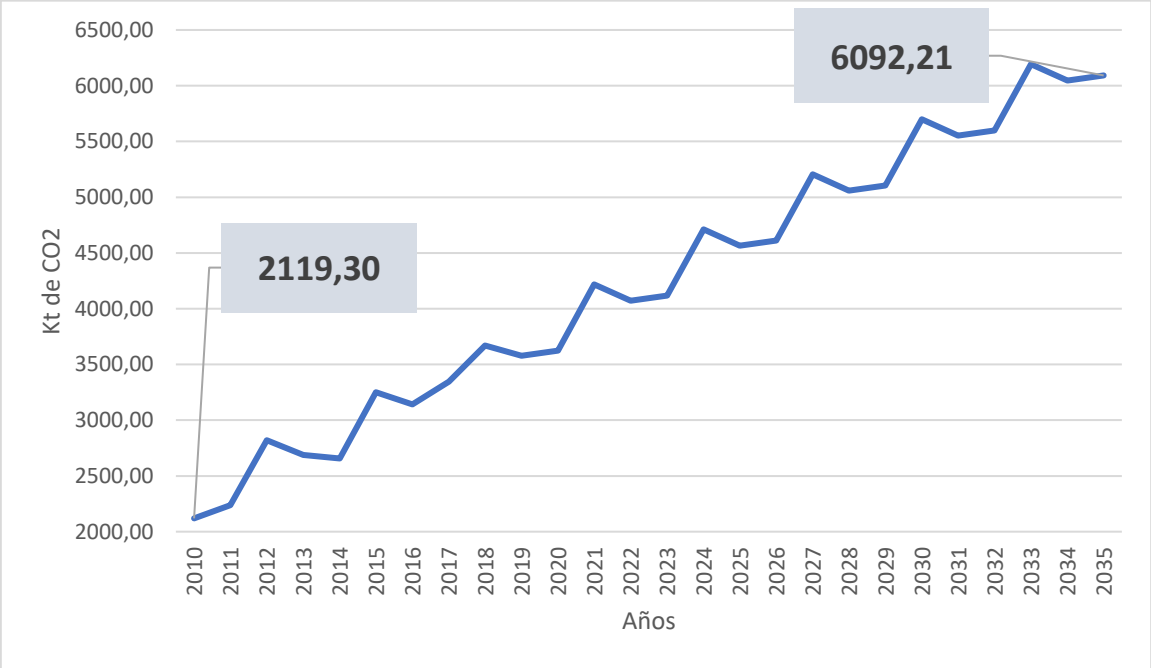
Fuente: Elaboración propia en base a datos del Ministerio del Medio Ambiente (MMA, Ministerio del Medio Ambiente, 2020).

Se pueden distinguir niveles de emisiones variados año a año, donde la tendencia que más se adapta a los datos es la lineal, con un correlación de 0,9012. Por lo tanto, bajo ese escenario se espera que las emisiones de CO_2 vayan aumentando con el pasar de los años. Otra información preocupante que se desprende es que existe un aumento de un 42% desde 2010 al 2018, lo que equivale 1.550 [kt] de CO_2 adicionales aproximadamente. Por último, hay que destacar que en tan solo 8 años estas operaciones han aportado 25.925 [kt] aproximadamente lo que representa un 3% de las emisiones totales del país en ese año, según datos registrados por el Ministerio del Medio Ambiente (MMA, Ministerio del Medio Ambiente, 2020).

Si bien esta es solo la situación respecto al 2018, en el Grafico 2 se presenta una proyección, la cual muestra un acercamiento sobre cómo sería el escenario si se continua con el mismo patrón de emisiones de CO_2 hasta el 2035, sin considerar mitigaciones implementadas post 2018. Los resultados obtenidos muestran que las emisiones para el 2035 serían casi el triple que las del 2010. Es importante dejar en claro que este escenario es sin considerar cualquier tipo de mitigación, como el biocombustible por ejemplo y se omiten los años anormales

2020 y 2021 de pandemia, los cuales han sido beneficiosos para el medio ambiente, debido a que se disminuyen las emisiones por una disminución de operaciones anuales. Al final la pandemia simplemente cumplió un papel de mitigación para retrasar el crecimiento de estas emisiones, por lo que se esperarían los mismos resultados obtenidos en la proyección considerando la pandemia si se proyectara hasta el 2045 o 2050.

Gráfico 2: Emisiones de CO_2 anuales emitidas por las operaciones aeroportuarias nacionales e internacionales en Chile [2010 hasta 2035].



Fuente: Elaboración propia en base a información del Ministerio del Medio Ambiente (MMA, Ministerio del Medio Ambiente, 2020).

Con estos resultados se puede inferir que a pesar de que se han implementado distintas medidas de mitigación a las emisiones de CO_2 (como certificaciones medio ambientales, ley REP, tecnologías de ahorro de combustible, biocombustibles, etc) estas demuestran aún no ser suficientes para poder frenar este crecimiento. En otras palabras, el crecimiento de las emisiones de CO_2 crece con más rapidez, que la implementación de métodos para mitigarlo, ese crecimiento no es sostenible en el mediano ni largo plazo.

Chile es un país que se destaca por su potencial energético en base a fuentes renovables, por el sur con vientos fuertes y constantes predomina lo que es la energía eólica y por el norte

con la radiación solar más alta del planeta, lo que es la energía solar, pero el mayor potencial energético está concentrado en el norte de Chile sobre todo en la región de Antofagasta. Esto según lo expuesto por el DR. Ing Erwin Plett CEO de Low Carbon Chile SpA (Plett, 2021) en una presentación que realizó el 19 de marzo 2021, (Ver Anexo 4).

En conjunto con la radiación más alta del planeta, en el norte se encuentran ya en construcción 2 grandes proyectos de plantas de energía solar. Tenemos primero con un avance del 98% en la comuna de Tocopilla, Antofagasta la planta solar Tamaya con sus 511.000 paneles solares y con un avance de 41% a 12 km de la localidad de María Elena, Antofagasta la planta de Coya con sus 369.432 paneles fotovoltaicos. Según un anuncio de ENGIE Energía Chile se espera que en el 2025 se produzcan 2.000[MW] de energía renovable, que es aproximadamente un 17% del consumo energético anual de la región de Antofagasta. (ENGIE Energía Chile, 2021)

Como la producción del hidrógeno verde se basa en la utilización de energía renovable, dado la alta radiación del norte y los futuros acontecimientos que se esperan, hacen que el norte sea un lugar óptimo para su producción, y si además la utilización es en la misma zona o en las cercanías disminuirían los costos asociados a traslados de este elemento.

Adicionalmente, Chile es parte del Plan de compensación y reducción de carbono para la aviación internacional (CORSIA), que es un conjunto de medidas que promociona la OACI con el objetivo de reducir el impacto climático de la aviación, acompañado de la innovación tecnológica y mejoras en la operación (Organización de aviación civil internacional, OACI, 2021). Dado esto el 8 de junio del 2022 Chile presenta a la OACI su primer plan de acción para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero de la aviación comercial (la ruta verde para Chile, Girolimpio, 2022). Esto nos demuestra que Chile es un país que sí tiene interés en esta área y proyectos o propuestas que tengan como objetivo reducir el impacto climático de la aviación van a ser apoyadas por el país.

Objetivos (Generales y específicos)

Objetivo general: Evaluar técnica y económicamente con un enfoque social la implementación del hidrógeno verde en los motores de la aeronave A320-200 para las rutas Andrés Sabella - Chacalluta – Andrés Sabella y Diego Aracena al mismo destino y con eso poder disminuir las emisiones de CO2.

Objetivos específicos:

1. Proyectar hasta el año 2035 las emisiones de CO_2 emitidas anualmente por la aviación comercial de los aeropuertos Andrés Sabella y Diego Aracena.
2. Identificar los pros y contras del uso del hidrógeno verde.
3. Analizar técnicamente si es posible aplicar H_2 verde en los motores de A320-200 y obtener los requerimientos mínimos para poder realizar las rutas Andrés Sabella – Chacalluta – Andrés Sabella y Diego Aracena al mismo destino.
4. Analizar si es rentable, desde el punto de vista social, de aplicar el H_2 verde en los motores de A320-200 para las rutas Andrés Sabella – Chacalluta – Andrés Sabella y Diego Aracena al mismo destino.

Metodología

La metodología de trabajo propuesta se basará en 6 pasos:

- ★ Levantamiento de información de las emisiones de CO_2 anuales emitidas por la aviación comercial (MMA) y de las operaciones anuales de la red aeroportuaria nacional (JAC).
- ★ Identificar las emisiones de CO_2 de los aeropuertos Andrés Sabella y Diego Aracena en el periodo [2012 – 2018] y proyectar hasta el 2035 con la herramienta de previsión de Excel.
- ★ Realizar una investigación teórica respecto a la metodología del marco lógico, qué es el hidrógeno verde, cómo se funciona su producción, para qué sirve y tecnologías complementarias al estudio.

- ★ Realizar tabla comparativa (Carácter cualitativo) sobre las ventajas y desventajas del hidrógeno verde.
- ★ Proponer una estrategia donde se utilice el hidrógeno verde en los motores de aeronaves A320-200.
- ★ Realizar un estudio técnico de los requerimientos que se necesitan para aplicar esta estrategia en las rutas Andrés Sabella – Chacalluta – Andrés Sabella y Diego Aracena - Chacalluta.
- ★ Estimar los flujos de cajas para poder calcular indicadores económicos (VAN Social, TIR Social y Payback).
- ★ Conclusiones sobre la implementación del hidrógeno verde en los motores de aeronaves A320-200 para las rutas Andrés Sabella – Chacalluta – Andrés Sabella y Diego Aracena al mismo destino.

Alcance

El presente estudio tendrá los siguientes tipos de alcances:

- Descriptivo, debido a que se estudiará en base a la recolección de información con la mayor precisión posible del uso del hidrógeno verde. Ya teniendo esta base se complementará con estudios recientes sobre las distintas propuestas que están empezando a surgir para la industria aeronáutica en general.
- Geográfico, dado que el estudio se sitúa en los aeropuertos de la zona norte de la red primaria de Chile por su potencial energético en base a fuentes renovables.
- Temporal debido a que la evaluación cubre un horizonte de 13 años (2022 – 2035). Incluye información desde el año 2010 hasta el año 2018.

Capítulo 2: Estado del Arte

Para poder llevar a cabo este trabajo es necesario entender conceptos como Marco Lógico, aeropuertos Andrés Sabella y Diego Aracena los cuales son parte de la red aeroportuaria nacional, tipos de combustibles, hidrógenos, entre otros, que ayudarán a mejorar la comprensión del trabajo. Ya en conocimiento de estos, se abordará un primer acercamiento de evaluación mediante la matriz de marco lógico para luego poder realizar una evaluación técnica y económica desde el punto de vista social y con ello, llegar a una conclusión que podrá dar una solución a la problemática planteada.

Antecedentes

El hidrógeno es la sustancia más abundante del planeta, además de ser el más ligero y simple de la tabla periódica, su producción no es algo nuevo, pero este históricamente ha sido producido usando combustibles fósiles que emiten GEI. Existen distintos procesos para producirlo uno de ellos es a través de la electrólisis que, en palabras simples, consiste en aplicar energía eléctrica a las moléculas del Agua (H_2O) para romper los enlaces y separar el oxígeno del hidrógeno. Cuando esta energía eléctrica viene de fuentes renovables, es cuando el hidrógeno recibe el apellido de verde.

El hidrógeno verde tiene aplicaciones tanto como combustible, vector energético, generador de calor, entre otros usos, (Ver anexo 5). Uno de los beneficios a destacar es que en su proceso no existe ningún tipo de emisiones de CO_2 a diferencia de la producción de hidrógeno convencional, es más este solo libera oxígeno en su producción y en el proceso inverso (unir los hidrógenos y el oxígeno) energía, calor y agua. Pero una de sus mayores desventajas es su costo de producción actual, el cual no es competitivo con la forma convencional de producirlo. (Comisión Desafios del Futuro, Ciencia, Tecnología e Innovación, Comisión de Minería y Energía , 2021).

Esto no termina aquí, la necesidad de volverse verde y ser sostenible en el tiempo ha impulsado a distintas iniciativas que muestra como la producción de hidrógeno verde puede llegar a tener un costo de producción que sea competitivo y además que Chile puede llegar

a tener el costo nivelado más bajo del mundo para el 2030. (MinEnergía, Ministerio de Energía, 2020).

Hoy en día hay proyectos que ya ven como una opción implementar el hidrógeno verde en el mundo de la aviación, como es el caso del proyecto de aeronaves ZeroE de Airbus (Sergi Alcalde, 2020) o el mismo aeropuerto de Santiago de Chile, “El transporte aéreo es uno de los más contaminantes del planeta. Con este anuncio, las líneas aéreas que operen en Chile podrán usar hidrógeno verde. Así tanto el transporte de pasajeros como de carga que se hace a través de ellos por el planeta será más amigable con el medioambiente" (Juan Carlos Jobet, 2021). Por lo que, veremos distintos puntos abordar para poder llevar a cabo una gestión sobre la planificación de la evaluación del uso del hidrógeno verde en las principales operaciones de la zona norte de la red aeroportuaria nacional, a través del uso de la metodología de marco lógico.

Esto puede ser una oportunidad para varias industrias de incluir en sus servicios un sello verde y apuntar hacia un futuro más sustentable. La industria aeronáutica es una de las tantas que podría entrar en esta descripción, donde al no haber una regulación muy clara sobre la cantidad de emisiones de CO_2 que se pueden emitir o que no existe ningún tipo de limitación o sanción asociada a un máximo de emisiones de CO_2 permitidas.

Marco teórico

Zona norte de la red aeroportuaria nacional.

El aeropuerto Andrés Sabella y Diego Aracena forman parte de la zona norte de la red aeroportuaria nacional (Dirección General de Aeronáutica Civil, DGAC, 2019), la cual se compone de los siguientes aeródromos y aeropuertos:

- Aeropuerto Chacalluta (Arica)
- Aeropuerto Diego Aracena (Iquique)
- Aeropuerto Andrés Sabella (Antofagasta)
- Aeropuerto El Loa (Calama)
- Aeródromo Desierto de Atacama (Caldera)
- Aeródromo Vallenar (Vallenar)

Con la ayuda de la información que brinda la Junta de Aeronáutica Civil (JAC, Junta de Aeronáutica Civil , [2012-2018]) se pudo obtener cuantas operaciones anuales tiene cada aeropuerto o aeródromo ya mencionado desde el año 2012 al 2018 (Ver anexo 6). Con ella se logra identificar las operaciones aéreas en los aeropuertos Diego Aracena y Andrés Sabella que concentraron un total de 187.901 y 168.249 operaciones entre el 2012 y el 2018 respectivamente. Luego junto con la base de datos brindada por el Ministerio de Medio Ambiente (MMA, Ministerio del Medio Ambiente, 2020) mediante una proporción se logra estimar la cantidad de emisiones de CO_2 que emitieron estos 2 aeropuertos ya mencionados. (Anexo 7).

Ya con esta información, se procede a realizar una proyección de cuáles serían las emisiones en [kt] futuras hasta el 2035, mediante la herramienta de Excel previsión. Estas se aprecian en (Anexo 8).

Aeronave Airbus A320-200

El Airbus A320 es un avión civil de pasajeros de la compañía fabricante y diseñadora de aeronaves Airbus. Este posee 2 motores de propulsión a combustión y fue diseñado para realizar vuelos de corto a medio alcance. También fue el primer modelo de aeronave comercial con mandos electrónicos fly-by-wire, lo que permite que el piloto controle las partes móviles del avión a través del uso de impulsos electrónicos en vez de mediante palancas y sistemas hidráulicos (Wikipedia , 2022). Esta aeronave posee distintas características generales según su Weight Variant, algunas de ellas se especifican en la siguiente tabla:

Tabla características modelo A320 - 200 según su Weight Variant

Aircraft Characteristics					
	WV000	WV001	WV002	WV003	WV004
Maximum Ramp Weight (MRW) Maximum Taxi Weight (MTW)	73 900 kg (162 922 lb)	68 400 kg (150 796 lb)	70 400 kg (155 205 lb)	75 900 kg (167 331 lb)	71 900 kg (158 512 lb)
Maximum Take-Off Weight (MTOW)	73 500 kg (162 040 lb)	68 000 kg (149 914 lb)	70 000 kg (154 324 lb)	75 500 kg (166 449 lb)	71 500 kg (157 630 lb)
Maximum Landing Weight (MLW)	64 500 kg (142 198 lb)	64 500 kg (142 198 lb)	64 500 kg (142 198 lb)	64 500 kg (142 198 lb)	64 500 kg (142 198 lb)
Maximum Zero Fuel Weight (MZFW)	60 500 kg (133 380 lb)	60 500 kg (133 380 lb)	60 500 kg (133 380 lb)	60 500 kg (133 380 lb)	60 500 kg (133 380 lb)

Fuente: Airbus A320 Aircraft characteristics airport and maintenance planning.

