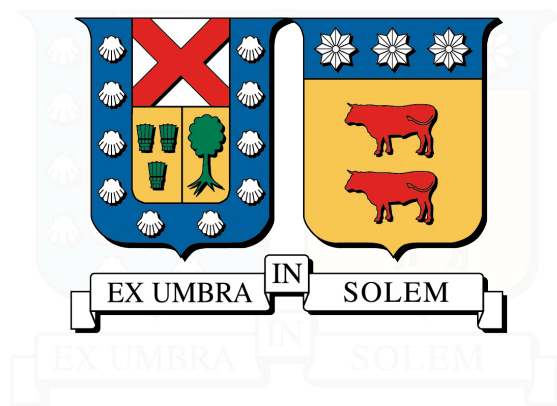


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS
SANTIAGO - CHILE



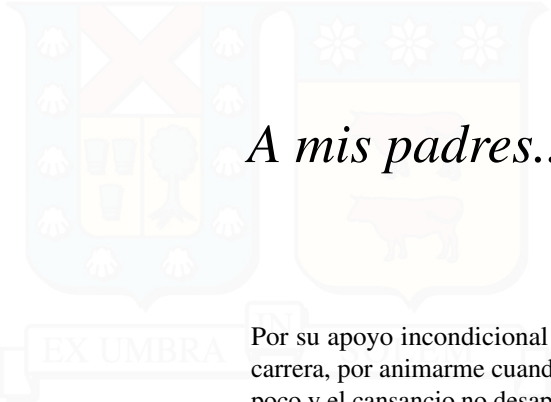
APLICABILIDAD DE CELDAS DE COMBUSTIBLE A BASE DE HIDRÓGENO EN LA AVIACIÓN COMERCIAL

EDGAR ANTONIO LLANQUINAO CIFUENTES

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL

PROFESOR GUÍA : SR. ANDRÉS FUENTES.
PROFESOR CORREFERENTE : SR. RODRIGO DEMARCO.

NOVIEMBRE 2017



A mis padres...

Por su apoyo incondicional en esta etapa de mi carrera, por animarme cuando el tiempo se hacía poco y el cansancio no desaparecía. Espero algún día recompensar todo su esfuerzo y sacrificio puesto en mí. Este trabajo es para ustedes.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a quienes tuve la suerte de conocer en esta etapa de mi vida, estudiar y trabajar al mismo tiempo es un inmenso sacrificio que no puede ser llevado a cabo si no se está acompañado. A mis amigos y compañeros de ICIPEV, les dedico este par de líneas en agradecimiento por convertirse en un pilar fundamental cuando la situación era compleja y apenas teníamos tiempo de ver a nuestras familias. Por la horas de estudio, penas y alegrías (más alegrías) de pasar los ramos y contar los trimestres para terminar la carrera. Toda mi gratitud a ellos porque hoy me tienen aquí, al final de este camino y de la obtención del título de Ingeniero Civil Industrial.

A mis amigos de la vida, quienes han estado siempre presente, a pesar de no verlos tan seguido como quisiera, sé que nunca desaparecerán. Hemos recorrido más de una década juntos, la vida nos ha cambiado un poco, pero seguimos siendo los mismos de siempre. Gracias a ellos porque también fueron parte de este proceso y hoy, al final no quiero dejar pasar la oportunidad de enviarles un abrazo a cada uno, Felipe y Marcelo.

A mis compañeros de trabajo, por su ayuda y comprensión en los días en que necesitaba estudiar y dejar de lado, por un día todas las responsabilidades. Me alegra pertenecer a un grupo, en cuyas diferencias encuentra la fortaleza para sobrellevar aquellos días más difíciles. Gracias por recibirme hace ya casi dos años y ser parte activa en el logro de este objetivo.

RESUMEN EJECUTIVO

La presente memoria pretende realizar una introducción a la problemática energética futura que enfrentará la industria de la aviación comercial en el mundo. Problemática relacionada al consumo y generación de energía eléctrica al interior de los aviones, donde se revisarán las alternativas que hoy se encuentran en pleno desarrollo y que pueden convertirse en la solución para los próximos años.

Se identificarán conceptos básicos relacionados al funcionamiento de los motores de un avión y su participación en la generación de energía junto con el gasto que esto produce y su impacto en el medio ambiente. Se estudiará además, la participación de la Unidad de Poder Auxiliar (APU) en todo este proceso y cómo es posible lograr eficiencias en costos a partir del reemplazo de esta unidad por medio de la incorporación de celdas de combustibles a base de Hidrógeno (Fuel Cells). Analizando la confiabilidad que hoy presentan los principales modelos utilizados en todo el mundo, dimensionando de forma inicial el costo que tiene el mantenimiento de este elemento en el campo de la aviación comercial.

Entendiendo la teoría detrás de las Fuel Cells, el nivel de confiabilidad y mantenibilidad que existen para una APU común se planeará la incorporación conceptual de una SOFC (Solid Oxide Fuel Cells) en una aeronave de pasajeros, la idea es dimensionar la unidad de acuerdo a los requerimientos de operación necesarios y se describen los principales componentes de la nueva batería.

Se revisará el contexto económico y financiero en el que se desenvuelve la industria aeronáutica entendiendo cuáles son sus principales costos y beneficios, el nivel de inversión que se genera junto con los principales indicadores o parámetros que ayudarán a entender la potencial incorporación futura de esta nueva tecnología. Además de la evaluación económica del proyecto Fuel Cell y el análisis de sensibilidad correspondiente que permita verificar la conveniencia de adoptar esta nueva tecnología en reemplazo de la APU tradicional.

Al final de la investigación será posible concluir lo siguiente:

1. Las Fuel Cells resultan una alternativa válida en la generación/producción de energía eléctrica a partir de una reacción electro-química que utiliza Hidrógeno y Oxígeno, y cuyo único producto de la reacción es agua y calor.
2. La eficiencia lograda por las FC sobrepasa el 40 % junto con una disminución considerable en el peso total de la batería (y del avión mismo) junto con las emisiones totales contaminantes (gases de efecto invernadero) se reducen en casi 620 toneladas de CO_2 por año.
3. La evaluación económica permite respaldar esta tecnología, bajo una tasa de descuento del 10 % y recuperación del capital invertido al término del cuarto año de ejecución del proyecto.
4. Al término de la vida del proyecto (10 años) se recupera todo el capital invertido obteniendo beneficios adicionales.



ABSTRACT

This report aims to make an introduction to the future energy problems that the commercial aviation industry in the world will face. Problems related to the consumption and generation of electric power inside aircraft, where alternatives that are currently in full development and that can become the solution for the next years will be reviewed.

Basic concepts related to the operation of the engines of an airplane and its participation in the generation of energy will be identified together with the expense that this produces and its impact on the environment. The participation of the Auxiliary Power Unit (APU) in this whole process will also be studied and how it is possible to achieve cost efficiencies from the replacement of this unit through the incorporation of fuel cells based on hydrogen (Fuel Cells). Analysing the reliability of today's main models used worldwide, initially dimensioning the cost of maintaining this element in the field of commercial aviation.

Understanding the theory behind the Fuel Cells, the level of reliability and maintainability that exist for a common APU will plan the conceptual incorporation of a SOFC (Solid Oxide Fuel Cells) in a passenger aircraft, the idea is to size the unit according to The necessary operation requirements and the main components of the new battery are described.

The economic and financial context in which the aeronautical industry operates will be reviewed, understanding its main costs and benefits, the level of investment that is generated along with the main indicators or parameters that will help to understand the potential future incorporation of this new technology. . In addition to the economic evaluation of the Fuel Cell project and the corresponding analysis of sensibility that allows to verify the convenience of adopting this new technology in replacement of the traditional APU.

At the end of the investigation it will be possible to conclude the following:

1. Fuel Cells are a valid alternative in the generation / production of electrical energy from an electro-chemical reaction that uses Hydrogen and Oxygen, and whose only product of the reaction is water and heat.
2. The efficiency achieved by the FC exceeds 40 % along with a considerable decrease in the total weight of the battery (and the aircraft itself) together with the total pollution emissions (greenhouse gases) are reduced by almost 620 tons of CO_2 per year.
3. The economic evaluation allows to support this technology, under a discount rate of 10 % and recovery of the capital invested at the end of the fourth year of execution of the project.
4. At the end of the life of the project (10 years) all the capital invested is recovered, obtaining additional benefits.



Índice de Contenidos

1. Introducción	1
2. Antecedentes Generales	3
2.1. Problemática	3
3. Objetivos	5
3.1. Objetivo General	5
3.2. Objetivos Específicos	5
4. Marco Teórico - APU	7
4.1. Antecedentes	7
4.2. Nichos Tecnológicos	7
4.3. El Hidrógeno como Nicho Tecnológico	8
4.4. Hidrógeno y FC en Aviones Comerciales	9
4.5. Base Teórica: Funcionamiento APU	10
4.5.1. Sistema de Combustible	12
4.5.2. Sistema de Aire Comprimido	13
4.6. Requerimientos de Potencia y Confiabilidad	15
4.6.1. Fuentes de Generación Eléctrica en un Avión	16
4.6.2. Motores Principales	18
4.6.3. APU	20
4.6.4. Análisis de Confiabilidad para APU: Conceptos Relevantes	20
4.6.5. Análisis Numérico Confiabilidad APU	23
4.6.5.1. Determinación de los parámetros por el Método de los Mínimos Cuadrados	24
4.6.5.2. Estimador Rango de Mediana	24
4.6.5.3. Consideraciones sobre el Parámetro de Localización	25
4.6.6. Resultados	25
4.6.6.1. Remociones No Programadas (UER): Modelo APU APS3200	25
4.6.6.2. Remociones Programadas: Modelo APU APS3200	28
4.6.6.3. Remociones No Programadas (UER): Modelo APU 131-9A	30
4.6.6.4. Remociones Programadas: Modelo APU 131-9A	31
5. Marco Teórico - Fuel Cells	35
5.1. Fuel Cells	35
5.1.1. El desarrollo de las Fuel Cells	35
5.1.2. Definición	36
5.1.3. Beneficios de las Fuel Cells	37
5.2. ¿Cómo opera una Fuel Cell?	38
5.2.1. Eficiencia y Características de Potencia	43
5.3. Tipos Fuel Cells	47
5.3.1. Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)	47
5.3.2. Direct Methanol Fuel Cells (DMFC)	48

5.3.3.	Alkaline Fuel Cells (AFC)	48
5.3.4.	Phosphoric Acid Fuel Cells (PAFC)	49
5.3.5.	Molten Carbonate Fuel Cells (MCFC)	49
5.3.6.	Solid Oxide Fuel Cells (SOFC)	50
6.	Análisis de Costos y Emisiones	53
6.1.	Análisis de Costos para las Fuel Cells	53
6.1.1.	Análisis de Costo	53
6.1.2.	Escenarios de Costos - Escenario Base	56
6.1.3.	Escenarios de Costos - Reducción del costo producción	57
6.1.4.	Escenarios de Costos - Reducción costo del Hidrógeno	58
6.2.	Análisis de Emisiones para las Fuel Cells	60
6.2.1.	Aviación Comercial y su impacto medioambiental	61
6.2.2.	Fuel Cells y su impacto medioambiental	63
7.	Dimensionamiento Técnico de una Fuel Cells	67
7.1.	Integración de una SOFC en BOEING 787	67
7.2.	Requerimientos de energía para B-787	67
7.3.	Configuración del Sistema SOFC	71
7.3.1.	Compresión de Aire	71
7.3.2.	Fuel Cell	71
7.4.	Diseño Conceptual FC a 8 [atm] y 0.825 [V/célula]	73
7.4.1.	Batería SOFC	75
7.4.2.	Compresor	76
7.4.3.	Cátodo Recuperador	76
7.4.4.	Combustor	76
8.	Análisis Financiero	79
8.1.	Contexto económico y financiero de una Aerolínea	79
8.2.	Cadena de Valor en el Transporte Aéreo	80
8.3.	Costos en las Compañías Aéreas	82
8.4.	Resultados Operacionales y Beneficios en la Aviación	86
8.5.	Beneficios Económicos del Transporte Aéreo en Chile	91
8.5.1.	La Conectividad y el Crecimiento económico a Largo plazo	92
8.5.2.	El Sector Aeronáutico y la Huella Económica	94
8.5.2.1.	Aerolíneas	96
8.5.2.2.	Aeropuertos y Servicios de Tierra	98
8.5.2.3.	Inversiones y Productividad	99
8.5.2.4.	Efectos catalíticos	100
8.6.	Evaluación económica Fuel Cell y APU	101
8.6.1.	Análisis de Costos	101
8.6.2.	Análisis de Emisiones	103
8.6.3.	Análisis Financiero	104
8.6.4.	Análisis de Sensibilidad	107
8.6.5.	Análisis de Riesgo	108
8.7.	Evaluación económica APU	109
9.	Conclusiones	111
	Bibliografía	115

Índice de Tablas

4.1. Principales procesos en el desarrollo de tecnología, comparación entre Nicho de Mercado y Nicho Tecnológico	8
4.2. Limitaciones Operacionales de una APU	15
4.3. Comparación sistemas eléctricos aviones comerciales Wide Body	20
4.4. Valor parámetros: forma, escala y localización - UER APS3200	26
4.5. Valor parámetros: forma, escala y localización - Remociones programadas APS3200	28
4.6. Valor parámetros: forma, escala y localización - Remociones no programadas 131-9A	30
4.7. Valor parámetros: forma, escala y localización - Remociones no programadas 131-9A	32
5.1. Parámetros de FC a máxima y mínima temperatura alcanzado por el Hidrógeno.	41
5.2. Reacciones electroquímicas en las diferentes tipos de FC	50
5.3. Características principales de los diferentes tipos de FC	51
6.1. Emisiones contaminantes por tipo de combustible.	64
7.1. Pesos estimados para los equipos de conversión	70
8.1. Inversiones del sector aeronáutico	100
8.2. Productividad laboral del sector aeronáutico	100
8.3. Costos iniciales proyecto	102
8.4. Analisis de Emisiones	103
8.5. Toneladas de CO_2 no emitidas al medio ambiente	103
8.6. Parámetros Financieros	104
8.7. Resumen de Costos/Ahorros del Proyecto	105
8.8. Flujo de Caja anual del proyecto	106
8.9. Variabilidad Financiera del proyecto	107
8.10. Sensibilización TIR con Costo Combustible y Costos Iniciales	107
8.11. Sensibilización TIR con Costo Operación/Mantenimiento y Costos Iniciales	107
8.12. Presupuesto y Gasto efectivo anual, reparaciones APU	109
8.13. Cantidad de remociones Programadas y No Programadas APU	109



Índice de Figuras

4.1. Estructura de una APU - Principales componentes	10
4.2. Ubicación física de una APU en un avión comercial	11
4.3. Sistema de alimentación combustible avión-APU	12
4.4. Sistema de combustible APU	13
4.5. Sistema de aire comprimido en APU	14
4.6. Sistema Eléctrico Avión conveccional - Avión más Eléctrico	16
4.7. Bus FV - Voltaje constante para un MEA	17
4.8. Configuración tradicional y nueva en distrubición de energía para aeronaves comerciales	18
4.9. (a) APU tradicional con sistemas eléctrico, hidráulico y neumático. (b) MES APU eléctrica	19
4.10. Costos asociados al nivel de confiabilidad de un elemento	21
4.11. Tasa de falla - Curva de la bañera	22
4.12. Distribución de Weibull	23
4.13. Regresión UER APS3200	26
4.14. Distribución Weibull: Caso UER APS3200	26
4.15. Tasa de Falla: UER APS3200	27
4.16. Tiempo Promedio de Uso: UER APS3200	27
4.17. Regresión remociones programadas APS3200	28
4.18. Distribución Weibull: Remociones Programadas APS3200	29
4.19. Tasa de Falla: Remociones Programadas APS3200	29
4.20. Tiempo Promedio de Uso: Remociones Programadas APS3200	30
4.21. Regresión remociones no programadas APU 131-9A	31
4.22. Distribución Weibull: Remociones No Programadas 131-9A	31
4.23. Tasa de Falla: Remociones no programdas 131-9A	32
4.24. Tiempo Promedio de Uso: Remociones no programadas 131-9A	32
4.25. Regresión remociones programadas APU 131-9A	33
4.26. Distribución Weibull: Remociones Programadas 131-9A	33
4.27. Tasa de Falla: Remociones programadas 131-9A	34
4.28. Tiempo Promedio de Uso: Remociones Programadas 131-9A	34
5.1. Comparación conversión de energía entre FC y planta de poder.	37
5.2. Reacción electroquímica de una Fuel Cell	39
5.3. Sistema RCF	39
5.4. Configuración de una FC - conductor protón hidrógeno	40
5.5. Configuración de una FC - conductor ión oxígeno	40
5.6. Conjunto de Fuel Cells	42
5.7. Potencial de una Fuel Cell	44
5.8. Potencial de corriente vs densidad para tipos de FC existentes	46
6.1. Factor de Carga - Comportamiento Variable	55
6.2. Costo para FC - Escenario Base	57
6.3. Costo para FC - Escenario Reducción costo producción	58
6.4. Costo para FC - Escenario Reducción costo hidrógeno	59