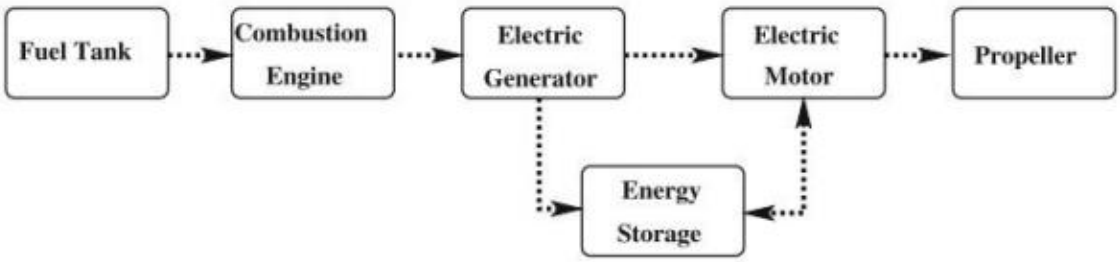
Motores turbofán híbridos

Los motores turbofán híbridos se basan en el principio de la propulsión híbrida eléctrica (HEP). Estos son turbofán convencionales que combinan la potencia de motores eléctricos con los de combustión, permitiendo extraer menos energía mecánica de la turbina, y por ende menos consumo de combustible, por eso son considerados como una alternativa para reducir el impacto ambiental que generan los aviones en cada operación (Rendón, R, M, & Anzai, 2021).

Existen 5 tipo de modelos para aplicar la HEP: híbrido en serie, híbrido en paralelo, híbrido en serie/paralelo, híbrido turbo eléctrico y totalmente eléctrico.

Híbrido en serie

Esquema 1: Arquitectura híbrida en serie.

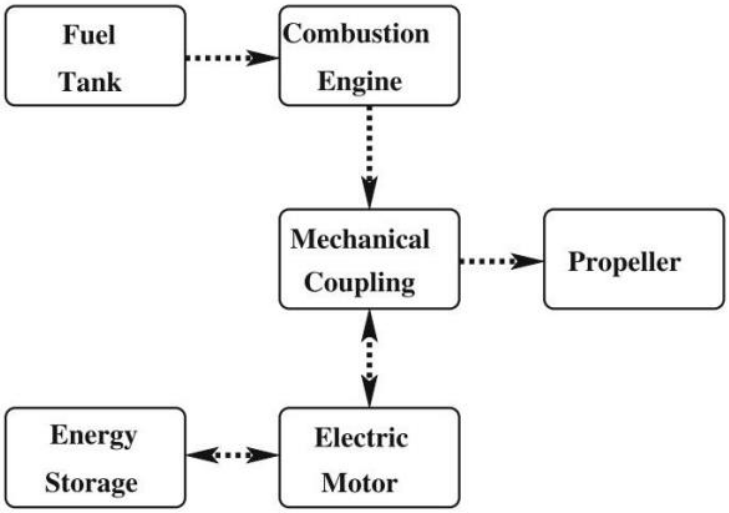


Fuente: (Rendón, R, M, & Anzai, 2021)

En este modelo solo los motores eléctricos (EM) van conectados a la hélice. Mientras que el motor de combustión interna (ICE) impulsa el generador eléctrico (PEC), el cual puede impulsar el EM o cargar las baterías con ayuda del mismo EM. Por lo tanto, la energía proviene de la combustión y de la batería (Energy Storage).

Híbrido en paralelo

Esquema 2: Arquitectura híbrida en paralelo.

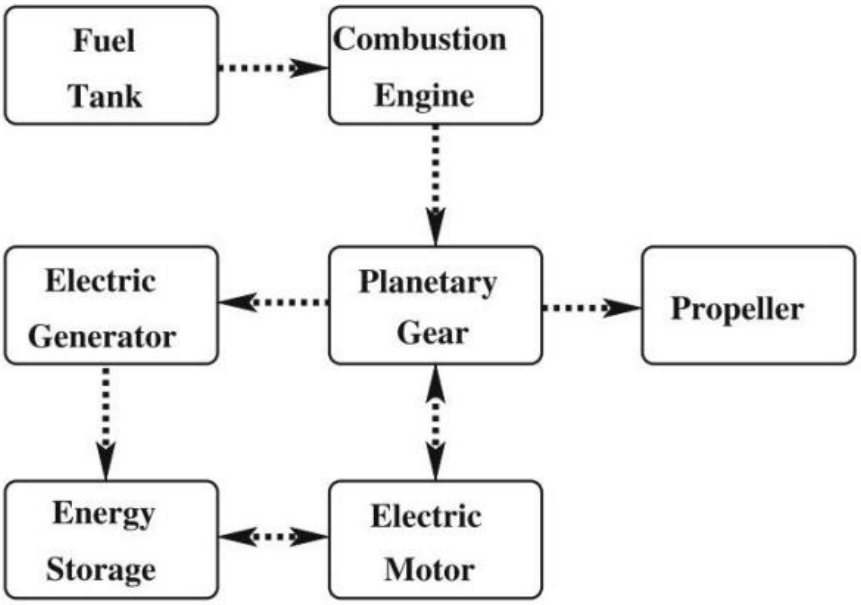


Fuente: (Rendón, R, M, & Anzai, 2021)

En este modelo hay dos ejes de propulsión paralelos, los cuales están alimentados por combustión y fuentes eléctricas. Los EM e ICE están acoplados a un eje (Mechanical Coupling) que impulsa la hélice y permite que uno o ambos puedan generar propulsión. También esta arquitectura permite cargar las baterías, cuando el ICE impulsa la hélice, en ese caso el EM funciona como un generador eléctrico.

Híbrido en serie/paralelo

Esquema 3: Arquitectura híbrida en serie/paralelo.

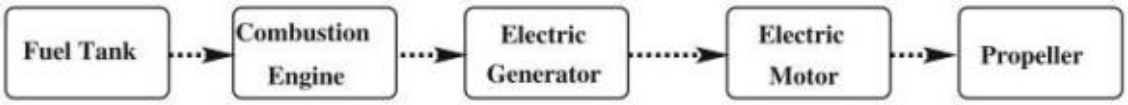


Fuente: (Rendón, R, M, & Anzai, 2021)

Este modelo toma la arquitectura en serie y la combina con la paralela, donde el ICE, EM, generador eléctrico y la hélice están conectados mecánicamente a través de un acoplamiento (Planetary Gear). Así, la potencia mecánica del ICE puede ser utilizada para accionar la hélice o convertirla en energía eléctrica a través de un generador para cargar las baterías.

Híbrido turbo eléctrico

Esquema 4: Arquitectura híbrida turbo eléctrico.



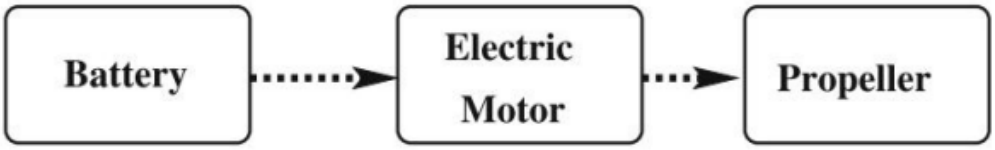
Fuente: (Rendón, R, M, & Anzai, 2021)

Este modelo aplica el mismo concepto que en serie con la diferencia que no depende de baterías que ayuden a mover el motor eléctrico y generar propulsión. En esta arquitectura el ICE impulsa el generador eléctrico y el PEC es el encargado de darle potencia al EM, para

finalmente este último mueva la hélice, por lo tanto, toda la energía proviene de la combustión y no posee dispositivos de almacenamiento de energía.

Totalmente eléctrico

Esquema 5: Arquitectura totalmente eléctrica.



Fuente: (Rendón, R, M, & Anzai, 2021)

Este modelo emplea baterías como única fuente de propulsión, a diferencia de las otras arquitecturas donde existía combustión en algún punto de la generación de energía. Si bien es una idea bastante tentadora para dejar atrás la combustión, tiene el principal problema de que se necesitarían varías baterías lo que aumentaría el peso de la aeronave generando que sea inviable de ocupar en la mayoría estas.

Celdas de combustible

Las celdas de combustibles (Fuel Cells) puede ser una solución tecnológica para disminuir la dependencia actual que se tiene respecto a los combustibles fósiles y al mismo tiempo ayudar al medio ambiente disminuyendo las emisiones de CO_2 que son contaminantes para la atmósfera.

Si se quisiera definir de manera exacta que es un Fuel Cell podría ser como “dispositivos electroquímicos que convierten la energía química de los reactivos directamente en electricidad y calor con alta eficiencia. En otras palabras, una celda de combustible es simplemente un dispositivo de conversión de energía para la generación de energía” (Alaswad, Palumbo, & A.G.Olabi, 2016). Cuando se ocupa el hidrógeno como energía química para este dispositivo, también existe liberación de agua como subproducto del proceso.

Este dispositivo tiene la posibilidad de combinarse con un sistema regenerativo (RCF: Regenerative Fuel Cell System) el cual, permite convertir energía eléctrica en combustible

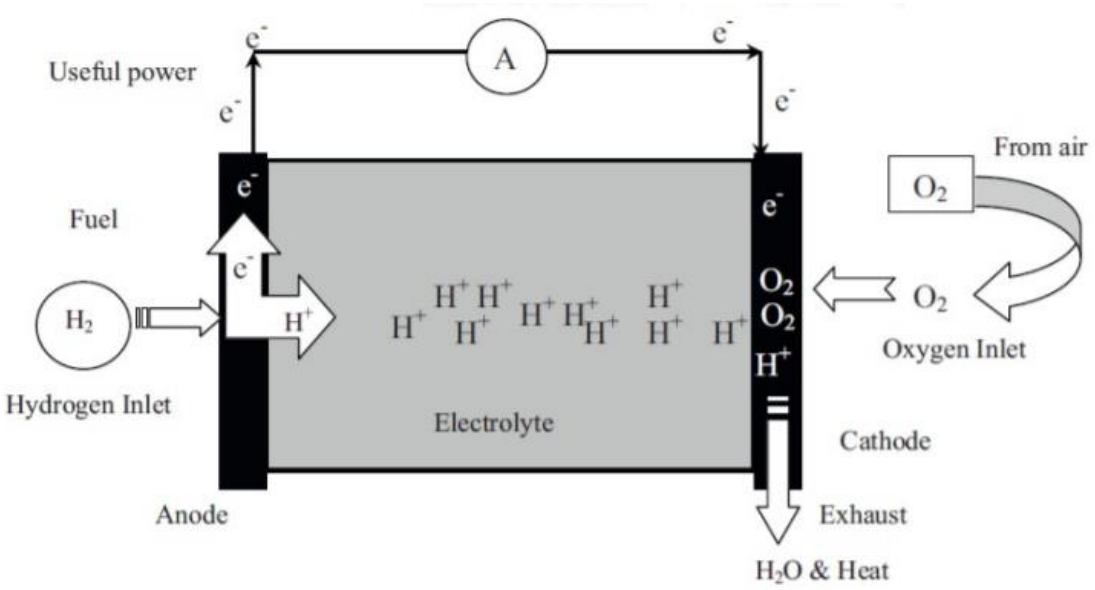
almacenable y luego utilizar el mismo combustibles para proporcionar electricidad cuando se necesite (Smith, 2000). Este sistema apunta a utilizar el hidrógeno como combustible y medio de almacenamiento de energía, la cual se puede obtener mediante el proceso ya mencionado en el punto anterior. (Electrólisis del agua). La clave para que ambos sistemas funcionen de una manera eficaz va en separar los procesos de almacenamiento de energía, de la conversión de esta (Ver anexo 11) y (Ver anexo 12).

Funcionamiento general de la Fuel Cell.

Una Fuel Cell está constituida por un electrolito intercalado entre 2 electrolitos; el electrolito es una membrana conductora de protones, el combustible para su funcionamiento es el hidrógeno y el oxidante es el oxígeno.

Una Fuel Cell requiere fundamentalmente 4 componentes esenciales (Stambouli, 2011)

1. Un ánodo, poroso (o permeable) que permita la entrada del combustible y el contacto con el electrolito sin ser consumido o corroído. Dispersa el gas de hidrógeno de manera uniforme sobre toda su superficie y conduce los electrones liberados desde la molécula de hidrógeno para ser utilizado como energía útil en el circuito externo.
2. Un cátodo, que permita el contacto entre el oxidante con el electrolito sin ser consumido o corroído por sí mismo. Distribuye el oxígeno alimentando su superficie y conduciendo los electrones de vuelta desde el circuito externo dónde pueden recombinarse con los iones de oxígeno, pasando a través del electrolito e hidrógeno para formar agua.
3. Un electrolito, que funciona como conductor de iones positivos y negativos. El electrolito (ácido fosfórico, óxido sólido o un polímero apropiado) determina la temperatura de operación de la Fuel Cell, evita que los electrodos entren en contacto. Permite el flujo de iones cargados de un electrodo a otro manteniendo el balance de carga. Puede ser un conductor de iones de oxígeno o un conductor de iones de hidrógeno (protones), la principal diferencia entre estos dos tipos es el lado en el que se produce agua en la FC: el lado oxidante de la FC conductor de protones y el lado del combustible conducto de iones de oxígeno.
4. Cable de interconexión de O_2.



Fuente: Conductor de protón de Hidrógeno (Cifuentes, 2017)

Tipos de Fuel Cell.

Existen distintos tipos de Fuel cell según su temperatura de funcionamiento, eficiencia, aplicaciones y costos. Estas se clasifican en función de la elección de combustible y electrolito en 6 grupos:

- Alkaline fuel cell (AFC)
- Phosphoric acid fuel cell (PAFC)
- Solid oxide fuel cell (SOFC)
- Molten carbonate fuel cell (MCFC)
- Proton exchange membrane fuel cell (PEMFC)
- Direct methanol fuel cell (DMFC)

Alkaline fuel cell (AFC)

El AFC genera energía eléctrica mediante la utilización de electrolitos alcalinos. Los AFC generalmente funcionan a temperaturas entre 60 y 90◦C; sin embargo, los diseños recientes pueden operar a bajas temperaturas entre 23 y 70◦C. Los AFC se clasifican como combustibles a baja temperatura de funcionamiento celdas con catalizadores de bajo costo. El catalizador más común para acelerar reacciones electroquímicas en el lado del cátodo y del ánodo en este tipo de la pila de combustible es níquel. La eficiencia eléctrica de los AFC

es de aproximadamente el 60% y la eficiencia de la cogeneración es superior al 80%. Pueden generar electricidad hasta 20 kW.

Phosphoric acid fuel cell (PAFC)

Las pilas de combustible de ácido fosfórico (PAFC) utilizan electrodos de papel carbón y electrolito de ácido fosfórico líquido (H3PO4). PAFC no requiere oxígeno puro para su funcionamiento ya que el CO2 no afecta el electrolito o el rendimiento de la celda. El costo inicial es alto ya que PAFC usa aire con 21% de oxígeno en lugar de oxígeno puro resultando en una reducción de 3 veces en la densidad del oxígeno corriente. Los sistemas PAFC tienen una capacidad hasta 200 kW y existen sistemas con mayores capacidades (11 MW). Los PAFC son costosos de fabricar debido a la necesidad de un catalizador de platino finamente disperso que recubre los electrodos. La eficiencia eléctrica de este tipo de pilas de combustible se encuentra entre 40 y 50% y eficiencia de cogeneración alrededor del 85%. Se utilizan normalmente para aplicaciones estacionarias en el lugar.

Solid oxide fuel cell (SOFC)

Las pilas de combustible de óxido sólido (SOFC) son pilas de combustible de alta temperatura con electrolito cerámico sólido de óxido metálico. El oxígeno se oxida en la reacción de reducción en el cátodo (electrodo de aire) a 1000 ◦C, mientras que la oxidación del combustible ocurre en el ánodo. Las SOFC están diseñadas para la generación de energía distribuida a gran escala con sistemas con capacidad de cientos de MW. El subproducto el calor se usa generalmente para generar más electricidad girando turbinas de gas y, por lo tanto, aumenta la eficiencia de la cogeneración entre un 70 y un 80%. Los sistemas SOFC son confiables y adaptables al combustible con bajos Emisiones de gases nocivos (NOx y SOx). Pueden considerarse como sistemas locales de generación de energía para áreas rurales sin acceso a redes públicas. Además, tienen un funcionamiento sin ruido y bajo costos de mantenimiento. Por otro lado, tiempos de puesta en marcha y enfriamiento prolongados también ya que varios problemas de compatibilidad mecánica y química limitan la uso de SOFC.

Molten carbonate fuel cell (MCFC)

Las pilas de combustible de carbonato fundido (MCFC) son celdas de combustible de alta temperatura. Usan una mezcla de sales de carbonato fundido como electrolito. Los MCFC se emplean actualmente para centrales eléctricas de gas natural y carbón en aplicaciones de servicios eléctricos, industriales y militares. Las ventajas y desventajas de los MCFC están estrechamente relacionado con su alta temperatura de funcionamiento. MCFC puede ser directamente alimentado con hidrógeno, monóxido de carbono, gas natural y propano. No requieren catalizadores de metales nobles para aplicaciones electroquímicas. Oxidación y reducción. Tampoco requieren ninguna infraestructura desarrollo para instalación; sin embargo, se necesita mucho tiempo para alcanzar la temperatura de funcionamiento y la generación de energía.