6.5. Voltaje óptimo a la potencial nominal y eficiencia correspondiente en función del costo de la Fuel Cell	60
6.6. Proyección demanda versus volumen de yacimientos a descubrir (1905-2040)	61
6.7. Estimaciones de potencia radiativa promedio global de aeronaves subsónicas en 1999	63
6.8. Número de GWP por kilogramo de contaminante en función de la altitud	65
7.1. Consumo eléctrico B-787 en fases de vuelo	68
7.2. Consumo eléctrico B-787 en fase crucero	69
7.3. Sistema eléctrico B-787 reconfigurado con SOFC	70
7.4. Configuración FC para B-787	72
7.5. Eficiencia e impacto del peso como función del voltaje y de la presión de la FC	73
7.6. Diseño conceptual de SOFC	74
7.7. Soporte aislante y protector de SOFC	75
8.1. Cadena de Valor del transporte Aéreo	81
8.2. Variación 2015-2016 CASM	84
8.3. Distribución de costos para Operadores Network y Low Cost	85
8.4. Evolución costo combustible 2010-2016	86
8.5. Margen operacional histórico operadores Network y Low Cost	87
8.6. Margen operacional de acuerdo al tipo de operación doméstica/internacional	88
8.7. Comparación RASM y CASM	89
8.8. Operador Network doméstico - Load Factor y Break-even Load Factor	90
8.9. Operador Network internacional - Load Factor y Break-even Load Factor	90
8.10. Red de transporte aéreo en Chile	92
8.11. Conectividad aérea por país	94
8.12. Huella económica del Sector de Aviación en Chile	95
8.13. Huella económica del Sector de Aviación en Chile	96
8.14. Distribución regional de los vuelos de pasajeros programados originados en Chile.	97
8.15. Producto y empleos chilenos sostenidos por el sector aeronáutico	98
8.16. Distribución regional de los viajes de pasajeros chilenos	99
8.17. DLlegadas de visitantes extranjeros, según modo de transporte – año 2009	101
8.18. Modelo de FC utilizado para evaluación vía RETScreen	102
8.19. Reacción al interior de FC y productos	104
8.20. Gráfico evolución flujo caja acumulado proyecto Fuel Cells	106
8.21. Histograma de frecuencias TIR	108
8.22. Gráfico de Impacto	109

1 | Introducción

La energía se encuentra hoy en el primer puesto de un listado de problemas que enfrentará la humanidad en los próximos 50 años, supera a otros tan importantes como: agua, comida, medio ambiente, pobreza, terrorismo, guerras, enfermedades, educación o política. De acuerdo al Annual Energy Outlook 2017 ([EIA, 2017](#)) se estima que el crecimiento en el consumo energético a nivel mundial aumente en 1 % por año entre 2016 y 2040. La competencia mundial por fuentes de energía acrecienta la tensión entre las potencial, siendo el desarrollo de nuevas alternativas una de las mejores soluciones a corto plazo.

Se estima que:

1. Las reservas de combustible fósil no serán suficientes para satisfacer la demanda más allá del 2050.
2. Una sobre confianza en combustibles fósiles (localizados en regiones políticamente inestables como Medio Oriente, Asia Central o África) tendrá graves implicancias políticas y medio ambientales.

Hoy, el mundo depende en gran medida del carbón, petróleo y gas natural como fuentes de energía primaria. Estas fuentes de energía no renovables eventualmente disminuirán y serán cada vez más costosas en producción, distribución y almacenamiento. Por lo tanto, para lograr una sustentabilidad futura en recursos se deben buscar y desarrollar nuevas fuentes.

El Hidrógeno aparece como una solución viable en el corto-mediano plazo ([Berry et al., 1996](#)). Este elemento puede ser extraído de muchas fuentes, en particular del agua, usando energías no fósiles como la solar, eólica o nuclear. Además, como compuesto es abundante y puede encontrarse en muchos otros compuestos orgánicos; una vez separado puede quemarse y ser utilizado como combustible o convertirlo en electricidad a través de celdas de combustible (Fuel Cells) ([Bennaceur et al., 2005](#))

En la industria de la aviación comercial, la dependencia del petróleo es total. El combustible utilizado en los aviones representa para una aerolínea aproximadamente el 33 % de sus costos operacionales. De acuerdo con esto, cualquier optimización o eficiencia que pueda lograrse permitirá ahorros considerables, por esto no es de asombrarnos que los grandes fabricantes de aeronaves comerciales cada vez se esfuercen más en desarrollar e incorporar la mejor tecnología en cuanto a eficiencia en el uso del combustible para los motores del avión ([Whyatt and Chick, 2012](#)). Sin embargo, aún existe una forma de alcanzar una mayor eficiencia a partir de un componente que hasta el día de hoy no se le ha dado la importancia que merece dentro del avión, la unidad de poder auxiliar (APU). El potencial reemplazo de esta unidad por celdas de combustibles a base de Hidrógeno, permitirían lograr ahorros operaciones y de mantenimiento considerables para la aerolínea ([Verstraete, 2015](#)).



2 | Antecedentes Generales

2.1. Problemática

Es posible realizar un simple ejercicio: considerar un vuelo con capacidad para 100 pasajeros, con una tarifa (ida y regreso, más tasas de embarque) dentro de Chile por US\$ 290 en promedio (CLP 192.850 aproximadamente); se estima que el beneficio por pasajero transportado oscile entre US\$ 0,76 – US\$ 1,2, lo que para el ejemplo representa aproximadamente CLP 79.800 en total ([IATA, 2016](#)).

El ejercicio anterior, representa muy bien que las utilidades obtenidas por una aerolínea son muy bajas, esto por los elevados costos operacionales en que tiene que incurrir para mantener estándares cada vez más exigentes en la industria. Desagregando estos costos operacionales se pueden identificar como principales: combustible y mantenimiento.

El uso de fuentes alternativas de combustible ha sido el mayor reto en la última década para la industria aérea, el desarrollo y utilización de bio-combustibles es crucial para el progreso tecnológico y económico en este mercado. La Asociación Internacional de Transporte Aéreo (IATA) ha sido el principal catalizador para lograr avances significativos en este camino junto a las 260 líneas aéreas que componen esta asociación. No obstante, los costos de inversión que se requiere para llegar a un pleno desarrollo muchas veces contrastan con los potenciales beneficios que no compensan mejorar la situación actual.

La energía se encuentra hoy en el primer puesto de un listado de problemas que enfrentará la humanidad en los próximos 50 años. Superando a otros tan importantes como: agua, comida, medio ambiente, pobreza, terrorismo, enfermedades, educación, etc. De acuerdo al Annual Energy Outlook 2017 ([EIA, 2017](#)) se estima que el crecimiento del consumo energético a nivel mundial aumente en 1 % anual entre 2016 y 2040.

La competencia mundial por fuentes de energía, creará tensión entre las potencias, a menos que se desarrollen nuevas fuentes alternativas ya que:

1. Las reservas de combustible fósil, no serán suficientes para satisfacer la demanda más allá del 2050.
2. Una excesiva confianza en combustibles fósiles (localizados en regiones políticamente inestables como Medio Oriente, Asia Central o África) tendrá implicancias políticas y medio ambientales.

El mundo depende en gran medida del carbón, petróleo, y el gas natural como fuentes de energía primaria. Estos combustibles (provenientes de fuentes no renovables) eventualmente disminuirán en cantidad y cada vez serán más costosos o medioambientalmente más nocivos. Por lo que, para lograr una sustentabilidad futura de energía se deben desarrollar nuevas fuentes.