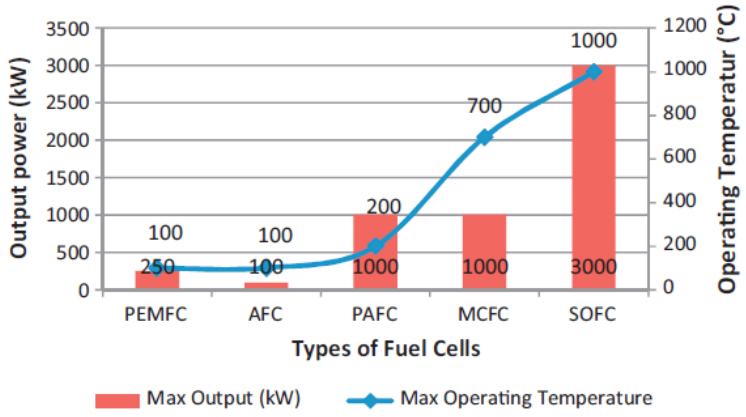
Proton exchange membrane fuel cell (PEMFC)

En las PEMFC, el hidrógeno se activa mediante un catalizador para formar un ion protón y expulsar un electrón en el ánodo. El protón pasa a través de la membrana mientras que el electrón se ve obligado a fluir hacia el circuito externo y generar electricidad. Luego, el electrón fluye de regreso al cátodo e interactúa con el oxígeno y el ion protón para formar agua. Las PEMFC son pilas de combustible de baja temperatura con una temperatura de funcionamiento entre 60 y 100 ◦C. Son sistemas compactos de peso ligero con un proceso de puesta en marcha rápido. El sellado de electrodos en PEMFC es más fácil que otros tipos de pilas de combustible debido a la solidez del electrolito. Además, tienen una vida útil más larga y son más baratos de fabricar. Desde el punto de vista de la eficiencia, cuanto mayor sea la temperatura de trabajo, mayor eficiencia se puede obtener. Esto se debe a la mayor velocidad de reacción con un máximo de 100 ◦C. La eficiencia eléctrica de los PEMFC está entre el 40 y el 50% y la potencia de salida puede alcanzar los 250 kW. Los sistemas PEMFC se utilizan generalmente en aplicaciones portátiles y estacionarias. Sin embargo, entre las aplicaciones de los PEMFC, el transporte parece ser la más adecuada, ya que proporcionan un suministro continuo de energía eléctrica con un alto nivel de eficiencia y densidad de potencia. También requieren un mantenimiento mínimo porque no hay partes móviles en las pilas de generación de energía de las celdas de combustible. Los vehículos de pila de combustible son la aplicación más prometedora de los sistemas PEMFC.

Direct methanol fuel cell (DMFC)

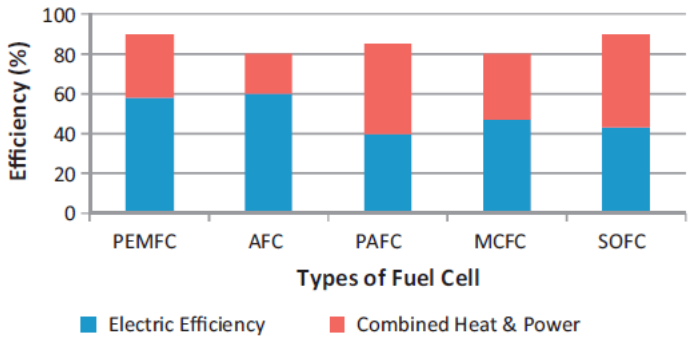
La pila de combustible de metanol directo (DMFC) se promociona como tipo de PEMFC. Es una fuente de energía adecuada para fines de energía portátil debido a su funcionamiento a baja temperatura, su larga vida útil y las características del sistema de reabastecimiento de combustible rápido. Además, no necesitan recargarse y se abordan como fuente de energía renovable limpia. Este opera entre 60 y 200 ◦C, con una potencia de salida entre 0,001 y 100 kW. Su eficiencia ronda por el 40% y la eficiencia de cogeneración alrededor del 80%. Su uso más común es como remplazo de baterías en móviles, computadoras y otros dispositivos portátiles.

Gráfico 3: Comparación de la temperatura máxima de funcionamiento de la celda de combustible frente a la potencia de salida.



Fuente: (Mekhilef, Saidur, & Safari, 2011)

Gráfico 4: Eficiencia de diferentes tipos de celdas de combustible.



Fuente: (Mekhilef, Saidur, & Safari, 2011)

Tipos de combustibles

Como se comenta al inicio, el hidrógeno verde ha sido incluido dentro de las estrategias nacionales como una posible solución para llegar a ser un país carbono neutral. Pero la producción de hidrógeno es algo que ya se realiza en distintas industrias, entonces ¿qué es lo nuevo que se ve en este tipo de hidrógeno? Es importante dejar en claro que si bien existen varios usos del hidrógeno (Anexo 5), este estudio se enfocará solo en la aplicación a los motores de los aviones.

El hidrógeno tiene la gran ventaja de ser cero emisiones de CO_2 en el proceso de combustión, además de tener la mayor cantidad de energía por unidad de masa frente a otros combustibles como el diésel, gas natural y la gasolina. Esta ventaja en comparación con otros combustibles es contrarrestada por la baja densidad por unidad de volumen que se necesita, en otras palabras, se necesita mucho más espacio para almacenar 1 [kg] de H_2 que 1 [kg] de algún combustible. Por esta razón se requiere almacenar el hidrógeno a altas presiones para que ocupe el mismo o menor espacio que los combustibles (Comisión Desafios del Futuro, Ciencia, Tecnología e Innovación, Comisión de Minería y Energía , 2021). Cabe destacar que si bien el hidrógeno en general no contamina en la combustión este si lo hace en su proceso productivo (hidrógeno gris). Estos valores se pueden visualizar en las siguientes tablas:

Combustibles [Unidad]	**Valor energético del combustible [kWh/Unidad]**	**Equivalencia energética 1 [kg] H2**
H2 Verde [kg]	**33,3**	**1**
Diésel [lt]	**10,2**	**2,8**
Gasolina [lt]	**9,6**	**2,78**
Gas Natural [m3]	**9,6**	**3,5**

Fuente: Elaboración propia con información de (Comisión Desafios del Futuro, Ciencia, Tecnología e Innovación, Comisión de Minería y Energía , 2021)

Combustibles [Unidad]	Emisiones [Kg CO_2/Unidad]
H_2 Verde [kg]	**0**
Diésel [lt]	**3,18**
Gasolina [lt]	**2,38**
Gas Natural [m^3]	**1,97**

Fuente: Elaboración propia en base a (SÁEZ, 2020)

Ya estando en conocimiento de las características del hidrógeno verde y su comparación con otros combustibles, es importante poder diferenciar los principales tipos de hidrógenos que existen, estos son gris, azul y verde, los cuales se diferencian en su proceso productivo.

Hidrógeno Gris

El hidrógeno gris es el que se obtiene a partir de fuentes fósiles, principalmente de un proceso que se conoce como "steam reforming" o por su traducción al español "reformado de vapor de gas natural". Actualmente este es el que más se utiliza debido a sus bajos costos de producción (7USD por 277,78 [kWh]) y su posibilidad de alcanzar eficiencias mayores (Kalamaras & Efstathiou, 2013). El método requiere de ciertas materias primas, las principales son el gas natural, hidrocarburos más ligeros, el metanol y otros hidrocarburos oxigenados. Estos reaccionan de la siguiente manera:

$C_mH_n + mH_2O\ (g)\ \rightarrow mCO + (m + 0{,}5n)H_2$ [1]
$C_mH_n + 2mH_2O\ (g)\ \rightarrow mCO_2 + (2m + 0{,}5n)H_2$ [2]
$CO + H_2O\ (g)\ \rightarrow CO_2 + H_2$ [3]

El proceso consta de 2 etapas. En la primera la materia prima de hidrocarburos se mezcla con vapor el cual se alimenta de un reactor catalítico tubular. El resultado de este proceso es gas de síntesis que es una mezcla de gas hidrógeno (H_2) con monóxido de carbono (CO) ([1] y [2]). En la segunda etapa el gas de síntesis es llevado a un convertidor catalítico de CO, donde el gas de síntesis es convertido en dióxido de carbono (CO_2) e hidrógeno (H_2). (Kalamaras & Efstathiou, 2013)

Sin embargo, el más utilizado es el que ocupa el gas natural y el metano (CH_4) como materia prima (Vásquez, Salinas, & GmbH, 2019), el cual tiene el siguiente proceso:

$$CH_4 + H_2O\ (g)\ \rightarrow CO + 3H_2$$
$$CO + H_2O\ (g)\ \rightarrow CO_2 + H_2$$

Si bien esta es una de las formas más eficientes de producir hidrógeno, tiene la desventaja de aumentar la cantidad de GEI presente en la atmosfera.

Hidrógeno Azul

El hidrógeno azul es el que se obtiene mediante fuentes fósiles. Generalmente usando el gas natural y se lleva a cabo un proceso para obtener H_2 y CO_2. Por lo que, se aplica el mismo procedimiento del hidrógeno gris con la diferencia que las emisiones que son contaminantes son capturadas y reutilizadas para que no llegue a la atmosfera (Ver anexo 9). Ese proceso es conocido como uso y almacenamiento de captura de carbono lo que implica mayores costos que el hidrógeno gris asociados a la reutilización y almacenaje del CO_2, pero se considera un proceso carbono neutral.

Hidrógeno Verde

El hidrógeno verde es el que se obtiene mediante la energía eléctrica a partir de fuentes renovables en un proceso llamado electrólisis del agua. En este, la producción de hidrógeno se lleva a cabo sin emitir emisiones de CO_2, liberando solamente oxígeno a la atmosfera, por lo que es considerado un proceso ecológicamente limpio. El oxígeno producido puede ser liberado u ocupado en otros procesos industriales. Cabe destacar que solo aproximadamente el 4% del hidrógeno en todo el mundo se produce mediante este proceso. (Kalamaras & Efstathiou, 2013)

Proceso productivo del hidrógeno verde

La electrólisis del agua o su descomposición en hidrógeno y oxígeno es un método bien conocido que comenzó a usarse comercialmente ya en 1890. Este se realiza a temperatura ambiente y consiste en un proceso en el que una corriente continua pasa a través de dos

electrodos en una solución de agua provocando como resultado la ruptura de los enlaces químicos presentes en la molécula de agua, dando como resultado hidrógeno y oxígeno como muestra la siguiente expresión química:

Cátodo: $2H_2O(l) + 2e^- \rightarrow H_2(g) + 2OH^-(aq)$ [1]
Ánodo: $4OH^-(aq) \rightarrow O_2\,(g) + 2H_2O(l) + 4e^-$ [2]
Resumen: $2H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2$ [3]

El electrolito que comúnmente se utiliza en la electrólisis del agua es el ácido sulfúrico, y los electrodos son de platino (Pt), ya que no reaccionan con el ácido sulfúrico. El problema de este es que, en comparación con los métodos descritos anteriormente, la electrólisis es una tecnología que requiere grandes cantidades de energía (entre 55 y 60 [kWh]), por ende, la producción en masa no justifica la inmensa cantidad de energía gastada. Dentro de las principales fuentes renovables que se pueden ocupar para este método en Chile está la energía eólica y la solar (Anexo 4).

Según la descripción de los hidrógenos mencionados anteriormente se pueden desprender los ciertos beneficios y desventajas respecto al uso del hidrógeno verde:

Tabla comparativa Ventajas vs Desventajas del uso del hidrógeno verde.

Desventajas	Desventajas
Proceso que no aporta en el aumento de emisiones de CO_2.	Costos elevados de producción (8 USD por 33,3 [kWh] v/s los 7 USD por 277,78 [kWh] del hidrógeno gris o azul).
Materia prima disponible y fácil de conseguir.	Menos eficientes que otras formas de producción de hidrógeno.
Procedimiento menos complejo que los otros.	Gasto de energía eléctrica injustificada.
Es sustentable en el largo plazo.	Requiere un alto potencial de energías renovables.

Marco Lógico

Esta metodología es una herramienta de gestión que ayuda a la planificación, ejecución y evaluación de un proyecto. Para este estudio se utilizará con el fin de facilitar la evaluación técnica y económica social, identificando un propósito, meta y estrategia respecto a la integración del hidrógeno verde en los motores de aeronaves. Esta se aborda siguiendo los 10 pasos que será mencionados y explicados más adelante en la propuesta metodológica (Betancourt, 2017), donde su último paso "Monitoreo y evaluación del proyecto", se cambiará por "Cálculos y Análisis" para adaptarlo mejor al objetivo del trabajo.

Indicadores financieros VAN, TIR y Payback.

En general en los proyectos se ocupan indicadores financieros que permite poder analizar la posible rentabilidad de un proyecto y sobre todo si este es viable antes de realizar una inversión inicial. Cuando se invierte uno espera mínimo poder recuperar la inversión, pero también se puede obtener una ganancia a lo largo de los años. Los 2 más usados son el VAN (Valor Actual Neto) y el TIR (Tasa Interna de Retorno). (GONZÁLEZ, 2021), pero de todas formas existe un tercer indicador llamado Payback.

Valor Actual Neto (VAN): También llamado Valor Presente Neto (VPN), es la diferencia entre el valor presente de los ingresos futuros que percibirá una empresa y la cantidad que invierte para sacar adelante un proyecto. Si el resultado de esta operación es positivo el proyecto es rentable y si es negativo este no lo será. (Villacorta, 2021) Adicionalmente existe una extensión llamada VAN Social donde se incluyen junto a los costos monetarios cuantificaciones de beneficios o costos sociales del proyecto.

Tasa Interna de Retornos (TIR): Calcula la tasa de retorno (rentabilidad) que generará una inversión. En otras palabras, arroja el valor de ganancia o pérdida que tendrá un proyecto para todas las partes involucradas en porcentaje. Está muy ligado al VAN, pues también se define como el valor de la tasa de descuento que hace posible que el Valor Actual Neto sea igual a cero. (Villacorta, 2021). Al igual que en el VAN existe una TIR social que incluye lo mismo que el VAN social.

Payback: Es una herramienta financiera de valoración de inversiones que permite determinar el plazo que demorará una empresa en recuperar el capital que invertirá en un

proyecto. Considera que una inversión es más rentable que otra basándose solo en el argumento de cuál permitirá recuperar antes los recursos invertidos.

Propuesta metodológica

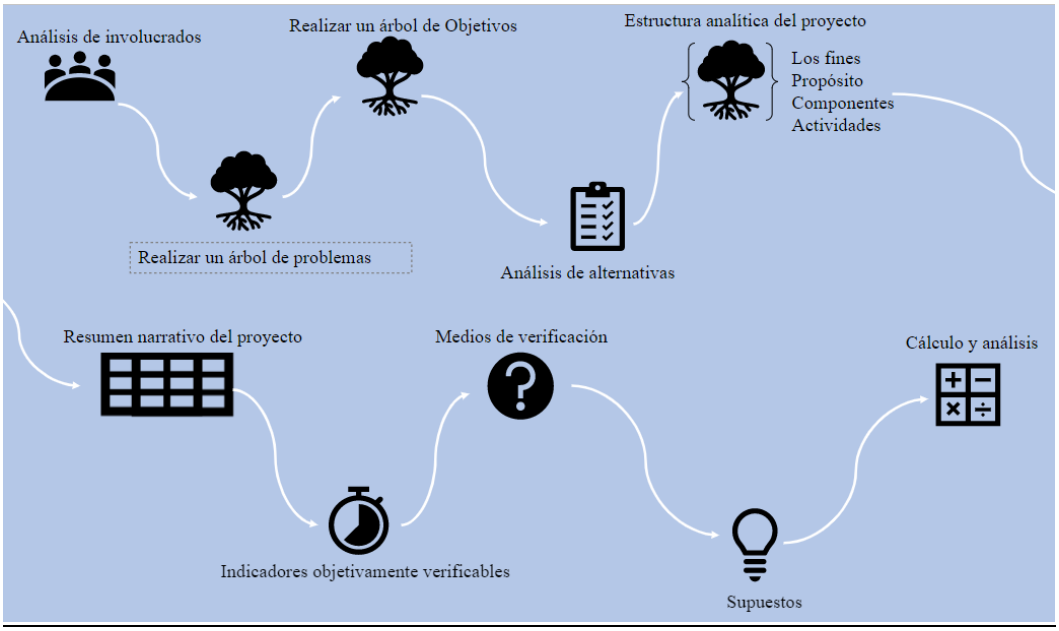
La problemática planteada, será abordada mediante una evaluación técnica y económica social, donde la metodología del marco lógico apoyará en la planificación de esta evaluación con el fin de formular conclusiones y recomendaciones que ayudarán a tener una mejor visión sobre la aplicación del hidrógeno verde en los motores de aeronaves A320 – 200.

La metodología consiste en 10 etapas:

1. Análisis de involucrados: Se identificarán cuales son los actores que son afectados por este proyecto, ya sea de forma directa o indirecta, junto con sus intereses, expectativas y necesidades, con el fin de generar estrategias para cada uno.
2. Realizar un árbol de problemas: Se representará de forma esquemática la problemática planteada ubicando las causas en las raíces, el problema en el tronco y los efectos en las hojas.
3. Realizar un árbol de Objetivos: Se transformará el árbol de problemas pasar de una situación negativa a un estado positivo, convirtiendo las causas en medios para afrontar la problemática, los efectos en las metas y la problemática pasa a ser el propósito.
4. Análisis de alternativas: Se tomarán los medios definidos en el árbol de objetivos y se definirá una estrategia que podría dar solución a la situación problemática.
5. Estructura analítica del proyecto: Se tomará el trabajo del árbol de problemas, objetivos y el análisis de alternativas para esquematizar la relación entre estas en niveles jerárquicos a través de una estructura analítica de proyecto (EAP). Esta incluye 4 niveles: Actividades o Acciones, Componentes o Resultados, Propósito y Los fines, en ese orden.
6. Resumen narrativo del proyecto: Se ordenan los niveles de la EAP en una matriz de Marco Lógico (Ver Anexo 10)
7. Indicadores objetivamente verificables: Se definirá indicadores que den a conocer el progreso del estudio de prefactibilidad social como segunda columna de la matriz de Marco Lógico.

8. Medios de verificación: Se definirá dónde o cómo se obtendrán los datos e información para realizar los indicadores como tercera columna de la matriz de Marco Lógico.
9. Supuestos: Se definirán las condiciones o escenarios de variables no controlables que podrían afectar en los resultados con el fin de simplificar la evaluación. Cuarta columna de la matriz de Marco Lógico.
10. Cálculo y análisis: Se calcularán e interpretarán los indicadores junto con un análisis de sensibilidad de precios.