Para un avión, las principales fuentes de consumo de combustible son sus motores principales (normalmente dos) y un motor secundario llamado APU (Auxiliary Power Unit), para los motores principales se estima un consumo de combustible cercano a los $2.500 \left[\frac{kg}{h} \right]$ y para la APU unos $180 \left[\frac{kg}{h} \right]$. Entendiendo tal nivel de consumo durante una operación normal es posible comprender el alcance que puede llegar a

tener, a nivel económico como medio ambiental, el uso de fuentes alternativas de energía en la aviación. La tecnología de los motores evoluciona al menos cada una década, hoy los esfuerzos se concentran en hacerlos mucho más eficientes (motores de última generación llegan a un 15 % menos de consumo combustible) y confiables, pero el trabajo realizado sobre los motores no ha significado un progreso considerable en el APU.

Es por esto que, bajo un pronóstico poco alentador en cuanto a oferta de fuentes no renovables de combustible y el potencial ahorro que significa reducir costos en combustibles es imposible no cuestionar la posibilidad de identificar un potencial reemplazo operacionalmente igual o más confiable y eficiente para la unidad de poder auxiliar (APU).

La respuesta puede encontrarse en el Hidrógeno. Este elemento surge, a mediano-largo plazo, como una nueva forma de energía, puede ser extraído de muchas fuentes; en particular del agua, usando energías como la solar, eólica o nuclear ([Commission et al., 2003](#)). Como elemento, es abundante y puede encontrarse en muchos otros compuestos orgánicos, una vez separado puede quemarse y ser utilizado como combustible o convertirlo en electricidad a través de celdas de combustibles (Fuel Cells). Desarrollar este tipo de energía puede convertirse en una solución viable para la industria aérea, en cuanto al reemplazo de las unidades de poder auxiliar a base de petróleo y disminuyendo los elevados costos de mantenimiento ([Agnolucci and McDowall, 2007](#)).

No obstante lo anterior, es necesario plantear la siguiente pregunta: ¿Es posible proponer un cambio tan radical, en una industria que históricamente ha evolucionado humana y tecnológicamente en forma conjunta con el petróleo como fuente única de energía? La respuesta puede parecer sencilla, sin embargo, aún se debe desarrollar un estudio profundo del tema; la aviación como industria es una de las más reguladas del mundo, incorporar tecnologías requieren años incluso décadas para certificarse como elementos de uso aeronáutico por lo que quizás la pregunta a plantear sea otra: ¿Son las Fuel Cells la puerta a un nuevo futuro en la aviación? ¿El desarrollo del Hidrógeno como fuente de combustible alternativo, es el primer paso para extender el uso no sólo en la aviación sino a todos los medios de transporte?

3 | Objetivos

3.1. Objetivo General

Estudiar la viabilidad de reemplazar el APU de un avión comercial por celdas de combustible a base de hidrógeno, mediante una validación técnica y económica que permita determinar a futuro las ventajas teórica de uso y ahorro en costos.

3.2. Objetivos Específicos

1. Comprender la definición y aplicación del concepto nicho tecnológico, entendiendo cómo el Hidrógeno entra en esta clasificación y su potencial desarrollo como fuente de energía alternativa.
2. Comprender el funcionamiento técnico de una fuente de poder auxiliar (APU) utilizada en un avión comercial. En particular el sistema de combustible y sistema de aire neumático.
3. Evaluar técnicamente los tipos de Fuel Cells (celdas de combustible) disponibles en la industria, identificando la mejor opción que cumpla con los requisitos operacionales buscando la validez de su utilización en una aeronave comercial.
4. Evaluar la factibilidad financiera de implementar el uso de una celda de combustible, entendiendo potenciales ahorros en combustible y mantenimiento para la aerolínea.



4 | Marco Teórico - APU

4.1. Antecedentes

Las innovaciones o transiciones tecnológicas a gran escala, se han valido de nichos estructurales o de re-diseño de algún elemento (componente electromecánico) particular que compone un sistema mayor para generar un salto tecnológico. Estos nichos se han convertido en incubadoras para desarrollar nuevas tecnologías (Geels, 2002).

En la literatura existen dos concepciones para un nicho: *nicho de mercado* y *nicho tecnológico*; la distinción entre uno y otro se relaciona con el horizonte de tiempo en el que se evalúa. Los nichos tecnológicos promueven tecnologías pensadas a ofrecer potenciales beneficios en el *futuro*. Por otra parte, en un nicho de mercado los consumidores con necesidades particulares valoran las tecnologías existentes que pueden mejorar su desempeño *actual*.

4.2. Nichos Tecnológicos

Comúnmente los nichos tecnológicos se manifiestan mediante la formación de asociaciones o grupos, que desarrollan actividades de demostración y despliegue, buscando obtener recursos para la tecnología y ampliando redes de promoción. En términos físicos, los nichos tecnológicos existen a través de “experimentos socio-técnicos” (Brown et al., 2003) que se centran en el aprendizaje sobre la tecnología en un contexto social y real.

En el momento en que una tecnología entra por primera vez al mercado, ya ha experimentado un proceso de desarrollo que involucra a ingenieros, académicos, inversionistas, entre otros. La etapa previa a la comercialización se caracteriza por un desarrollo en “espacios protegidos” (Elzen et al., 2003). Las tecnologías en esta fase requieren protección especial del mercado, ya que pueden ser consideradas “monstruosidades esperanzadoras” (Mokyr, 1990) cuyo desempeño es bajo, pero con potenciales futuros aún no calculados.

Schot y Geels (Schot and Geels, 2007) definen estos espacios protegidos o *nichos tecnológicos como proto mercados creados para probar y desarrollar nuevas tecnologías para nichos de mercados más grandes*.

Se debe entender que, la supervivencia de un nicho tecnológico depende de las expectativas positivas sobre el futuro núcleo tecnológico (mercado). La visión y expectativa de futuro traen consigo un amplio rango de actores necesarios para crear el nicho y comprometer su protección. Finalmente, un punto importante que se debe entender es el siguiente: cuando una tecnología supera la barrera de desarrollo y entra a un mercado competitivo, las actividades dentro del nicho nunca terminan. Las redes y participantes que promueven la tecnología no se detienen, crecen y se adaptan.

A continuación se presenta una tabla comparativa entre nicho tecnológico y nicho de mercado:

Tabla 4.1: Principales procesos en el desarrollo de tecnología, comparación entre Nicho de Mercado y Nicho Tecnológico

Proceso	Nicho Tecnológico	Nicho de Mercado
Economías de escala Interna	Limitada - Excepto si se cuenta con un gran despliegue o soporte del Estado.	Importantes - El impacto depende del tamaño del mercado y de la organización de la industria.
Economías de Escala Externa	Establecer redes de soporte desarrollo es un elemento clave, aunque sus efectos económicos son limitados a los pequeños niveles de producción.	El impacto depende del tamaño del mercado y la organización de la industria.
Expectativas	Expectativas positivas continuas son importantes para el desarrollo y expansión del nicho. Son parte fundamental para motivar a los actores del proyecto.	El éxito en un nicho de mercado puede estimular expectativas positivas sobre el futuro de una tecnología, lo que a su vez puede ayudar a movilizar inversiones.
Experiencia del Usuario	Ocurre en experimentos de demostración y despliegue a través de la interacción con usuarios especializados.	Probablemente sea muy importante, especialmente cuando el nicho comienza a incluir usuarios no especializados.
Efectos de red, tecnologías complementarias, infraestructura	Se limita a aprender sobre la infraestructura y las necesidades tecnológicas complementarias.	Puede ser importante, dependiendo del mercado.
Ingresos	Muy limitado, sólo se produce en los programas de demostración y adquisición a gran escala.	El impacto depende del tamaño del nicho de mercado y de la organización de la industria - Puede ser significativo.

4.3. El Hidrógeno como Nicho Tecnológico

Las unidades de poder auxiliar (APU) son una de las aplicaciones más tempranas y prometedoras de las fuel cells (FC). El objetivo de las FC, es proveer energía y calor para los servicios de a bordo en una aeronave, tales como: entretenimiento, calefacción y aire acondicionado; normalmente para los cuales un motor a combustión interna no es eficiente. Bajo esta condición, las APU pueden mejorar la eficiencia de la generación, reducir las emisiones, prolongar la vida del motor y disminuir el ruido.

Existen dos tecnologías de FC que compiten para aplicaciones en APU. Células de combustible de membrana de intercambio de protones (PEMFC) y células de combustible de óxido sólido (SOFC). Muchas publicaciones discuten las ventajas y desventajas de las PEMFC y SOFC, algunos autores consideran que las SOFC son la mejor opción ([Baratto et al., 2005](#)); sin embargo otros consideran a las PEMFC como la alternativa más competitiva ([Brodrick et al., 2002](#)). No obstante, ambas tecnologías tienen el potencial para ser utilizadas en diferentes aplicaciones.

El interés por desarrollar una FC APU es el resultado del considerable aumento en la demanda de energía eléctrica a bordo de aeronaves civiles, considerando como ejemplo un avión comercial: el aire acondicionado, los sistemas de entretenimiento a bordo, comida y bebidas calientes y otras funciones se han vuelto un estándar; en adición, los pasajeros cada día son más exigentes por contar con conexión a internet en cualquier lugar y momento. Todo esto representa un consumo y generación adicional de energía a bordo de la aeronave, generando más estrés al sistema de motores principales los que no han sido diseñados directamente para soportar una carga de tal nivel. Es por esto que se debe comenzar a considerar la incorporación de nuevas tecnologías que den soporte al sistema principal y que al mismo tiempo no sean una fuente extra de consumo de combustible y contaminación como serían los motores. La principal alternativa, Fuel Cells, ya han recorrido un largo camino de desarrollo y mejora, y son la principal opción en el corto plazo de ser la respuesta ante

este problema.

4.4. Hidrógeno y FC en Aviones Comerciales

En la última década, la aplicación de las FC en la aviación comercial ha presentado un desarrollo notable, se han realizado diversas investigaciones por parte de los grandes fabricantes de aeronaves, Boeing y Airbus, para integrar estas celdas de combustibles en diseños futuros. Las investigaciones apuntan a potenciales usos como: sistemas de poder a bordo para proveer energía durante los vuelos de rutina, sistemas de poder de emergencia y sistemas de poder auxiliar terrestres en aeropuertos.

La fuente de poder auxiliar que hoy utilizan los aviones comerciales (APU) tiene como principal función: el encendido de los motores, los sistemas de aviónica, sistemas de control ambiental (aire acondicionado de la cabina), los dispositivos anti-hielo y la operación de *taxeo*¹ del avión (como medida de seguridad en caso de falla de un motor, se mantiene la APU encendida). Un APU normal no es más que un motor de combustión interna, que opera a una eficiencia de ciclo menor al 20 % contribuyendo con el 20 % de todas las emisiones terrestres en un aeropuerto (Elitzur et al., 2017). El uso de una FC como APU, disminuye considerablemente las emisiones y el ruido junto con reducir el consumo total de combustible en un avión.

Las principales ventajas asociadas al uso del hidrógeno en celdas de combustible (FC) en aviones comerciales son:

1. **Reducción de emisiones CO_2 :** reducción considerable de emisiones CO_2 y óxidos de Nitrógenos NO_x . La comisión Europea para la aviación comercial establece que al 2050 los objetivos en materia de protección al medio ambiente deben lograr una reducción del 75 % de las emisiones de CO_2 y un 90 % las emisiones de NO_x por pasajero-kilómetro (Flightpath, 2011).

La aviación mundial es responsable casi de un 2 % de las emisiones globales de CO_2 . Para el 2030 se prevé un aumento sustancial del tráfico aéreo con un crecimiento continuo hasta 2050. Por lo tanto el aumento del ruido y las emisiones afectarán la calidad del aire local y al clima mundial (Fleming and Ziegler, 2013). Investigaciones recientes han logrado demostrar que el uso de FC tiene el potencial para disminuir la cantidad de combustible utilizado en la generación de electricidad en un 30 %, lo que significa, si una flota de 1.000 aviones equipados con celdas de combustible pueden lograr una reducción de más de 20.000 toneladas de CO_2 por año (Pratt et al., 2013).

Finalmente, el Departamento de Energía de Estados Unidos (DOE) ha publicado que el uso de FC para APU (fuentes de energía auxiliar) en aviones puede reducir entre un 2 % y 5 % el total de combustible utilizado por la Fuerza Aérea Norteamericana, ahorrando entre 1 y 3 millones de barriles de jet fuel (Wachsman et al., 2012).

2. **Operación menos ruidosa:** la operación de las FC es prácticamente silenciosa, permitiendo la operación de aeronaves en aeropuertos con restricciones en los niveles de ruido.
3. **Eficiencia en la generación de electricidad:** las FC exhiben una alta eficiencia en la generación de energía, aproximadamente el 50 % de la reacción química entre el hidrógeno y oxígeno se convierte en electricidad. En cambio, la eficiencia en el suministro de electricidad por parte de los generadores de una APU convencional alcanza un 30 % (Renouard-Vallet et al., 2010).
4. **Eficiencia térmica:** el calor liberado por las FC puede ser utilizado para el sistema anti-hielo de las alas, para calentar agua y comida en los galleys del avión, e incluso para calentar el combustible de los motores principales en la cámara de combustión aumentando el rendimiento.
5. **Reducción de cableado interno:** cuando se utilizan FC como fuente de energía, se pueden ubicar en distintas partes del avión, particularmente cerca del punto de uso. A diferencia del diseño tradicional

¹Tránsito que realiza una aeronave entre la loza del aeropuerto y la pista de despegue

donde la potencia generada viene exclusivamente desde la APU (ubicada en la cola del avión). Lograr la mínima distancia entre la fuente generadora y el lugar de uso, aumenta la eficiencia de distribución de potencia.

6. **Generación de gases inertes:** el gas de escape producido por el cátodo de una FC es un aire pobre de oxígeno (un gas inerte) esto permite reducir el riesgo de vapores inflamables aumentando la seguridad del vuelo.

4.5. Base Teórica: Funcionamiento APU

La fuente de poder auxiliar o APU (auxiliary power unit) es un pequeño motor a combustión diseñado especialmente para proveer de energía eléctrica y aire cuando los motores principales se encuentran apagados. Incorpora un sofisticado sistema de control que, al recibir una señal de arranque desde la cabina permite iniciar su marcha manteniendo una velocidad constante bajo cargas variables y controlando continuamente su propio funcionamiento, el que puede suspender si se produce alguna actividad anormal en la operación.