Esquema paso a paso metodología Marco Lógico.



Fuente: Elaboración propia en base a información (Betancourt, 2017).

Capítulo 3: Desarrollo

Análisis de involucrados

Para la implementación del hidrógeno verde es importante poder identificar a los distintos actores que se ven involucrados en un proyecto como este.

Airbus y Boeing: Son compañías que se enfocan en diseñar, fabricar y vender aeronave, helicópteros, brindar servicio técnico entre otros. Ellos son los principales proveedores de las aerolíneas, que se enfocan en ir mejorando las tecnologías para poder diseñar mejores aeronaves, más rentables y seguras según los requerimientos que van solicitando sus clientes y la autoridad.

Aeropuertos: Infraestructura diseñada para poder brindar un servicio de embarque, desembarque de pasajeros y carga que estén interesados en viajar largas distancia en tiempos no tan extensos. Esta infraestructura es el medio que utilizan las aerolíneas para poder trasladar a los pasajeros o carga a distintos puntos, por lo tanto, es importante mantener una buena relación, además de tener los requisitos básicos para una operación segura, que se adapten y apoyen a las nuevas tecnologías de las aeronaves.

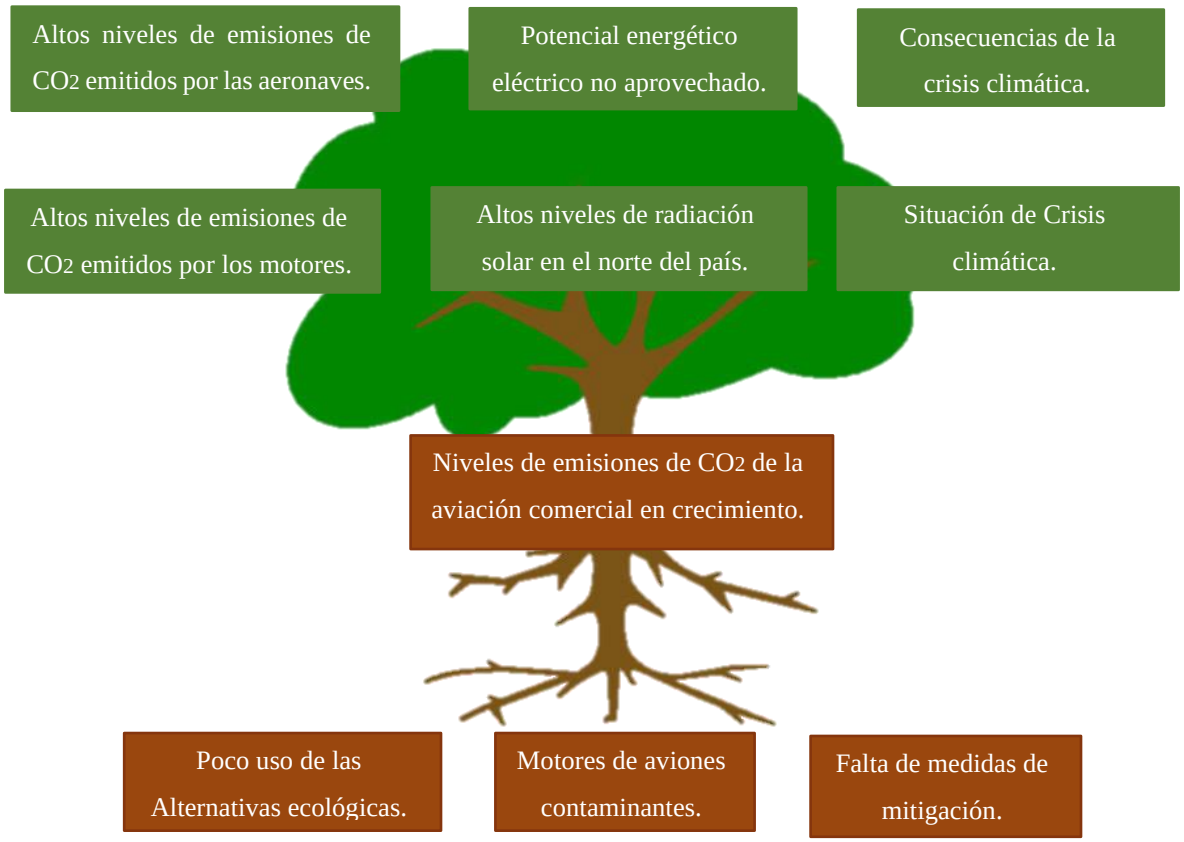
Aerolíneas: Compañías que brindan el servicio, mediante sus activos (aviones), de mover personas o carga a distintos puntos del mundo. También como se mencionó antes es importante que exista una buena relación con los aeropuertos, que la aerolínea cumpla con las normas que se especifiquen en cada aeropuerto y así mantener una operación segura. Adicionalmente las aeronaves y tripulaciones también deben ser certificadas de acorde a las exigencias del aeropuerto.

Bencineras: Empresa distribuidora de combustible para distintos vehículos. Como los motores son de combustión, estas son la principal fuente de abastecimiento de combustible para poder realizar sus vuelos.

Con estos 4 actores se puede llegar al siguiente análisis, la implementación del hidrógeno verde como combustible lleva consigo, en primer lugar, un impacto hacia los productores (Airbus y Boeing) ya que son los que deben diseñar un motor hibrido que permita el uso de

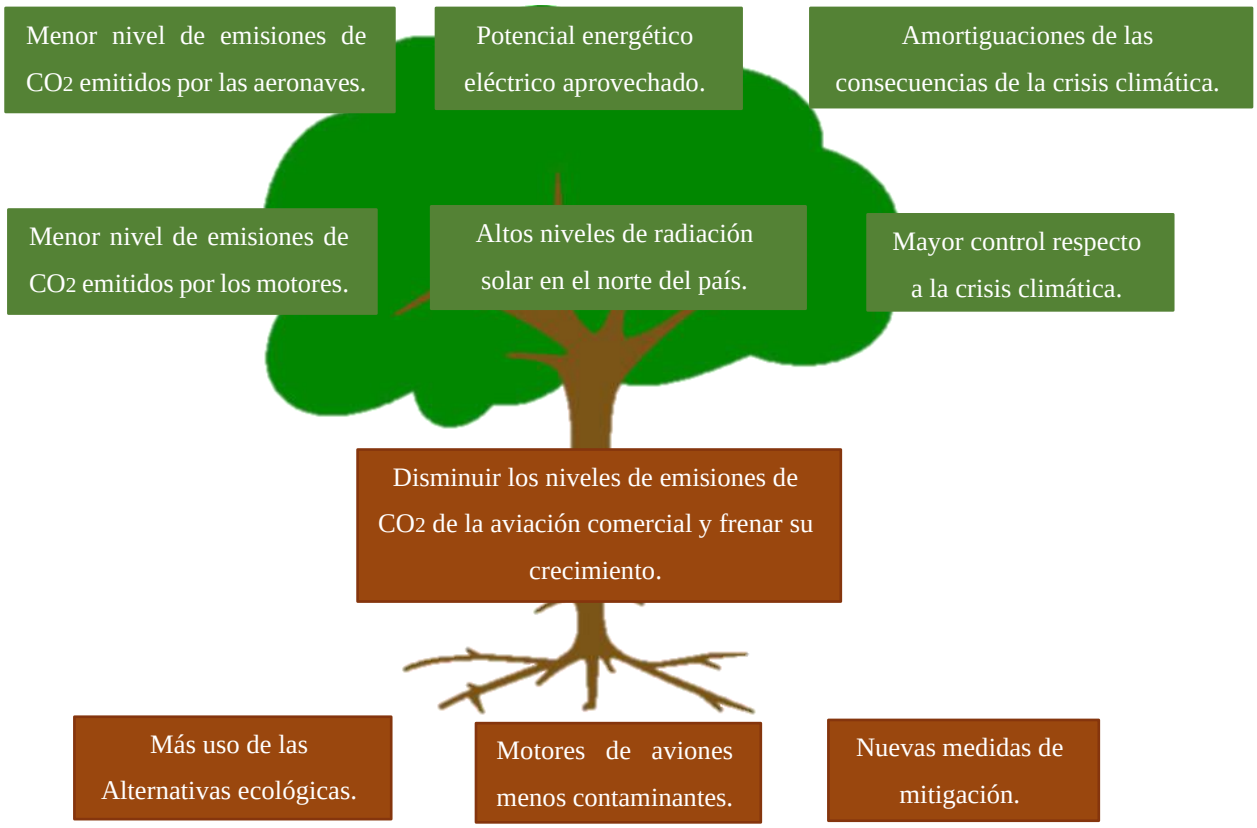
combustible fósil y energía eléctrica a través de hidrógeno verde, certificar la aeronave y probar su funcionamiento. Una vez diseñado la aeronave en general son las aerolíneas las que encargan estos aviones, lo que implica que deben certificar a su tripulación para poder volar este nuevo modelo. Después vienen los aeropuertos, los cuales, deben disponer de instalaciones y maquinaria para almacenar y trasladar el hidrógeno, además de realizar capacitaciones para el personal que se va a encargar de esta operación. Finalmente, las bencineras tendrán que adaptarse a ser distribuidoras de hidrógeno verde o simplemente afrontar que tendrá menos demanda de combustible fósil con la llegada de estos modelos.

Árbol de problemas



Fuente: Elaboración propia.

Árbol de objetivos



Fuente: Elaboración propia.

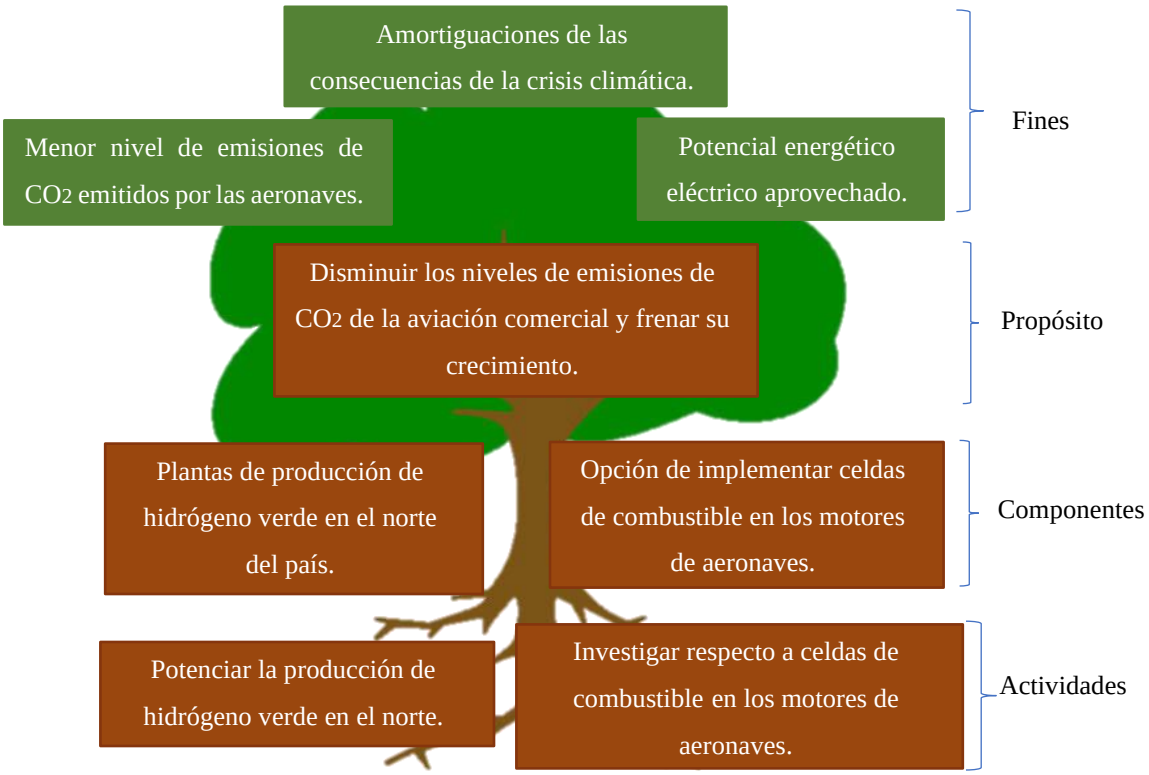
Análisis de alternativas

Analizando los puntos del árbol de objetivos, se propone plantear la siguiente estrategia para lograr el propósito "Disminuir los niveles de emisiones de CO_2 de la aviación comercial y frenar su crecimiento." y llegar a las metas de "Menor nivel de emisiones de CO_2 emitidos por aeronaves", "Potencial energético aprovechado" y "amortiguaciones de las consecuencias de la crisis climática": Implementar un modelo de motor que ocupe hidrógeno verde en la producción de su energía eléctrica. Esto procura que disminuya el nivel de emisiones emitidas de CO_2 por las aeronaves ya que, el motor sería capaz de dar potencia a la aeronave ocupando 2 fuentes distintas de propulsión una parte con hidrógeno verde y otra con combustible fósil. Como la potencia no viene de una sola fuente, esto permite reducir el consumo de combustible y suplirlo con la energía eléctrica a través de una celda de

combustible que logra transformar el hidrógeno verde. Para lograr eso se necesita aprovechar el potencial energético que existe en el norte para la producción de hidrógeno verde. Logrando como efecto final disminuir las emisiones de CO_2 a la atmosfera que emiten las aeronaves en sus operaciones diarias, aprovechar un potencial energético disponible y amortiguar las consecuencias de la crisis climática.

Matriz de Marco Lógico

Estructura analítica del proyecto



Resumen narrativo del proyecto

	Resumen narrativo	Indicadores		
Fin	▪ Menor nivel de emisiones de CO2 emitidos por las aeronaves. ▪ Amortiguaciones de las consecuencias de la crisis climática. ▪ Potencial energético eléctrico renovable aprovechado.			
Propósito	▪ Disminuir los niveles de emisiones de CO2 de la aviación comercial y frenar su crecimiento.			
Componentes	▪ Plantas de producción de hidrógeno verde en el norte del país. ▪ Opción de implementar celdas de combustible en los motores de aeronaves.			
Actividades	▪ Potenciar la producción de hidrógeno verde en el norte. ▪ Investigar respecto a celdas de combustible.			

Indicadores objetivamente verificables

	Resumen narrativo	Indicadores		
Fin	▪ Menor nivel de emisiones de CO2 emitidos por las aeronaves. ▪ Amortiguaciones de las consecuencias de la crisis climática. ▪ Potencial energético eléctrico renovable aprovechado.	▪ Disminución de los Niveles de CO2 por aeronave. ▪ Menos consecuencias de la crisis climática. ▪ Mayor uso de energía eléctrica renovable.		
Propósito	▪ Disminuir los niveles de emisiones de CO2 de la aviación comercial y frenar su crecimiento.	▪ Disminución de los niveles de CO2 en los aeropuertos.		
Componentes	▪ Plantas de producción de hidrógeno verde en el norte del país. ▪ Opción de implementar celdas de combustible en los motores de aeronaves.	▪ Construcción de una planta de hidrógeno verde en el norte de Chile. ▪ Primer modelo de aeronave con celdas de combustible en los motores.		
Actividades	▪ Potenciar la producción de hidrógeno verde en el norte. ▪ Investigar respecto a celdas de combustible.	▪ Inicio de producción de hidrógeno verde en el norte. ▪ Inicio y aumento de investigaciones respecto al uso de celdas de combustibles en los motores de aeronaves.		

Medios de verificación

	Resumen narrativo	Indicadores	Medios de verificación	
Fin	▪ Menor nivel de emisiones de CO2 emitidos por las aeronaves. ▪ Amortiguaciones de las consecuencias de la crisis climática. ▪ Potencial energético eléctrico renovable aprovechado.	▪ Disminución de los Niveles de CO2 por aeronave. ▪ Menos consecuencias de la crisis climática. ▪ Mayor uso de energía eléctrica renovable.	▪ Informe de los niveles anuales de emisiones del MMA. ▪ Informe del anuales de anomalías climáticas. ▪ Reporte del MinEnergía.	
Propósito	▪ Disminuir los niveles de emisiones de CO2 de la aviación comercial y frenar su crecimiento.	▪ Disminución de los niveles de CO2 en los aeropuertos.	▪ Informe de los niveles anuales de emisiones del MMA.	
Componentes	▪ Plantas de producción de hidrógeno verde en el norte del país. ▪ Opción de implementar celdas de combustible en los motores de aeronaves.	▪ Construcción de una planta de hidrógeno verde en el norte de Chile. ▪ Primer modelo de aeronave con celdas de combustible en los motores.	▪ Anuncio de proyecto de parte del MOP y MMA. ▪ Anuncio de los productores de aeronaves	
Actividades	▪ Potenciar la producción de hidrógeno verde en el norte. ▪ Investigar respecto a celdas de combustible.	▪ Inicio de producción de hidrógeno verde en el norte. ▪ Inicio y aumento de investigaciones respecto al uso de celdas de combustibles en los motores de aeronaves.	▪ Anuncio del MMA. ▪ Anuncio e informes de avance de los productores de aeronaves.	