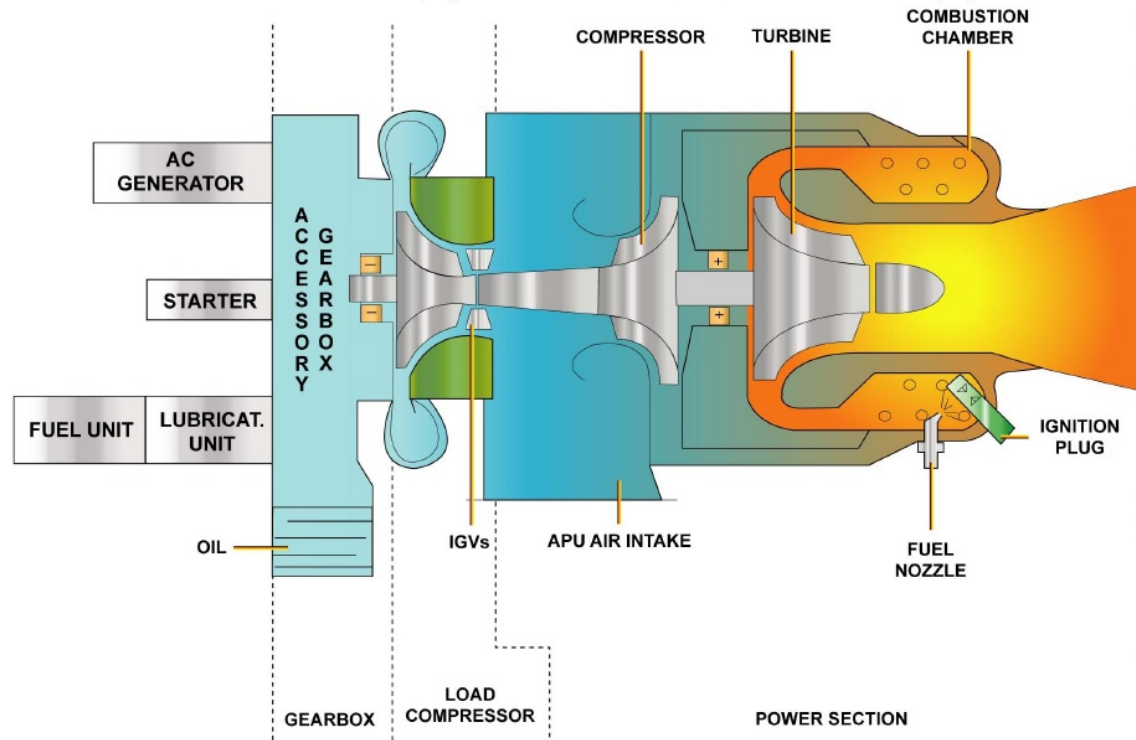


Figura 4.1: Estructura de una APU - Principales componentes

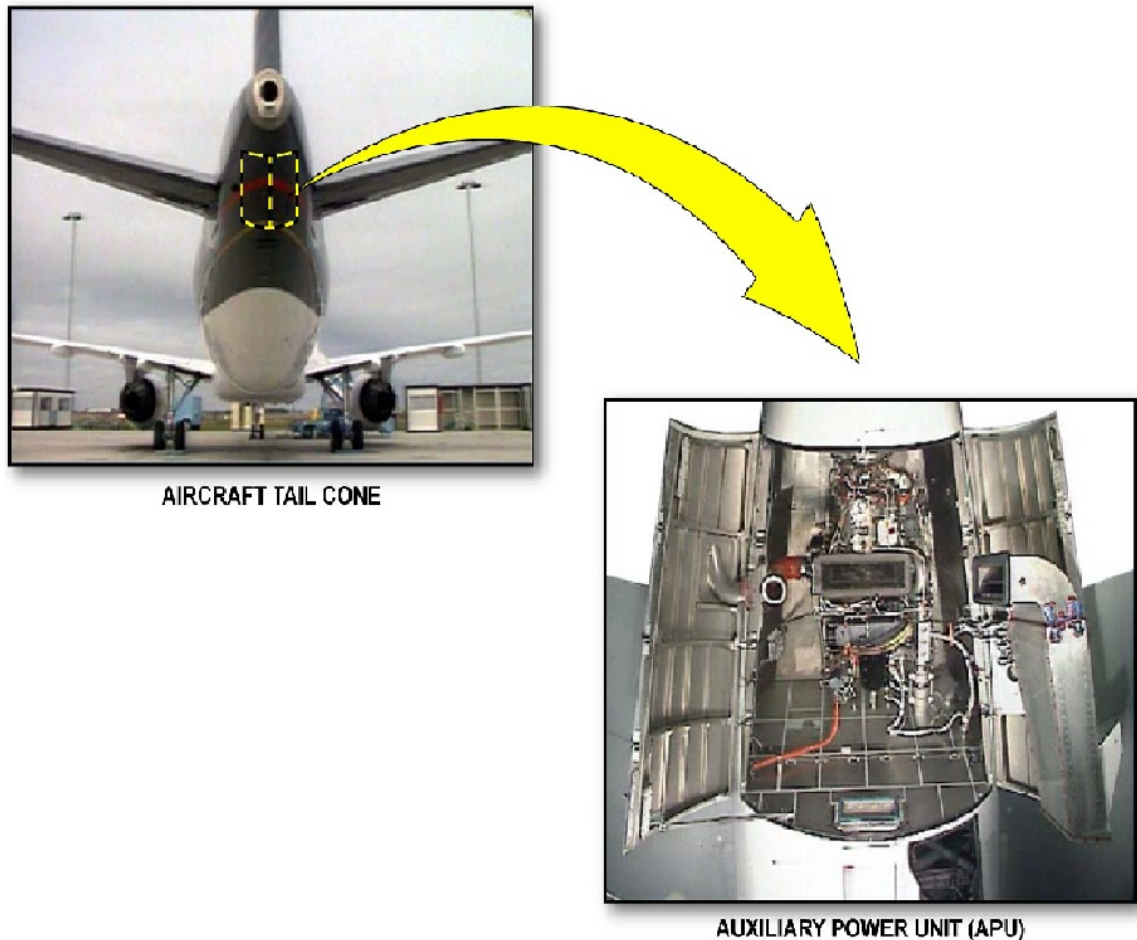


Figura 4.2: Ubicación física de una APU en un avión comercial

El APU proporciona tres funciones básicas a bordo de un avión:

1. Puesta en marcha de los motores principales.
2. Energía eléctrica para todos los sistemas de abordo.
3. Aire comprimido para los servicios del avión, cuando éste se encuentra en tierra, y opcionalmente en vuelo.

Según la fase de operación del avión, las funciones anteriores se pueden clasificar de la siguiente forma:

- **En tierra:** el APU entrega aire comprimido para la puesta en marcha de los motores y para el sistema de aire acondicionado. Además, proporciona energía eléctrica a todos los sistemas de abordo.
- **En vuelo:** el APU actúa como fuente neumática o eléctrica de emergencia para otros sistemas del avión.
- **Aterrizaje:** al apagar motores, permite continuar con el avión energizado.

La estructura principal de una APU se divide en tres secciones ver **Figura 4.1:**

1. **Gearbox (Caja de Accesorios):** se encarga de transmitir la potencia del eje principal de la APU al generador y a los accesorios: Starter Motor, Cooling Air Fan, Lubrication Unit y Fuel Control Unit (FCU).

2. **Load Compressor (Compresor de Carga):** compresor centrífugo de una etapa que provee de aire sangrado² (bleed air) al sistema neumático.
3. **Power Section (Sección de Poder):** compresor centrífugo de una etapa que provee de energía para mantener el APU en funcionamiento.

4.5.1. Sistema de Combustible

El sistema de combustible, suministra el combustible requerido para mantener la combustión. Parte del combustible se utiliza como fuerza-músculo (medio para mover actuadores del APU).

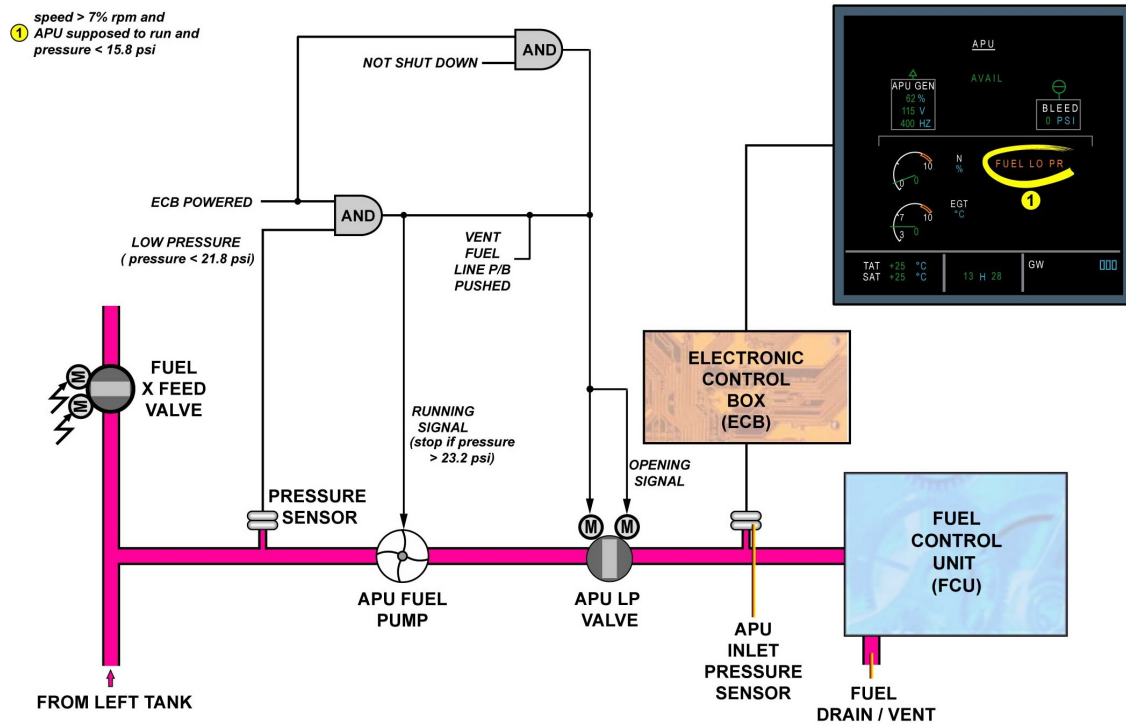


Figura 4.3: Sistema de alimentación combustible avión-APU

El APU se alimenta del combustible que proviene del tanque del ala izquierda del avión. Puede utilizar el combustible del ala derecha en caso de ser necesario, a través, de una *válvula de alimentación cruzada*. Un *sensor de presión* mide la fuerza con que ingresa el combustible comunica pérdidas significativas o exceso de presión que puedan afectar el funcionamiento normal de la unidad. Si ocurre una disminución en la presión una *bomba de combustible* inicia su funcionamiento para retornar a la presión correcta. Finalmente el combustible llega a la FCU (unidad de control de combustible).

La FCU proporciona combustible a alta presión para la combustión, las principales funciones son:

1. Filtrando de combustible
2. Incremento de presión
3. Medición de combustible
4. Corte de suministro de combustible
5. Regulación presión músculo del combustible

²Aire comprimido que se extrae de la etapa del compresor de un motor

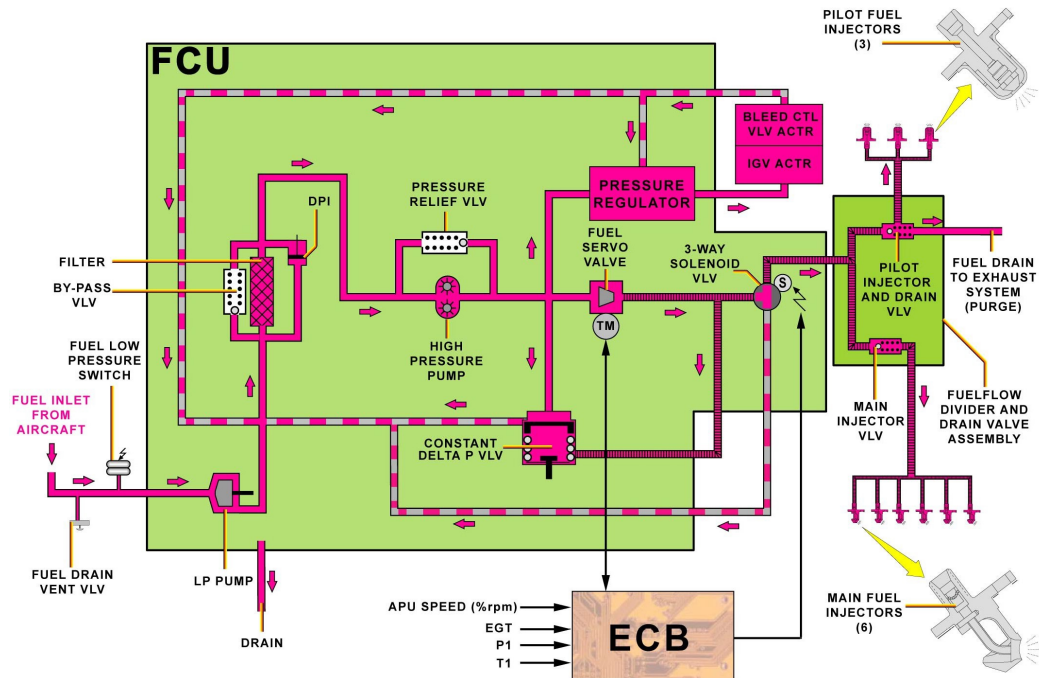


Figura 4.4: Sistema de combustible APU

Cuando el suministro de combustible llega desde la aeronave (tanque ala izquierda) a la FCU, se *filtra* y se *monitorea* continuamente. El combustible fluye internamente, atraviesa una *bomba de alta presión* regulada por una *servo-válvula*; la presión entregada por la bomba es protegida por una *válvula de alivio*. La servo-válvula de la FCU regula el flujo de combustible a la sección de poder, el flujo es controlado por la *válvula solenoide de 3 vías* (controlada por la ECB); cuando la válvula de 3 vías se abre el flujo se distribuye en dos colectores que contienen a los *inyectores*.

Durante la secuencia de arranque del APU, el combustible es suministrado a *tres inyectores primarios*, cuando la presión interna aumenta y alcanza un determinado nivel el combustible ingresa a otros *seis inyectores secundarios* así cuando la APU ya está operativa todos los inyectores proveen un flujo de combustible constante y uniforme para generar la combustión.

4.5.2. Sistema de Aire Comprimido

El sistema de aire provee de aire comprimido al avión cuando este se encuentra en tierra y en vuelo.

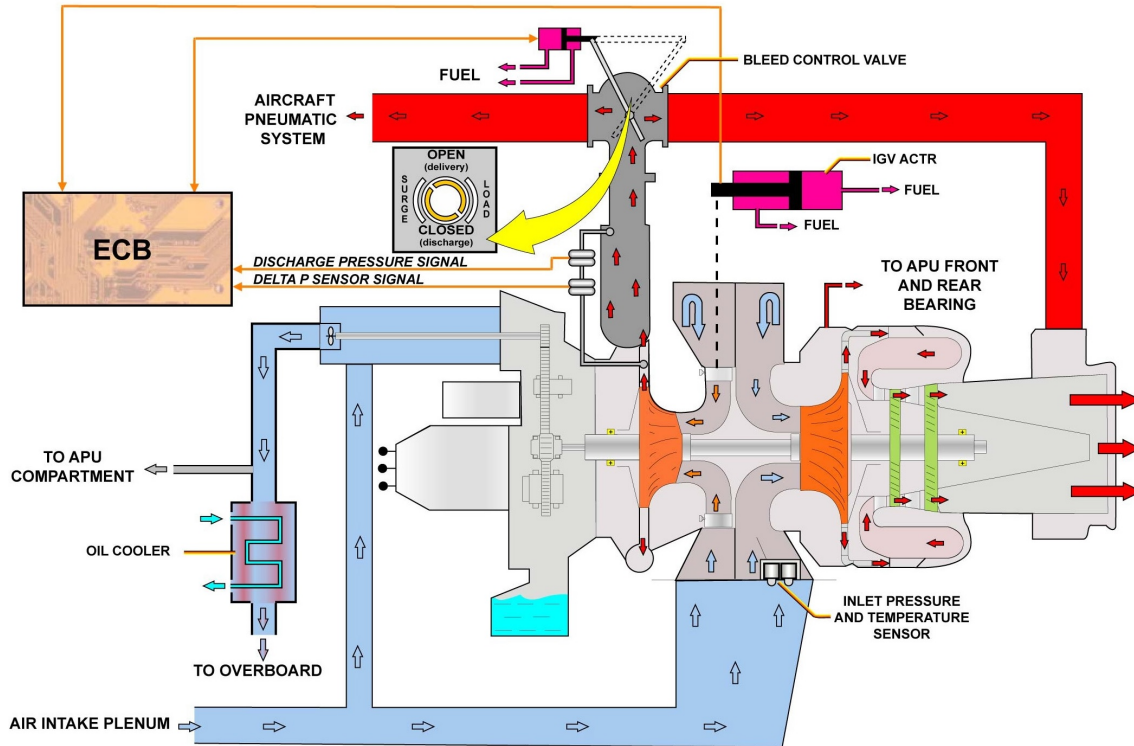


Figura 4.5: Sistema de aire comprimido en APU

El flujo de aire ingresa por el compartimiento del *Plenum* ubicado en la parte inferior de la APU, este flujo entrante puede tomar tres caminos:

1. Sección de Poder
2. Compresor de Carga
3. Cooling Fan

El flujo de aire que va a la sección de poder es utilizado en la combustión, para evitar pérdidas o una combustión incompleta el flujo es monitoreado por un sensor de presión/temperatura instalado a la entrada del compresor de carga. Los datos recopilados son utilizados para dosificar la entrada de combustible y el control del compresor de carga (IGV). El flujo de aire que va al compresor de carga es controlado por una hilera de IGV (Inlet Guide Vanes) pequeñas aletas que se mueven uniformemente para permitir la entrada de aire. La válvula de bleed controla el flujo de aire que va al sistema neumático del avión o al escape del APU (aire no utilizado), esta válvula se abre o cierra a partir de la fase en que se encuentre la APU (arranque o en servicio).