Supuestos

	Resumen narrativo	Indicadores	Medios de verificación	Supuestos
Fin	▪ Menor nivel de emisiones de CO2 emitidos por las aeronaves. ▪ Amortiguaciones de las consecuencias de la crisis climática. ▪ Potencial energético eléctrico renovable aprovechado.	▪ Disminución de los Niveles de CO2 por aeronave. ▪ Menos consecuencias de la crisis climática. ▪ Mayor uso de energía eléctrica renovable.	▪ Informe de los niveles anuales de emisiones del MMA. ▪ Informe del anuales de anomalías climáticas. ▪ Reporte del MinEnergía.	No se considera la situación de pandemia. Informes considerando año base 2018. Proyección 2035 sin considerar ninguna mitigación implementada post 2018.
Propósito	▪ Disminuir los niveles de emisiones de CO2 de la aviación comercial y frenar su crecimiento.	▪ Disminución de los niveles de CO2 en los aeropuertos.	▪ Informe de los niveles anuales de emisiones del MMA.	Caso aplicado al aeropuerto Andrés Sabella y Diego Aracena.
Componentes	▪ Plantas de producción de hidrógeno verde en el norte del país. ▪ Opción de implementar celdas de combustible en los motores de aeronaves.	▪ Construcción de una planta de hidrógeno verde en el norte de Chile. ▪ Primer modelo de aeronave con celdas de combustible en los motores.	▪ Anuncio de proyecto de parte del MOP y MMA. ▪ Anuncio de los productores de aeronaves	Este proyecto tanto de la planta como de la celda iniciarían el 2025.
Actividades	▪ Potenciar la producción de hidrógeno verde en el norte. ▪ Investigar respecto a celdas de combustible.	▪ Inicio de producción de hidrógeno verde en el norte. ▪ Inicio y aumento de investigaciones respecto al uso de celdas de combustibles en los motores de aeronaves.	▪ Anuncio del MMA. ▪ Anuncio e informes de avance de los productores de aeronaves.	La producción de hidrógeno verde iniciaría el 2025. Las investigaciones ya se están realizando en el año base.

Cálculo y análisis

Ya con la matriz de Marco lógico completa se procede a realizar los cálculos y análisis pertinentes para esto se ocupará 2 herramientas: una evaluación Técnica y otra económica desde el punto de vista social con el fin de evaluar la prefactibilidad social de la estrategia de implementar un modelo de motor que ocupe hidrógeno verde en la producción de su energía eléctrica.

Primero tomaremos la siguiente consideración para los cálculos: Respecto a los aeropuertos Diego Aracena y Andrés Sabella son los que concentran la mayor cantidad de operaciones de la zona norte de la red aeroportuaria nacional, 187.901 y 168.249 respectivamente, desde el año 2012 al 2018 (Ver anexo 6). Ya teniendo eso en claro, se procede a estimar las emisiones de CO_2 que emiten desde el 2012 hasta el 2018. Esta estimación se obtuvo cruzando los datos de las operaciones anuales de la Junta de Aeronáutica Civil (JAC, Junta de Aeronáutica Civil , [2012-2018]) con la base de datos de emisiones de CO_2 correspondiente a las operaciones nacionales e internacionales brindada por el Ministerio de Medio Ambiente (MMA, Ministerio del Medio Ambiente, 2020). Se considera que las operaciones anuales de todos los aeropuertos y aeródromos corresponden al total de emisiones y mediante una proporción se logra llegar a un aproximado de las emisiones en [kt] de cada aeropuerto las cuales se pueden ver en (Anexo 7).

Ya teniendo esta información, se procede a realizar una proyección de cuáles serían las emisiones en [kt] futuras hasta el 2035, mediante la herramienta de Excel previsión. Estas se aprecian en (Anexo 8). Esta información será más relevante más adelante para la estimación de costos sociales para el análisis económico social.

Evaluación Técnica

En este punto, se analizará la estrategia: Implementar un modelo de motor que ocupe hidrógeno verde en la producción de su energía eléctrica. Para eso se elige un tipo de celda de combustible para aplicarlo en 2 modelos de motores uno completamente eléctrico y el otro mitad eléctrico y a combustión (híbrido). Después se estimará el empuje mínimo que necesita la aeronave A320 – 200 en 3 fases del vuelo (Despegue, Crucero, Aproximación-Aterrizaje). Se considerará 2 vuelos uno que sale desde el aeropuerto Andrés Sabella (Antofagasta) hacia Chacalluta (Arica) y otro desde Diego Aracena (Iquique) hasta el mismo destino. Finalmente se podrá ver las condiciones que se requieren, como empuje mínimo, cantidad de celdas de combustible, kg de hidrógeno, entre otras necesarias para el normal funcionamiento de la aeronave.

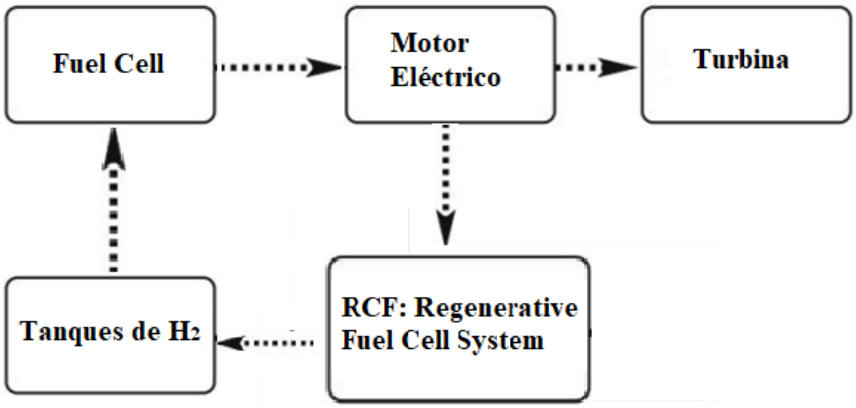
Elección de la celda de combustible:

En el marco teórico se mencionan varios tipos de fuel cell con sus distintas características y usos recomendados. Apoyándose en esa información se decide que la Proton Exchange membrana fuel cell (PEMFC) es la más conveniente para ser aplicada en este caso. Si bien esta no es la que produce la mayor cantidad de energía (250 [kW]) comparado con la Solid oxide fuel cell (SOFC) (3000 [kW]), pero tiene otras particularidades que también pesan en la elección, como que no necesita grandes temperaturas (100°C) a diferencia de las SOFC que requieren 1000°C. Son ligeras, de costo bajo y una gran vida útil en comparación a las otras fuel cell. Adicionalmente estas son capaces de brindar un suministro continuo de energía eléctrica con un alto nivel de eficiencia y densidad de potencia.

Motor Eléctrico:

La propuesta del funcionamiento de este motor es que toda la energía eléctrica que se ocupe sea de una celda de combustible con un sistema regenerativo conectado al motor eléctrico. Entonces el nuevo esquema del funcionamiento se vería así:

Esquema 6: Propuesta arquitectura totalmente eléctrica.

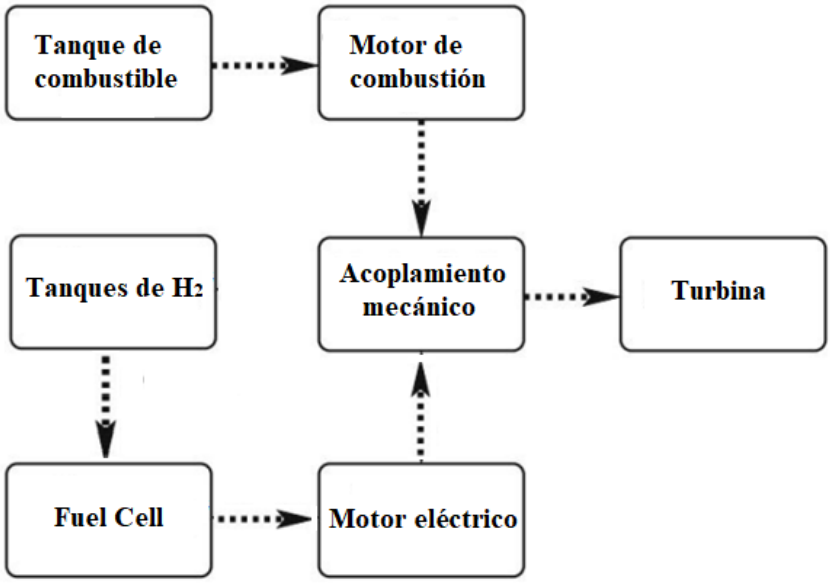


Fuente: Elaboración propia en base a (Rendón, R, M, & Anzai, 2021).

Motor Hibrido en paralelo:

La propuesta del funcionamiento de este motor es que la mitad de la potencia de la turbina se genera por energía eléctrica a través de una celda de combustible y la otra por un sistema de combustión. Entonces el nuevo esquema del funcionamiento se vería así:

Esquema 7: Propuesta arquitectura motor hibrido en paralelo.



.

Fuente: Elaboración propia en base a (Rendón, R, M, & Anzai, 2021).

Estimación del Thrush del A320-200:

Para la estimación del empuje mínimo de la fase de despegue, crucero y aproximación-aterrizaje, se necesitará plantear algunos supuestos:

General:

Para cada fase se plantea un motor eléctrico y uno hibrido en paralelo turbo fan donde el fan suministra aproximadamente el 80% del empuje del motor (Potter, 2022). Para el primero se asume que todo el empuje es proporcionado por el motor eléctrico y en el segundo la mitad del empuje lo proporciona un motor de combustión. Se consideran 2 rutas Andrés Sabella - Chacalluta con una distancia de 304,7 [km] los que se reparten 30 [km] para el despegue, 244,7 para crucero y 30 [km] de aterrizaje. Respecto a la otra ruta, Diego Aracena - Chacalluta la distancia es de 131 [km] los que se reparten 15 [km] para el despegue, 101 [km] para crucero y 15 [km] para la aproximación-aterrizaje.

Despegue:

Las 4 principales fuerzas (Thrust, Drag, Lift y Weight) tienen condiciones. El empuje debe ser mayor a la resistencia dado que la aeronave está acelerando y el peso menor a la sustentación para que la aeronave pueda elevarse. También se considerará los siguientes datos:

- Masa= 75.000[Kg]
- El diseño alar es tal que produce un Lift/Drag = 16
- Lift es un 25% más que el Weight.
- Thrust es un 20% más que el Drag.
- Aceleración de gravedad = 10 [m/s]
- Newton metro (Nm) = Newton * metro
- 1 Newton metro = $2{,}8*10^{-7}$ [kWh] aproximadamente
- Distancia de despegue ruta Andrés Sabella - Chacalluta = 30 [km]
- Distancia de despegue ruta Diego Aracena - Chacalluta = 15 [km]
- Cada celda brinda 250 [kWh] de potencia
- 1 [kg] H_2 tiene un valor energético de 33,3 [kWh]

Cálculos:

$$Weight \ = \ 75.000[Kg] \times \ 10 \ [m/s] \ = \ 750.000 \ [N]$$

$$Lift \ = 750.000[N] \times (1 + 0{,}25) = \ 937.500 \ [N] \ = \ 16 \ Drag$$

$$Drag \ = \ 58.593{,}75 \ [N] \times (1 + 0{,}2) = Thrust$$

$$Thrust\ total \ = \ 70.312{,}5 \ [N]$$

$$Thrust\ Fan \ = \ 70.312{,}5 \ [N] \times 0{,}8 = 56.250[N]$$

Para la situación en que la potencia viene solo de un motor eléctrico, se consideran 4 motores donde cada uno debería brindar un mínimo empuje de 3.515,625[N], dado que el fan suministra los 56.250 [N] restantes.

Entonces:

Ruta Andrés Sabella – Chacalluta - Andrés Sabella requerirá:

$$3.515{,}625 \ [N] \ \times 2 \ \times 30 \ [km] \times \frac{1000[m]}{1[km]} \ = \ 210.937.500 \ [Nm]$$

$$210.937.500 \ [Nm] \ \times \ 2{,}8 \times 10^{-7}[kWh] \ = \ 58{,}5937 \ [kWh]$$

Ruta Diego Aracena – Chacalluta – Diego Aracena requerirá:

$$3.515{,}625 \ [N] \ \times 2 \ \times \ 15 \ [km] \times \frac{1000[m]}{1[km]} \ = \ 105.468.750 \ [Nm]$$

$$105.468.750 \ [Nm] \ \times \ 2{,}8 \times 10^{-7}[kWh] \ = \ 29{,}2969 \ [kWh]$$

Por otro lado, para la situación en que la potencia es proporcionada una parte por el motor eléctrico y la otra mitad por un motor de combustión, se consideran 2 motores donde cada uno debería brindar un mínimo empuje de 7.031,25 [N]. Asumiendo que el motor a combustión genera 3.515,625 [N] entonces el motor eléctrico debe generar la misma cantidad para cumplir con el empuje mínimo. Por lo tanto, el motor eléctrico debe generar las mismas cantidad de [kWh] que en la primera situación.

Crucero:

Las 4 principales fuerzas están en equilibrio (Thrust = Drag y Lift = Weight) dado que la aeronave mantiene una velocidad constante. También se considerará los siguientes datos:

- Masa= 72.000[Kg]
- El diseño alar es tal que produce un Lift/Drag = 16
- Aceleración de gravedad = 10 [m/s]
- Newton metro (Nm) = Newton * metro
- 1 Newton metro = $2{,}8*10^{-7}$ [kWh] aproximadamente
- Distancia de vuelo crucero desde Andrés Sabella hasta Chacalluta = 244,7 [km]
- Distancia de vuelo crucero desde Diego Aracena hasta Chacalluta = 101 [km]
- Cada celda brinda 250 [kWh] de potencia
- 1 [kg] H_2 tiene un valor energético de 33,3 [kWh]

Cálculos:

$$Weight \ = \ 72.000[Kg] \times \ 10 \ [m/s] \ = \ 720.000 \ [N]$$

$$Lift \ = \ 720.000 \ [N] \ = \ 16 \ Drag$$

$$Drag \ = \ 45.000 \ [N]$$

$$Thrust \ Total \ = \ 45.000 \ [N]$$

$$Thrust \ Fan = \ 45.000 \ [N] \times 0{,}8 = 36.000 \ [N]$$

Para la situación en que la potencia viene solo de un motor eléctrico, se consideran 4 motores donde cada uno debería brindar un mínimo empuje de 2.250 [N], dado que el fan suministra los 36.000 [N] restantes.

Entonces:

Ruta Andrés Sabella – Chacalluta – Andrés Sabella requerirá:

$$2.250 \ [N] \ \times 2 \times 244{,}7 \ [km] \times \frac{1000[m]}{1[km]} \ = \ 1.101.150.000 \ [Nm]$$

$$1.101.150.000 \ [Nm] \ \times \ 2{,}8 \times 10^{-7}[kWh] \ = \ 305{,}88 \ [kWh]$$

Ruta Diego Aracena - Chacalluta – Diego Aracena requerirá:

$$2.250\ [N]\ \times 2 \times\ 101\ [km] \times \frac{1000[m]}{1[km]}\ =\ 454.500.000\ [Nm]$$

$$454.500.000\ [Nm]\ \times\ 2{,}8 \times 10^{-7}[kWh]\ =\ 126{,}25[kWh]$$

Por otro lado, para la situación en que la potencia es proporcionada una parte por el motor eléctrico y la otra mitad por un motor de combustión, se consideran 2 motores donde cada uno debería brindar un mínimo empuje de 4.500[N]. Asumiendo que el motor a combustión genera 2.250[N] entonces el motor eléctrico debe generar la misma cantidad para cumplir con el empuje mínimo. Por lo tanto, el motor eléctrico debe generar las mismas cantidad de [kWh] que en la primera situación.

Aproximación-aterrizaje:

Las 4 principales fuerzas (Thrust, Drag, Lift y Weight) tienen condiciones. El empuje debe ser menor a la resistencia dado que la aeronave está desacelerando y el peso mayor a la normal para que la aeronave pueda descender y aterrizar.

- Masa= 62.000[Kg]
- El diseño alar es tal que produce un Lift/Drag = 16
- Weight es un 5% más que el Lift.
- Drag es un 10% más que el Thrust.
- Aceleración de gravedad = 10 [m/s]
- Newton metro (Nm) = Newton * metro
- 1 Newton metro = $2{,}8*10^{-7}$ [kWh] aproximadamente
- Distancia de aterrizaje ruta Andrés Sabella - Chacalluta = 30 [km]
- Distancia de aterrizaje ruta Diego Aracena - Chacalluta = 15 [km]
- Cada celda brinda 250 [kWh] de potencia
- 1 [kg] H_2 tiene un valor energético de 33,3 [kWh]

Cálculos:

$$Weight \ = \ 62.000[Kg] \times \ 10 \ [m/s] \ = \ 620.000 \ [N]$$

$$Lift \ = 520.000[N] \times (1 - 0{,}05) = \ 494.000[N] \ = \ 16 \ Drag$$

$$Drag \ = \ 30.875 \ [N] \times (1 + 0{,}1) = 33.962{,}5 = Thrust$$

$$Thrust \ Total \ = \ 33.962{,}5 \ [N]$$

$$Thrust \ Fan \ = \ 33.962{,}5 \ [N] \times 0{,}8 = 27.170$$

Para la situación en que la potencia viene solo de un motor eléctrico, se consideran 4 motores donde cada uno debería brindar un mínimo empuje de 1.698,125 [N], dado que el fan suministra los 27.170 [N] restantes.

Entonces:

Ruta Andrés Sabella – Chacalluta – Andrés Sabella requerirá:

$$1.698{,}125[N] \ \times 2 \times \ 30 \ [km] \times \frac{1000[m]}{1[km]} \ = \ 101.887.500 \ [Nm]$$

$$101.887.500 \ [Nm] \ \times \ 2{,}8 \times 10^{-7}[kWh] \ = \ 28{,}3 \ [kWh]$$

Ruta Diego Aracena – Chacalluta – Diego Aracena requerirá:

$$1.698{,}125 \ [N] \times 2 \ \times \ 15 \ [km] \times \frac{1000[m]}{1[km]} \ = \ 50.943.750 \ [Nm]$$

$$50.943.750 \ [Nm] \ \times \ 2{,}8 \times 10^{-7}[kWh] \ = \ 14{,}15 \ [kWh]$$

Por otro lado, para la situación en que la potencia es proporcionada una parte por el motor eléctrico y la otra mitad por un motor de combustión, se consideran 2 motores donde cada uno debería brindar un mínimo empuje de 3.396,25[N]. Asumiendo que el motor a combustión genera 1.698,125[N] entonces el motor eléctrico debe generar la misma cantidad para cumplir con el empuje mínimo. Por lo tanto, el motor eléctrico debe generar las mismas cantidad de [kWh] que en la primera situación.

Entonces la ruta Andrés Sabella – Chacalluta – Andrés Sabella tendrá los siguiente requerimientos:

$$Cantidad\ de\ celdas\ (solo\ ida)\ = \frac{58{,}5937\ [kWh] + 305{,}88\ [kWh] + 28{,}3[kWh]}{250\ [\frac{\text{kWh}}{\text{cant. celdas}}]} \approx 2$$

$$Cantidad\ de\ kg\ de\ H2 = \frac{58{,}5937\ [kWh] + 305{,}88\ [kWh] + 28{,}3\ [kWh]}{33{,}3\ [\text{kWh/kg}]} \approx 11{,}8$$

Entonces la ruta Diego Aracena – Chacalluta – Diego Aracena tendrá los siguiente requerimientos:

$$Cantidad\ de\ celdas\ (Solo\ ida) = \frac{29{,}2969[kWh] + 126{,}25[kWh] + 14{,}15\ [kWh]}{250\ [\text{kWh}]} \approx 1$$

$$Cantidad\ de\ kg\ de\ H2 = \frac{29{,}2969\ [kWh] + 126{,}25[kWh] + 14{,}15[kWh]}{33{,}3\ [\text{kWh/kg}]} \approx 5{,}1$$

Finalmente se estima que para el modelo eléctrico se requerirán 4 motores eléctricos con 2 celdas de combustible y 11,8 [kg] de H_2 verde para la ruta Andrés Sabella – Chacalluta – Andrés Sabella y 5,1[kg] para la ruta Diego Aracena – Chacalluta – Diego Aracena por motor. Respecto al modelo hibrido se tendrá la misma cantidad de celdas de combustible y de [kg] de H_2 por motor, pero solo serán necesario 2 motores híbridos paralelos para poder realizar ambas rutas sin problemas.

Evaluación Económica

De acuerdo con lo expuesto en la evaluación técnica, se pasará a analizar si los costos sociales justifican los costos de implementación de esta estrategia, en otras palabras, sí la estrategia es rentable socialmente o no. Para esto evaluaremos 2 modelos, uno completamente eléctrico, que tendrá el supuesto de reducir el 100% de las emisiones de CO_2 y el otro uno hibrido en paralelo que reducirá el 50%. Los costos de implementación se entienden como aquellos que tendrá que incurrir la línea aérea para poder empezar a implementar esta nueva tecnología en sus aeropuertos.

Se tiene como dato general que 1 tonelada de CO_2 emitido tiene un costo social igual a 25.506 pesos (División de evaluación social de inversiones, 2022). Entonces con los datos del (Anexo 8) podemos calcular el dinero a favor que se tiene por la cantidad de emisiones que se dejarán de emitir cada año. Se espera según, Paulina Ramírez, investigadora del centro de Energía de la universidad de Chile que el hidrógeno verde con un costo de producción de 8 dólares por kilo (2021) sea competitivo llegando a un valor de 2,5 dólares por kilo en el 2025. Es por eso, que la evaluación económica tendrá un horizonte de tiempo desde el 2022 al 2035, para evaluar qué pasará mientras el precio no sea competitivo y 9 años después de que lo sea, asumiendo que el precio del hidrógeno verde disminuye constantemente desde el 2022 hasta el 2025 y luego se mantiene constante en su valor competitivo.

Los costos de las celdas de combustible se estimará respecto al precio que tiene 1 kWh en chile, cuyo valor es 0,172 USD (Global Petrol Prices, 2021), los de transporte se asume un valor de 3 [USD/kg] (G., 2021) y de almacenamiento serán tanques en la superficie de 350 [bar] cuyo valor de 708 [USD/kg] (Z.Cesaro, R.M.Nayak-Luke, & Bañares-Alcántara, 2020) Respecto a los costos de diseño e instalación y mantención de los nuevos motores se considerarán 23 millones de dólares (Aerotime Hub, 2017) y 25% del valor de los motores nuevos respectivamente (Marlin Steel, 2020). Para el modelo hibrido el costo de rediseño como es incorporar sistemas y partes a un motor que ya existe, pero de todas formas es más trabajo que una mantención por lo que se asumirá que es un 35% del precio de adquirir uno nuevo y su mantenimiento será un 25% de este valor.

Modelo eléctrico:

Para la estimación de los costos se requiere realizar los siguientes sencillos cálculos:

- Costo por las celdas de combustible:

$$2\frac{[Cant.celdas]}{[Cant.mot.]} \times 4[Cant.mot.] \times 250\ \frac{[kWh]}{[Cant.celdas]} \times\ 0{,}172\ \frac{[USD]}{[kWh]} = 344[USD]$$

- Costos por los kg de hidrógeno verde ruta Andrés Sabella – Chacalluta – Andrés Sabella:

$$11{,}8\frac{[kg\ H2]}{[Cant.mot.]} \times 4[Cant.mot.] \times 8\ \frac{[USD]}{[kg\ H2]} = 377{,}6\ [USD]$$

- Costos por los kg de hidrógeno verde ruta Diego Aracena – Chacalluta – Diego Aracena:

$$5{,}1\frac{[kg\ H2]}{[Cant.mot.]} \times 4[Cant.mot.] \times 8\ \frac{[USD]}{[kg\ H2]} = 163{,}2\ [USD]$$

- Costo por transporte diario:

$$11{,}8\frac{[kg\ H2]}{[Cant.mot.]} + 5{,}1\frac{[kg\ H2]}{[Cant.mot.]}\ = 16{,}9\frac{[kg\ H2]}{[Cant.mot.]}$$

$$16{,}9\frac{[kg\ H2]}{[Cant.mot.]} \times 4[Cant.mot.] \times 3\frac{[USD]}{[kg\ H2]} = 202{,}8\ [USD]$$

- Costo de almacenamiento anual:

$$16{,}9\frac{[kg\ H2]}{[Cant.mot.]} \times 4[Cant.mot.] \times 708\ \frac{[USD]}{[kg\ H2]} = 47.860{,}8\ [USD]$$

- Costo por mantención anual:

$$23\ [\mathrm{Mill.\,USD}] \times 0{,}25 = 5{,}75[Mill.USD]$$

Entonces este modelo considerará los siguientes costos:

Requerimientos	Costo Total
8 celdas de combustible, repartidas en 4 motores	344 [USD]
47,2 [kg] de H_2 Ruta Andrés Sabella – Chacalluta – Andrés Sabella	377,6 [USD]
20,4 [kg] de H_2 Ruta Andrés Sabella – Chacalluta – Diego Aracena	163,2 [USD]
Costo de transporte diario	202,8 [USD]
Costo de almacenamiento anual	47.860,8 [USD]
Costo de diseño e instalación de nuevos motores	23.000.000 [USD]
Costos de mantención anual del motor	5.750.000 [USD]

Fuente: Elaboración propia, resumen de los costos de implementación.

Flujo de caja

Para el flujo de caja todos los valores serán pasados a UF dado que es una moneda que es reajustable a la inflación. Se asume un mantenimiento de motor al año y que la frecuencia de los vuelos de las rutas Andrés Sabella – Chacalluta – Andrés Sabella y Diego Aracena – Chacalluta – Diego Aracena es de 1 vuelo diario a cada destino, por lo tanto, el costo por [kg] de hidrógeno verde será 377,6 [USD]* 365 y 163,2[USD]* 365 días respectivamente. Se asume el mismo supuesto para el costo de transporte. Adicionalmente el precio del kg de hidrógeno disminuirá de manera lineal hasta llegar al valor competitivo donde se mantendrá constante ese valor. Los costos por kg de hidrógeno, almacenamiento y transporte empezarán el año 2025 donde el precio del kg de hidrógeno verde es competitivo. Para la tasa libre de riesgo (rf) se ocupará la tasa interbancaria cuyo valor es de 1,08% anual (Banco central, Chile, 2021) y para la prima de riesgo del mercado (rm) se ocupa la tasa de interés de los créditos de mercado cuyo valor es de 8,25% anual (Expansión/ datosmacro.com, 2022), (Anexo 13).

Los valores del VAN, TIR sociales y Payback corresponden a:

Van Social	-70827
Tir Social	5%
Payback	-

Resumen de escenarios:

Con el fin de ver la sensibilidad de estos resultados respecto al costo social de CO_2, es que se consideran 2 posibles escenarios uno pesimista, donde el valor de 1 [ton] de CO_2 disminuye en 0,1 UF y otro escenario optimista donde este aumenta 0,1 UF. Los resultados obtenidos fueron:

Resumen del escenario	Valores actuales:	pesimista	optimista
Celdas cambiantes:			
Precio Precio social CO2 por tonelada [UF] 2022	0,79	0,69	0,89
Precio Precio social CO2 por tonelada [UF] 2023	0,79	0,69	0,89
Precio Precio social CO2 por tonelada [UF] 2024	0,79	0,69	0,89
Precio Precio social CO2 por tonelada [UF] 2025	0,79	0,69	0,89
Precio Precio social CO2 por tonelada [UF] 2026	0,79	0,69	0,89
Precio Precio social CO2 por tonelada [UF] 2027	0,79	0,69	0,89
Precio Precio social CO2 por tonelada [UF] 2028	0,79	0,69	0,89
Precio Precio social CO2 por tonelada [UF] 2029	0,79	0,69	0,89
Precio Precio social CO2 por tonelada [UF] 2030	0,79	0,69	0,89
Precio Precio social CO2 por tonelada [UF] 2031	0,79	0,69	0,89
Precio Precio social CO2 por tonelada [UF] 2032	0,79	0,69	0,89
Precio Precio social CO2 por tonelada [UF] 2033	0,79	0,69	0,89
Precio Precio social CO2 por tonelada [UF] 2034	0,79	0,69	0,89
Precio Precio social CO2 por tonelada [UF] 2035	0,79	0,69	0,89
Celdas de resultado:			
VAN social	-70827	-240618	96651
TIR social	5%	-13%	14%

Fuente: Elaboración propia, resumen de escenario. Análisis de sensibilidad de precios social CO_2 modelo eléctrico.

Modelo Hibrido en paralelo:

Para la estimación de los costos se requiere realizar los siguientes sencillos cálculos:

- Costo por las celdas de combustible:

$$2\frac{[Cant.celdas]}{[Cant.mot.]} \times 2[Cant.mot.] \times 250\ \frac{[kWh]}{[Cant.celdas]} \times\ 0{,}172\ \frac{[USD]}{[kWh]} = 172[USD]$$

- Costo por los kg de hidrógeno verde ruta Andrés Sabella – Chacalluta – Andrés Sabella:

$$11{,}8\frac{[kg\ H2]}{[Cant.mot.]} \times 2[Cant.mot.] \times 8\ \frac{[USD]}{[kg\ H2]} = 188{,}8\ [USD]$$

- Costos por los kg de hidrógeno verde ruta Diego Aracena – Chacalluta – Diego Aracena:

$$5{,}1\frac{[kg\ H2]}{[Cant.mot.]} \times 2[Cant.mot.] \times 8\ \frac{[USD]}{[kg\ H2]} = 81{,}6[USD]$$

- Costo por transporte diario:

$$11{,}8\frac{[kg\ H2]}{[Cant.mot.]} + 5{,}1\frac{[kg\ H2]}{[Cant.mot.]}\ = 16{,}9\frac{[kg\ H2]}{[Cant.mot.]}$$

$$16{,}9\frac{[kg\ H2]}{[Cant.mot.]} \times 2[Cant.mot.] \times 3\frac{[USD]}{[kg\ H2]} = 101{,}4\ [USD]$$

- Costo de almacenamiento anual:

$$16{,}9\frac{[kg\ H2]}{[Cant.mot.]} \times 2[Cant.mot.] \times 708\ \frac{[USD]}{[kg\ H2]} =\ 23.930{,}4[USD]$$

- Costo de rediseño de un motor:

$$23\ [\mathrm{Mill.\,USD}] \times 0{,}35 = 8{,}05[Mill.USD]$$

- Costo por mantención anual:

$$8{,}05\ [\mathrm{Mill.\,USD}] \times 0{,}25 = 2{,}8175[Mill.USD]$$

Entonces este modelo considerará los siguientes costos:

Requerimientos	Costo Total
4 celdas de combustible, repartidas en 2 motores	172 [USD]
23,6 [kg] de H_2 verde ruta Andrés Sabella – Chacalluta – Andrés Sabella	188,8 [USD]
10,2[kg] de H_2 verde ruta Diego Aracena – Chacalluta – Diego Aracena	81,6 [USD]
Costo de transporte diario	101,4 [USD]
Costo de almacenamiento anual	23.930,4[USD]
Costo de rediseño de un motor	8.050.000 [USD]
Costos de mantención anual del motor	2.817.500 [USD]

Fuente: Elaboración propia, resumen de los costos de implementación.

Flujo de caja

Para el flujo de caja todos los valores serán pasados a UF dado que es una moneda que es reajustable a la inflación. Se asume un mantenimiento de motor al año y que la frecuencia de los vuelos de las rutas Andrés Sabella – Chacalluta y Diego Aracena –Chacalluta es de 1 vuelo diario a cada destino, por lo tanto, el costo por [kg] de hidrógeno verde será 576 [USD]* 365 y 230,4* 365 días hábiles respectivamente. Se asume el mismo supuesto para el costo de transporte. Adicionalmente el precio del kg de hidrógeno disminuirá de manera lineal hasta llegar al valor competitivo donde se mantendrá constante ese valor. Los costos por kg de hidrógeno, almacenamiento y transporte empezarán el año 2025 donde el precio del kg de hidrógeno verde es competitivo. Para la tasa libre de riesgo (rf) se ocupará la tasa interbancaria cuyo valor es de 1,08% anual (Banco central, Chile, 2021) y para la prima de riesgo del mercado (rm) se ocupa la tasa de interés de los créditos de mercado cuyo valor es de 8,25% anual (Expansión/ datosmacro.com, 2022), (Anexo 14).

Los valores del VAN, TIR sociales y Payback corresponden a:

Van Social	58894
Tir Social	19%
Payback	Año 2027

Resumen de escenarios:

Con el fin de ver la sensibilidad de estos resultados respecto al costo social de CO2, es que se consideran 2 posibles escenarios uno pesimista, donde el valor de 1 [ton] de CO2 disminuye en 0,1 UF y otro escenario optimista donde este aumenta 0,1 UF. Los resultados obtenidos fueron:

Resumen del escenario			
	Valores actuales:	pesimista	optimista
Celdas cambiantes:			
Precio Precio social CO2 por tonelada [UF] 2022	0,79	0,69	0,89
Precio Precio social CO2 por tonelada [UF] 2023	0,79	0,69	0,89
Precio Precio social CO2 por tonelada [UF] 2024	0,79	0,69	0,89
Precio Precio social CO2 por tonelada [UF] 2025	0,79	0,69	0,89
Precio Precio social CO2 por tonelada [UF] 2026	0,79	0,69	0,89
Precio Precio social CO2 por tonelada [UF] 2027	0,79	0,69	0,89
Precio Precio social CO2 por tonelada [UF] 2028	0,79	0,69	0,89
Precio Precio social CO2 por tonelada [UF] 2029	0,79	0,69	0,89
Precio Precio social CO2 por tonelada [UF] 2030	0,79	0,69	0,89
Precio Precio social CO2 por tonelada [UF] 2031	0,79	0,69	0,89
Precio Precio social CO2 por tonelada [UF] 2032	0,79	0,69	0,89
Precio Precio social CO2 por tonelada [UF] 2033	0,79	0,69	0,89
Precio Precio social CO2 por tonelada [UF] 2034	0,79	0,69	0,89
Precio Precio social CO2 por tonelada [UF] 2035	0,79	0,69	0,89
Celdas de resultado:			
VAN social	58894	-26001	142633
TIR social	19%	3%	30%

Fuente: Elaboración propia, resumen de escenario. Análisis de sensibilidad de precios social CO_2 modelo Híbrido.

Capítulo 4: Conclusiones

Las cantidad de emisiones de CO_2 el 2020 llegaron a las 84.556 [Kts] anuales. Parte de este problema es responsable la aviación donde según la (Tabla 2) y la (Gráfica 1) cada año va aumentando los niveles de CO_2 emitidos por la aviación comercial en Chile. Es por esto por lo que hay que tomar alguna acción al respecto y ahí donde entra el hidrógeno como una alternativa para hacer frente a esta problemática.

La producción de hidrógeno no es algo nuevo y existen varios tipos que se clasifican según su producción, destacando uno en particular que es hidrógeno verde, el cual se produce en base a las fuentes renovables. Como Chile es un país rico en recursos naturales, en el norte con la radiación solar, por ejemplo, lo hace perfecto para poder empezar a producir en masa y aplicarlo tanto a la industria aeronáutica como a otras.

Para su producción e implementación hace falta una serie de procesos e implementos, dentro de estos está la electrolisis que es un proceso que permite mediante una corriente continua que pasa a través de 2 electrodos que se encuentra sumergidos en agua, la ruptura de las moléculas de agua dando como resultado hidrógeno y oxígeno.

Este hidrógeno verde producido puede ser ocupado como un almacenador de energía que, mediante una celda de combustible, puede volver a ser energía eléctrica. A través de esta información y mediante la metodología de marco lógico es que se logra llegar a una estrategia y tecnología que ocupe este proceso en los motores de las aeronaves, más específico Airbus A320-200 en el aeropuerto Andrés Sabella y Diego Aracena, con la intensión de aprovechar la zona con mayor radiación solar de Chile que es perfecta para la producción de este hidrógeno verde y causar un impacto positivo disminuyendo las emisiones de CO_2 en las operaciones de esos aeropuertos.

En esta estrategia se vieron 2 puntos principales, un análisis técnico y un análisis económico Social con el fin de evaluar si es factible de aplicar y si es rentable desde el punto de vista social considerando cierto supuestos expuesto en este trabajo. Respecto al análisis técnico, se eligió la Proton Exchange membrana fuel cell (PEMFC), cuyas características son principalmente que produce 250 [kW] de energía eléctrica continúa funcionando a 100°C. Esta sería implementada a la aeronave A320-200 en 2 tipos de modelos de motores, uno

completamente eléctrico y otro hibrido, evaluados en 2 rutas, Andrés Sabella – Chacalluta – Andrés Sabella y Diego Aracena – Chacalluta – Diego Aracena. Como resultados se pudo estimar los empujes mínimos necesarios para 3 fases de vuelos (Despegue, Crucero, Aproximación-Aterrizaje) con lo que mediante unos cálculos se logra obtener que para el modelo completamente eléctrico se requiere 4 motores, con 2 celdas de combustible cada motor, necesitando 11,8 [kg] de hidrógeno para la primera ruta y 5,1 [kg] para la segunda. Respecto al modelo hibrido se concluyó que se requieren 2 motores híbridos con 2 celdas de combustible en cada motor y la misma cantidad de hidrógeno para las distintas rutas.

Los resultados obtenidos demuestran que es posible impulsar la aeronave A320 – 200 con estos motores completamente eléctricos e híbridos siempre y cuando el motor eléctrico sea capaz de potenciar el empuje mínimo que la aeronave necesita ocupando la energía proporcionada por las celdas de combustible. Comparando los modelos se tiene que el modelo completamente eléctrico requiere 2 motores más que el hibrido dado que este último obtiene potencia de 2 fuentes: eléctrica y a combustión, bajo ese punto tenemos que la mejor opción sería los motores híbridos, pero desde el punto de vista ecológico los 4 motores eléctricos reducen el 100% de las emisiones de CO_2, en cambio los modelos híbridos solo el 50%. Como conclusión y recomendación del análisis técnico se obtiene que la mejor elección será dependiendo de cuál es la prioridad de quien este implementando esta estrategia.

Respecto a los resultados del análisis económico social, se cuantificó el valor de 1 [ton] de CO_2 lo que se contrarrestó con la inversión y costos que requiere esta estrategia. Mediante el flujo de caja, para el modelo eléctrico con una inversión inicial de 575.009 UF, más costos de almacenamiento de 1.197 UF, transporte de 1.850,6 UF y mantención de 143.750 UF que inician a partir del año 2025, se obtuvo un VAN social de -70.827 UF y una TIR social de 5%. El valor del VAN social es negativo y la TIR social es menor a la tasa del costo de capital por lo que, se considera que la estrategia no es rentable, pero del análisis de escenarios, hay que considerar que si los precios sociales del CO_2 aumentan su precio en 0,1 UF (escenario Optimista) este pasa a ser rentable con un VAN y TIR sociales con valores aceptables. Para el escenario optimista se tiene VAN igual a 96.651 UF y una TIR de 14%.

Para el modelo hibrido con una inversión inicial de 201.254 UF, más costos de almacenamiento de 598 UF, transporte de 925,3 UF y mantención de 70.438 UF que inician a partir del año 2025, donde se obtuvo un VAN social de 58.894 UF y una TIR social de 19% con un Payback en el año 2027. El VAN Social es un valor positivo y TIR social es mayor a la tasa del costo de capital por lo que esta estrategia es rentable. Respecto al análisis de escenarios se concluye que en el escenario pesimista la estrategia pasa a no ser rentable con un VAN Social de -26.001 UF y una TIR de 3%. En el escenario optimista VAN aumenta a 142.633 UF.

En el escenario optimista del modelo eléctrico el VAN tuvo un aumento de 167.478 UF, en cambio para el modelo híbrido se tuvo un aumento de 83.739 UF considerando la misma variación de precio social del CO_2. Con estos resultados se puede concluir que el modelo hibrido es menos sensible que el modelo eléctrico a las variaciones del precio social del CO_2.

Dado los resultados obtenidos se puede concluir que ambos modelos son factibles, pero solo es rentable el modelo híbrido desde el punto de vista social, entonces la mejor opción para poder implementar el hidrógeno verde en los motores de A320-200 es el modelo híbrido en paralelo, a pesar de que solo disminuye el 50% de las emisiones, su inversión inicial es menor, sus costos son menores, no necesita incluir más motores, es rentable y menos sensible ante variaciones del precio social del CO_2 que el modelo eléctrico. Esta decisión se basa principalmente en los indicadores económicos, pero de todas maneras el modelo eléctrico destaca en que es capaz de disminuir el 100% de las emisiones de CO2, entonces es un proyecto que, si bien no es rentable considerando el horizonte de tiempo que se ocupa, puede causar un impacto social y ambiental tremendo, además de que este quizás puede ser rentable en un horizonte de tiempo mayor.

Finalmente, se debe comprender que la implementación del hidrógeno verde tiene demasiados factores dado que recién se están empezando algunos proyecto de plantas de hidrógeno en Chile, aún no se sabe si se van a terminar en los plazos prometidos, ni si realmente el precio del hidrógeno verde llegará a ser competitivo, ni que impacto puede causar el construir esa planta. Esta va a requerir, en el caso de Chile, electricidad de la energía solar en el norte o energía eólica en el sur y ¿se justifica gastar esta energía renovable para producir el hidrógeno o es mejor destinarla para otros usos?, siendo el agua también un

componente primordial para producir el hidrógeno por electrolisis, ¿cuánta agua se necesita para producir este hidrógeno? y ¿se justifica el ocupar esa cantidad de agua en relación con la cantidad de energía que se obtiene?

Referencias

Aerotime Hub. (7 de Julio de 2017). *Aviation news: Aerotime Hub*. Obtenido de https://www.aerotime.aero/articles/23085-5-things-about-jet-engines#:~:text=Most%20aircraft%20are%20fully%20equipped,12%20to%2035%20million%20dollars.

AghaKouchak, A., Chiang, F., Huning, L. S., Love, C. A., Mallakpour, I., Mazdiyasni, O., . . . Sadegh, E. R. (mayo de 2020). *Climate Extremes and Compound Hazards in a Warming World.* Obtenido de Annual Review of Earth and Planetary Sciences: https://www-annualreviews-org.usm.idm.oclc.org/doi/pdf/10.1146/annurev-earth-071719-055228

Airbus SAS. (s.f.). *A320 Family* . Obtenido de https://www.airbus.com/en/products-services/commercial-aircraft/passenger-aircraft/a320-family

Alaswad, A., Palumbo, A., & A.G.Olabi, M. a. (2016). *Fuel CellTechnologies, Applications, and State of the Art. A Reference Guide.* Obtenido de https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128035818040091

Álvarez, D. L. (2020). *Memoria de título: Estudio y Análisis de Métodos Alternativos de.* Zaragoza, españa: Universidad Zaragoza.

Banco central, Chile. (2021). *Base de Datos Estadísticos*. Obtenido de https://si3.bcentral.cl/Siete/ES/Siete/Cuadro/CAP_TASA_INTERES/MN_TASA_INTERES_09/TSF_23/T51?cbFechaInicio=2010&cbFechaTermino=2022&cbFrecuencia=ANNUAL&cbCalculo=NONE&cbFechaBase=

Betancourt, D. F. (23 de febrero de 2017). *Marco lógico: Definición, elaboración y ejemplo detallado*. Obtenido de 08 de agosto de 2021, de Ingenio Empresa: www.ingenioempresa.com/metodologia-marco-logico.

Cifuentes, E. A. (2017). *Memoria de título: APLICABILIDAD DE CELDAS DE COMBUSTIBLE A BASE DE HIDRÓGENO EN LA AVIACIÓN COMERCIAL.* Santiago.

Comisión Desafios del Futuro, Ciencia, Tecnología e Innovación, Comisión de Minería y Energía . (13 de Enero de 2021). *H2V iniciativa hidrógeno Verde.* Obtenido de https://www.senado.cl/senado/site/mm/20210113/asocfile/20210113233046/iniciativa_h2v.pdf

Dirección General de Aeronáutica Civil, DGAC. (9 de Abril de 2019). *RED AEROPORTUARIA NACIONAL*. Obtenido de https://www.dgac.gob.cl/aeropuertos/red-aeroportuaria-nacional/

División de evaluación social de inversiones. (Abril de 2022). *Informe precios sociales 2022, ministerio de desarrollo social y familia.* Obtenido de http://sni.gob.cl/storage/docs/Precios_Sociales_Vigentes.pdf

Donateo, T., Spedicato, L., & Ficarella, A. (june de 2018). *A method to analyze and optimize hybrid electric architectures applied to unmanned aerial vehicles.* Obtenido de file:///C:/Users/lvarg/Downloads/AEAT_Donateo_final.pdf

DR. JOSÉ M. DÍAZ PUENTE, P. T., & PABLO VIDUEIRA, P. i. (s.f.). *EVALDES Evaluación y Desarrollo*. Obtenido de http://evaluacionydesarrollo.com/quienessomos/

ENGIE Energía Chile. (16 de noviembre de 2021). *Planta Solar Tamaya cuenta con un 98% de avance y ya está inyectando energía a la red*. Obtenido de https://www.engie.cl/planta-solar-tamaya-cuenta-con-un-98-de-avance-y-ya-esta-inyectando-energia-a-la-red/

Expansión, Diario Económico Español. (2022). *Expansión / datosmarco.com*. Obtenido de https://datosmacro.expansion.com/energia-y-medio-ambiente/emisiones-co2

Expansión/ datosmacro.com. (30 de marzo de 2022). *Chile sube sus tipos de interés*. Obtenido de https://datosmacro.expansion.com/tipo-interes/chile

G., F. T. (2021). Claves del hidrógeno verde. *Induambiente: es la historia ambintal de chile*, 28-31. Obtenido de https://www.induambiente.com/destacamos/claves-del-hidrogeno-verde#:~:text=Costos%20de%20Producci%C3%B3n,-

El%20costo%20de&text=Una%20vez%20obtenido%20el%20H2,para%20la%20alternativa%20de%20traslado.

Global Petrol Prices. (septiembre de 2021). *Chile precios de la electricidad*. Obtenido de https://es.globalpetrolprices.com/Chile/electricity_prices/#:~:text=Chile%2C%20septiembre%202021%3A,es%200.136%20USD%20por%20kWh.

GONZÁLEZ, A. N. (13 de Agosto de 2021). *¿Qué son el VAN y el TIR?* Obtenido de https://www.elblogsalmon.com/conceptos-de-economia/que-son-el-van-y-el-tir

INE, Instituto Nacional de Estadística de Chile. (s.f.). *Estadísticas de Medio Ambiente*. Obtenido de https://www.ine.cl/

JAC, Junta de Aeronáutica Civil . ([2012-2018]). *Junta de Aeronautica Civil* . Obtenido de Ministerio de Transportes y Telecuminicaciones : http://www.jac.gob.cl/informes-del-numero-de-operaciones-realizadas-en-los-aeropuertos-y-aerodromos-de-chile/

Juan Carlos Jobet, m. d. (19 de Octubre de 2021). *Gobierno lanzó plan para el uso de hidrógeno verde en el Aeropuerto de Santiago.* Obtenido de https://www.cnnchile.com/pais/gobierno-plan-hidrogeno-verde-aeropuerto-santiago_20211019/

Kalamaras, C. M., & Efstathiou, A. M. (6 de Junio de 2013). Hydrogen Production Technologies:. *Power Options for the Eastern Mediterranean Region.* Chemistry Department, University of Cyprus, 1678 Nicosia, Cyprus: Y. Al-Assaf and A. Poullikkas. Obtenido de Hydrogen Production Technologies: Current State and: https://www.hindawi.com/journals/cpis/2013/690627/

la ruta verde para Chile, Girolimpio. (8 de junio de 2022). *Chile presenta ante la Organización de Aviación Civil Internacional su primer plan de acción para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero de la aviación comercial*. Obtenido de https://www.girolimpio.cl/chile-presenta-ante-la-organizacion-de-aviacion-civil-internacional-su-primer-plan-de-accion-para-reducir-las-emisiones-de-gases-de-efecto-invernadero-de-la-aviacion-comercial/

Marlin Steel. (10 de march de 2020). *Your guide to jet engine maintenance*. Obtenido de https://www.aerotime.aero/articles/23085-5-things-about-jet-engines#:~:text=Most%20aircraft%20are%20fully%20equipped,12%20to%2035%20million%20dollars.

Mekhilef, S., Saidur, R., & Safari, A. (21 de Octubre de 2011). *Comparative study of different fuel cell technologies.* Obtenido de Renewable and Sustainable Energy Reviews: www.elsevier.com/locate/rser

MinEnergía, Ministerio de Energía. (Noviembre de 2020). *Estrategia Nacional de Hidrógeno verde Chile, fuente energética para un planeta cero emisiones.* Obtenido de https://energia.gob.cl/sites/default/files/estrategia_nacional_de_hidrogeno_verde_-_chile.pdf

Ministerio de Relaciones Exteriores. (17 de mayo de 2016). *Nueva Ley de Reciclaje: Chile avanza en sus compromisos medioambientales con la OCDE.* Obtenido de https://chile.gob.cl/chile/en/blogs/todos/nueva-ley-de-reciclaje-chile-avanza-en-sus-compromisos-medioambientales#:~:text=El%2017%20de%20mayo%20de,cuando%20se%20transforman%20en%20residuos).

MMA, Ministerio del Medio Ambiente. (Diciembre de 2020). *Inventario nacional de gases de efecto Invernadero y otros contamiantes climáticos 1990 - 2018.* Obtenido de https://unfccc.int/sites/default/files/resource/7305681_Chile-BUR4-1-2020_IIN_CL.pdf

Organización de aviación civil internacional, OACI. (6 de julio de 2021). *Ya son más de 100 los Estados que participan en el Plan OACI de Compensación y Reducción de Carbono para la Aviación Internacional (CORSIA)* . Obtenido de OACI Web site: https://www.icao.int/Newsroom/Pages/ES/Over-100-States-now-participate-in-ICAOs-Carbon-Offsetting-and-Reduction-Scheme-for-International-Aviation-CORSIA.aspx

Plett, C. d. (19 de Marzo de 2021). *Hidrógeno Verde:*. Obtenido de https://www.agenciase.org/wp-content/uploads/2021/03/Presentacion-Erwin-Plett-Hidrogeno-Verde-Potencial-y-Usos-Lanzamiento.pdf

Potter, M. (marzo de 2022). Módulo del fan propósito, material educacional Universidad Técnica Federico Santa María. Santiago, Vitacura, Chile .

Rendón, M. A., R, C. D., M, J. G., & Anzai, A. H. (16 de June de 2021). *Aircraft Hybrid-Electric Propulsion: Development Trends, Challenges.* (©. B.–S. 2021, Ed.) Obtenido de https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s40313-021-00740-x.pdf

RR.EE., Ministerio de Relaciones Exteriores (MINREL Min. (7 de Abril de 2021). *Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, BCN.* Obtenido de https://www.bcn.cl/leychile/navegar?i=1157864&f=2021-04-07

SÁEZ, F. L. (2020). *EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DEL USO DE HIDRÓGENO VERDE EN APLICACIONES PARA LA INDUSTRIA Y DESPLAZAMIENTO DE COMBUSTIBLE FÓSIL.* Santiago.

Sergi Alcalde, R. d. (6 de Octubre de 2020). *Airbus crea el primer avión propulsado totalmente con hidrógeno.* Obtenido de https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/airbus-crea-primer-avion-propulsado-totalmente-hidrogeno_15938

Smith, W. (marzo de 2000). *The role of fuel cells in energy storage.* Obtenido de Journal of Power Sources Volume 86, Issues 1–2, Pages 74-83: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378775399004851

Stambouli, A. B. (2011). *Fuel cells: The expectations for an environmental-friendly and sustainable source of energy.* Obtenido de https://ideas.repec.org/a/eee/rensus/v15y2011i9p4507-4520.html

Vásquez, R., Salinas, F., & GmbH, D. G. (mayo de 2019). *Tecnologías del hidrógeno y perspectivas para Chile.* Obtenido de https://energia.gob.cl/electromovilidad/img/Tecnolog%C3%ADas-del-hidr%C3%B3geno-y-perspectivas-para-Chile_2019.pdf

Villacorta, A. G. (30 de Septiembre de 2021). *VAN, TIR y Pay-back: ¿qué son y en qué se diferencian?* Obtenido de https://www.esan.edu.pe/conexion-esan/van-tir-y-pay-back-que-son-y-en-que-se-diferencian#:~:text=El%20Valor%20Actual%20Neto%20(VAN,de%20inversi%C3%B3n%20de%20una%20empresa.

Wikipedia . (junio de 2022). *Airbus A320*. Obtenido de https://es-academic.com/dic.nsf/eswiki/19236

Wright Electric. (10 de Septiembre de 2021). *Wright Electric desarrolla un motor eléctrico de 2MW para aviones de pasajeros.* Obtenido de https://ecoinventos.com/wright-electric-motor-electrico-aviones-de-pasajeros/

Z.Cesaro, R.M.Nayak-Luke, & Bañares-Alcántara, R. (30 de september de 2020). *Energy Storage Technologies: Power-to-X.* Obtenido de https://books.google.co.in/books?hl=en&lr=&id=W2XRDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA15&ots=_V_GzjdlfA&sig=E6JEeGPl6njzj0L1AkhdzuK_3IE#v=onepage&q&f=false

Anexos

Anexo 1: Ranking Mundial niveles de CO2 emitidos en el 2020.

Ranking Mundial 2020	Paises	CO2 Totales Kts
1	China	11.157.071
2	Estados Unidos	5.243.744
3	India	2.556.547
46	Chile	84.556

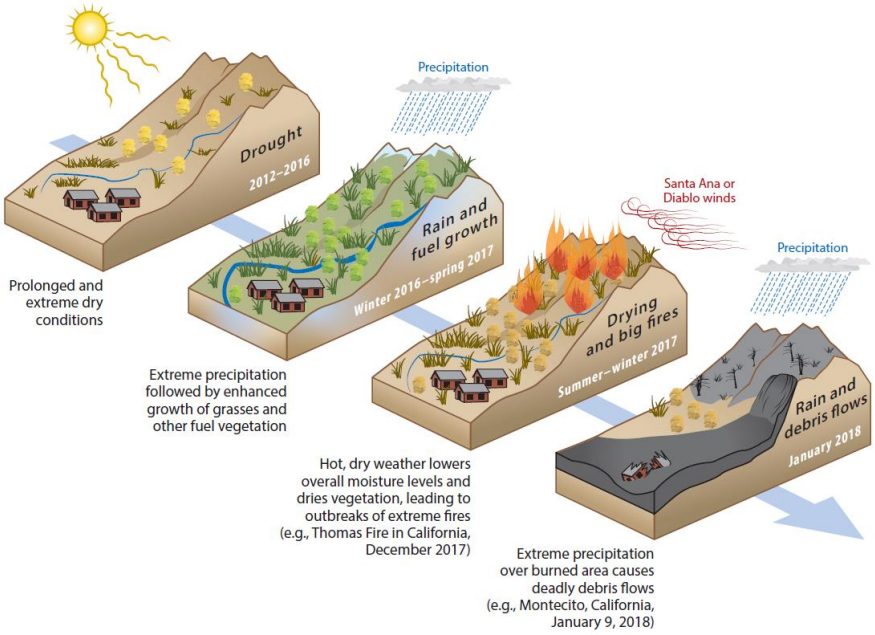
Fuente: Elaboración propia en base a información de Expansión / datosmarco.com.

Anexo 2: Ranking Sudamericano niveles de CO2 emitidos en el 2020.

Ranking Sudmericano 2020	Paises	CO2 Totales Kts
1	Brasil	479.969
2	Argentina	204.921
3	Venezuela	122.057
4	Chile	84.556

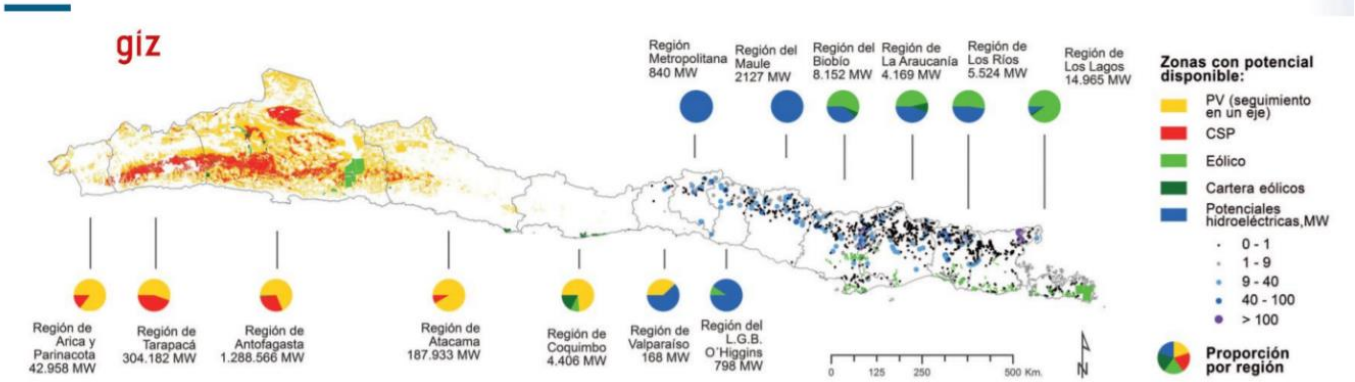
Fuente: Elaboración propia en base a información de Expansión / datosmarco.com.

Anexo 3: Catástrofe Sur de California, Montecito CA.



Fuente: Annual Review of Earth and Planetary Sciences, Climate Extremes and Compound Hazards in a Warming World.

Anexo 4: Potencial energético de fuentes renovables en Chile.



Fuente: DR. Ing Erwin Plett CEO de Low Carbon Chile SpA [19 de marzo de 2021]

Anexo 5: Aplicaciones del Hidrógeno.

Fuente: Comisión Desafíos del Futuro, Ciencia, Tecnología e Innovación, Comisión de Minería y Energía del Senado de la República.

Anexo 6: Operaciones Anuales Red aeroportuaria nacional [2012-2018]

OACI	NOMBRE	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
SCAR	CHACALLUTA	7.841	7.178	7.290	5.678	5.774	7.089	7.201
SCDA	DIEGO ARACENA	36.257	35.911	34.358	35.230	14.476	15.919	15.750
SCFA	ANDRES SABELLA	30.001	29.314	30.155	27.061	17.482	16.884	17.352
SCCF	El LOA	10.386	13.711	12.073	10.699	10.228	11.911	14.131
SCAT	DESIERTO DE ATACAMA	12.159	10.861	8.565	7.088	4.367	5.468	5.344
SCLL	VALLENAR	806	696	660	704	1.119	460	422

Fuente: Elaboración propia en base a información de la Junta de Aeronáutica Civil.

Anexo 7: Emisiones de CO_2 [kt] [2012-2018]

OACI	NOMBRE	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
SCDA	DIEGO ARACENA	204,47	182,90	181,19	228,64	110,69	120,47	121,32
SCFA	ANDRES SABELLA	169,19	149,30	159,03	175,62	133,68	127,77	133,66

Fuente: Elaboración propia en base a información de la Junta de Aeronáutica Civil y le Ministerio del Medio Ambiente.

Anexo 8: Emisiones de CO_2 [kt] [2019-2035]

Código/Años	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
SCDA	184,26	164,77	177,39	157,90	170,51	151,02	163,64
SCFA	163,23	165,65	163,93	166,35	164,64	167,05	165,34

2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
144,15	156,77	137,28	149,89	130,40	143,02	123,53	136,15	116,66	129,27
167,75	166,04	168,45	166,74	169,15	167,44	169,85	168,14	170,55	168,84

Fuente: Elaboración propia en base a información de la Junta de Aeronáutica Civil y le Ministerio del Medio Ambiente.

Anexo 9: Esquema producción hidrógeno azul.

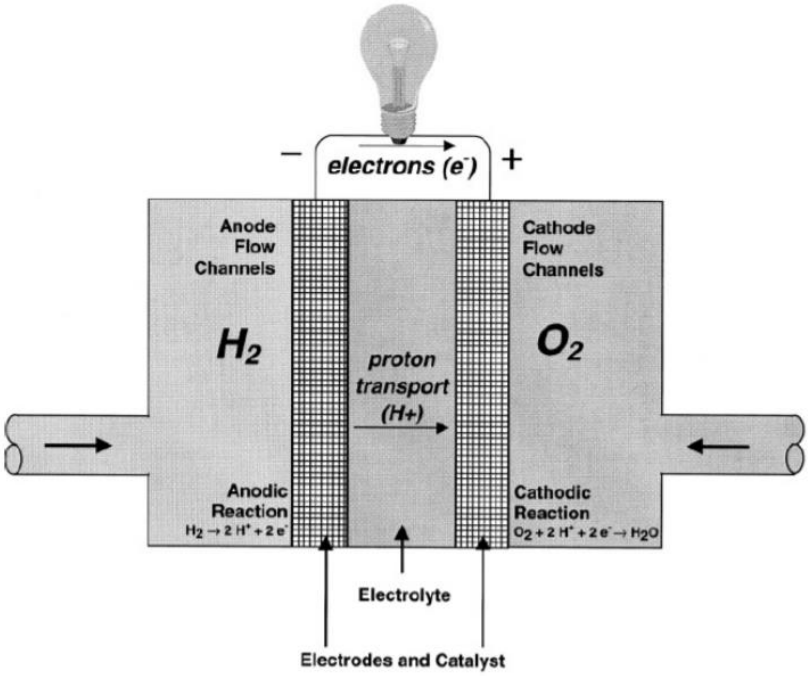
Fuente: Compañía de energía BP, obtenido del Noticiero World Energy Trade [18 marzo 2021]

Anexo 10: Matriz Marco Lógico.

JERARQUÍA DE OBJETIVOS	METAS	INDICADORES	FUENTES DE VERIFICACIÓN	SUPUESTOS
FIN				
PROPÓSITO				
RESULTADO				
ACCIONES				

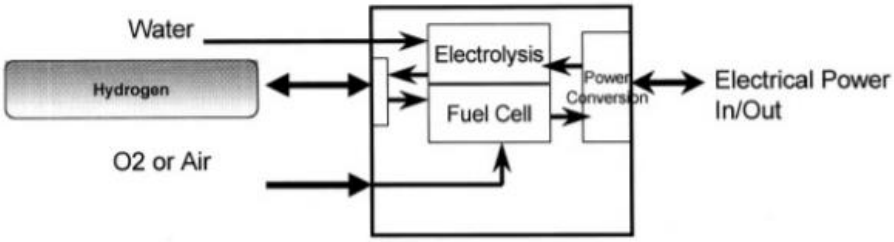
Fuente: Elaborado por (DR. JOSÉ M. DÍAZ PUENTE & PABLO VIDUEIRA, s.f.)

Anexo 11: Reacción electromagnética Fuel Cell.



Fuente: Memoria de título (Cifuentes, 2017)

Anexo 12: Sistema Regenerative Fuel Cell (RCF).



Fuente: Memoria de título (Cifuentes, 2017)

Anexo 13: Flujo caja modelo eléctrico.

1 USD a UF	0,025
1 CLP a UF	0,000031
Días Hábiles anuales	365

Variable Criticas Modelo eléctrico		2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
Unidades de CO_2 [ton]		324248,28	335149,18	318075,13	328976,02	311901,97	322802,86	305728,81	316629,71	299555,65	310456,55	293382,50	304283,39	287209,34	298110,23
Unidades de Hidrógeno verde anual [kg]		24674,00	24674,00	24674,00	24674,00	24674,00	24674,00	24674,00	24674,00	24674,00	24674,00	24674,00	24674,00	24674,00	24674,00
Precio social CO2 por tonelada [UF]		0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79
Costo de 1kg de hidrogeno Verde [UF]		0,20	0,15	0,11	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
Ingresos operacionales			264997,76	251497,55	260116,73	246616,52	255235,71	241735,49	250354,68	236854,46	245473,65	231973,43	240592,62	227092,40	235711,59
Costos operacionales					-1542,74	-1542,13	-1542,13	-1542,13	-1542,13	-1542,13	-1542,13	-1542,13	-1542,13	-1542,13	-1542,13
margen operacional			**264997,76**	**251497,55**	**258573,99**	**245074,39**	**253693,58**	**240193,37**	**248812,55**	**235312,34**	**243931,52**	**230431,31**	**239050,49**	**225550,28**	**234169,46**
Celdas de combustible		-8,6													
depreciacion Activos					-0,61	-0,61	-0,61	-0,61	-0,61	-0,61	-0,61	-0,61	-0,61	-0,61	-0,61
perdidas ej. Anterior															
utilidad antes de impuestos			264997,76	251497,55	258573,38	245073,78	253692,97	240192,75	248811,94	235311,72	243930,91	230430,69	239049,88	225549,66	234168,85
impuestos	-0,27	0,00	-71549,40	-67904,34	-69814,81	-66169,92	-68497,10	-64852,04	-67179,22	-63534,16	-65861,35	-62216,29	-64543,47	-60898,41	-63225,59
utilidad después de impuestos			193448,37	183593,21	188758,57	178903,86	185195,87	175340,71	181632,71	171777,56	178069,56	168214,41	174506,41	164651,25	170943,26
Correccion de depreciacion					0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61
Correccion de perdidas ej. Anterior															
Costo de diseño e instalación de nuevo motor		-575.000													
Costo de almacenamiento					-1.197	-1.197	-1.197	-1.197	-1.197	-1.197	-1.197	-1.197	-1.197	-1.197	-1.197
Costo de transporte					-1850,55	-1850,55	-1850,55	-1850,55	-1850,55	-1850,55	-1850,55	-1850,55	-1850,55	-1850,55	-1850,55
Costo de mantención					-143.750	-143.750	-143.750	-143.750	-143.750	-143.750	-143.750	-143.750	-143.750	-143.750	-143.750
Flujo de caja		-575.009	193448,37	183593,21	41962,11	32107,40	38399,41	28544,25	34836,26	24981,10	31273,11	21417,95	27709,96	17854,80	24146,80
VP		-575.009	176939,88	153595,30	32109,92	22472,31	24582,60	16714,08	18657,61	12237,62	14012,54	8777,77	10387,31	6121,85	7572,65
Flujo de caja acumulado		-575.009	-398068,72	-244473,42	-212363,50	-189891,19	-165308,59	-148594,50	-129936,89	-117699,28	-103686,73	-94908,96	-84521,65	-78399,80	-70827,15
Costo de capital (K_P)		9,33%													

Van Social	-70827
Tir Social	5%
Payback	-

Rf	1,08%
Rm	8,25%

Fuente: Elaboración propia.

Anexo14: Flujo caja modelo híbrido.

1 USD a UF	0,025
1 CLP a UF	0,000031
Días Hábiles anuales	365

Variable Criticas Modelo Hibrido		2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
Unidades de CO_2 [ton]		162124,14	167574,59	159037,56	164488,01	155950,98	161401,43	152864,41	158314,85	149777,83	155228,27	146691,25	152141,70	143604,67	149055,12
Unidades de Hidrógeno verde anual [kg]		12337,00	12337,00	12337,00	12337,00	12337,00	12337,00	12337,00	12337,00	12337,00	12337,00	12337,00	12337,00	12337,00	12337,00
Precio social CO2 por tonelada [UF]		0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79
Costo de 1kg de hidrogeno Verde [UF]		0,20	0,15	0,11	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
Ingresos operacionales			132498,88	125748,77	130058,37	123308,26	127617,85	120867,75	125177,34	118427,23	122736,82	115986,72	120296,31	113546,20	117855,79
Costos operacionales					-771,37	-771,06	-771,06	-771,06	-771,06	-771,06	-771,06	-771,06	-771,06	-771,06	-771,06
margen operacional	**0,00**		**132498,88**	**125748,77**	**129287,00**	**122537,20**	**126846,79**	**120096,68**	**124406,28**	**117656,17**	**121965,76**	**115215,65**	**119525,25**	**112775,14**	**117084,73**
Celdas de combustible		-4,3													
depreciacion Activos					-0,31	-0,31	-0,31	-0,31	-0,31	-0,31	-0,31	-0,31	-0,31	-0,31	-0,31
perdidas ej. Anterior															
utilidad antes de impuestos			132498,88	125748,77	129286,69	122536,89	126846,48	120096,38	124405,97	117655,86	121965,45	115215,35	119524,94	112774,83	117084,42
impuestos	-0,27	0,00	-35774,70	-33952,17	-34907,41	-33084,96	-34248,55	-32426,02	-33589,61	-31767,08	-32930,67	-31108,14	-32271,73	-30449,20	-31612,79
utilidad después de impuestos			96724,18	91796,61	94379,28	89451,93	92597,93	87670,35	90816,36	85888,78	89034,78	84107,20	87253,21	82325,63	85471,63
Correccion de depreciacion					0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31
Correccion de perdidas ej. Anterior															
Costo de rediseño de un motor		-201.250													
Costo de almacenamiento					-598	-598	-598	-598	-598	-598	-598	-598	-598	-598	-598
Costo de transporte					-925,275	-925,275	-925,275	-925,275	-925,275	-925,275	-925,275	-925,275	-925,275	-925,275	-925,275
Costo de mantención					-70.438	-70.438	-70.438	-70.438	-70.438	-70.438	-70.438	-70.438	-70.438	-70.438	-70.438
Flujo de caja		-201.254	96724,18	91796,61	22418,56	17491,20	20637,20	15709,63	18855,63	13928,05	17074,05	12146,47	15292,48	10364,90	13510,90
VP		-201.254	88469,94	76797,65	17154,95	12242,28	13211,56	9198,77	10098,70	6823,00	7650,37	4978,02	5732,51	3553,80	4237,14
Flujo de caja acumulado		-201.254	-112784,36	-35986,71	-18831,76	-6589,48	6622,08	15820,85	25919,55	32742,56	40392,93	45370,95	51103,46	54657,26	58894,40
Costo de capital (K_P)	9,33%														

Van Social	58894
Tir Social	19%
Payback	Año 2027

Rf	1,08%
Rm	8,25%

Fuente: Elaboración propia.