Luego de revisar los principales sistemas del APU y su funcionamiento se presenta la siguiente tabla resumen:

Tabla 4.2: Limitaciones Operacionales de una APU

Operación	Limitante
Desempeño Operacional	Altura de operación: -1.000 [ft] - +39.000 [ft] Temperatura de operación: -70 [°C] - +55 [°C]
Temperatura del Aire de entrada	Temperatura máxima permitida a la entrada: 55 [°C]
Tiempo de Arranque	Menos de 90 [s]
Limitación Eléctrica	90 [kVA] nominales
Nivel de Aceite	Nivel máximo: 3,8 [L] Nivel mínimo: 2,6 [L]
Presión de Aceite	Operación Normal: 50-60 [psig] Baja presión (provoca corte de APU): 35 [psig]
Temperatura de Aceite	Máxima temperatura de aceite: 135 [°C]
Aire de Sangrado	Flujo mínimo: 1,6 [kg/s] (2.55 [lb/s]) Presión mínima: 289,6 [kPa] (42 [psig])
Temperatura de Gases de Salida	Máximo continuo: 557 [°C] Sobre temperatura (corte de APU): 670-760 [°C]
Velocidad de Rotación	Operación normal: 49.300 RPM

4.6. Requerimientos de Potencia y Confiabilidad

La industria de la aviación se mueve cada vez más hacia aviones completamente eléctricos, este concepto se conoce actualmente como: *MEA, More Electronic Aircraft*. La tendencia apunta a reemplazar los sistemas hidráulicos y neumáticos por sistemas eléctricos que proporcionan más confort en su uso y monitoreo; junto con una mayor capacidad de mantenimiento, confiabilidad, seguridad en el vuelo y eficiencia en el uso ([Abdel-Fadil et al., 2013](#)).

Los aviones convencionales utilizan una combinación de sistemas: hidráulicos, neumáticos, eléctricos y mecánicos para transferir energía al interior de la aeronave. Sin embargo la creciente demanda de electricidad, presiona cada vez más a reemplazar el conjunto de sistemas por un único y potente sistema de distribución de poder. El concepto de *aviones más eléctricos (MEA)* implica aumentar el uso de energía eléctrica que permita controlar los subsistemas del avión, con el objetivo de sustituir por completo cualquier otra forma no-eléctrica de producción de energía. Esta idea fue aplicada en un inicio para uso militar, con el objetivo de disminuir el peso del avión, reducir los costos de mantenimiento y aumentar considerablemente el desempeño y confiabilidad.

En el futuro se espera que los sistemas de energía de una aeronave utilizarán sistemas híbridos DC y AC multi-voltajes (requerimiento de varios convertidores). El sistema eléctrico de los aviones modernos utiliza un sistema mixto de voltaje de cuatro tipos: 405 VAC (frecuencia variable), 200 VAC, 28 VDC y 240 VDC.

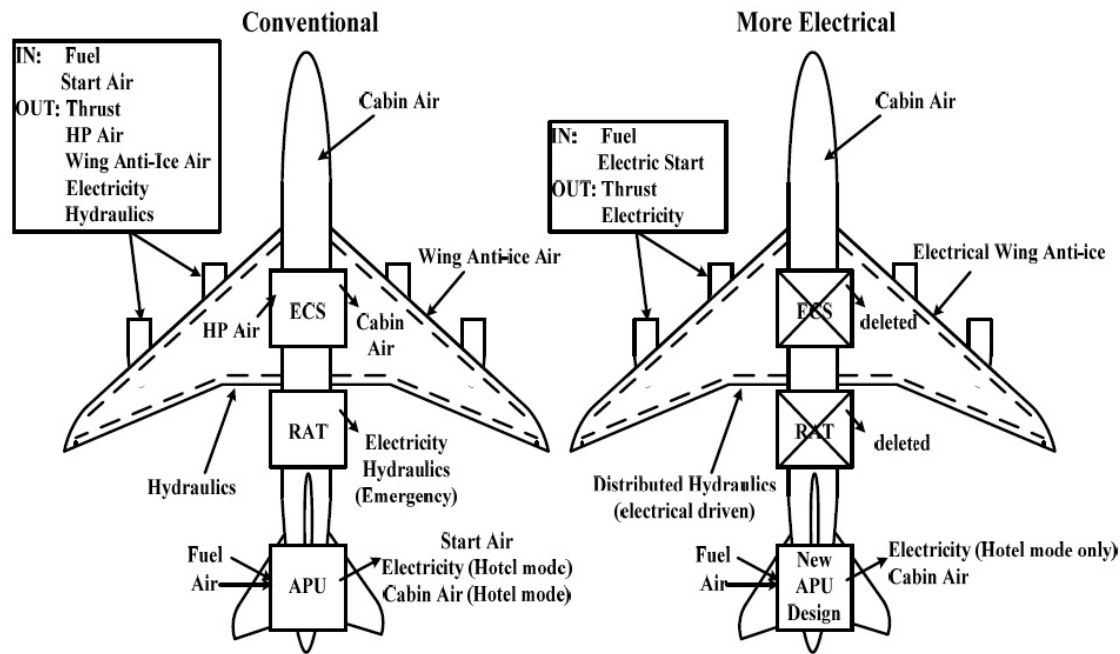


Figura 4.6: Sistema Eléctrico Avión conveccional - Avión más Eléctrico

El sistema eléctrico de un avión consiste de dos o más generadores impulsados por los motores principales, estos suministran las cargas AC a través de toda la aeronave. La energía DC proviene de la rectificación de energía AC, esto se obtiene por medio de las unidades rectificadoras (TRUs).

4.6.1. Fuentes de Generación Eléctrica en un Avión

Los sistemas de energía de las aeronaves han avanzado mucho en los últimos años debido a la creciente dependencia de electricidad al interior de la cabina.

Las aeronaves convencionales comúnmente utilizan una línea neutral de 115 [V] con una frecuencia de 400 [Hz]. Bajo esta arquitectura, el generador está conectado al motor principal por medio de un eje mecánico, que mantiene una velocidad constante y, por lo tanto la frecuencia eléctrica en la barra (o bus eléctrico) de la aeronave. Debido a que muchas funciones importantes al interior del avión como: el encendido de motores, sistema de control ambiental, sistema anti-hielo e hidráulico, no son alimentados por energía eléctrica, la generación de electricidad requerida por motor es menor para los aviones más modernos (aquellos que incorporan el concepto MEA, como por ejemplo B787-10 o B-737 MAX).

La arquitectura tradicional de voltaje y frecuencia constante, la energía eléctrica es usada principalmente para los motores que hacen circular el aire al interior de la cabina; también se utiliza para los equipos de aviónica, entretenimiento a bordo (IFE, In Flight Entertainment), luces y galleys (refrigeradores y hornos principalmente). Por lo tanto, durante el proceso para arrancar motores una gran corriente de hasta seis a diez veces la corriente nominal fluye por el sistema (Xie et al., 2010).

El sistema eléctrico convencional está formado por un bus (o barra energizada) de 28 [V] DC, obtenidos a partir de la conversión de los 115 [V] - 400 [Hz] usando los *transformer rectifier units (TRUs)*. Además la reducción de voltaje se realiza en cada *LRU (unidades reemplazables en línea)*, como el equipo de aviónica, para obtener voltajes de 5 [V] ó 3.3 [V] los que son usados para: circuitos integrados, microprocesadores y

señales eléctricas.

En los grandes aviones comerciales, cada motor posee un generador eléctrico; dependiendo del tipo de aeronave, podría haber más de un generador conectado a cada motor, por ejemplo los generadores de respaldo que permiten cumplir los requisitos de redundancia en operaciones ETOPS (extended range twin operations). Otra fuente adicional de energía eléctrica en una aeronave es la unidad de potencia auxiliar (APU), la que normalmente proporciona energía cuando el avión se encuentra en tierra.

La APU también pueden suministrar energía durante el vuelo, pero bajo ciertas condiciones de operación, incluyendo emergencias. No obstante, la potencia del APU es limitada cuando se encuentra en altura debido a la baja densidad del aire. Como fuente de apoyo al APU, existen varias baterías en el avión que sirven para arrancar el APU y proporcionar energía de respaldo para equipos críticos en la cabina así como otras funciones importantes como la iluminación de emergencia en los pasillos. Otra fuente (de emergencia) que se puede utilizar para generar energía eléctrica y/o hidráulica al interior del avión, es la RAT (ram air turbine). La RAT se asemeja a una pequeña turbina eólica y es desplegada por el piloto en condiciones de emergencia.

Existen múltiples barras de energía (bus) en un avión para ajustarse a la redundancias requeridas en caso de emergencia. Un contactor de enlace de barras (*BTB, bus tie breaker*) es utilizado para unir las barras de energía en caso de ser necesario. Muchos switches son utilizados para desconectar: generadores, cargas y barras del sistema de energía de la aeronave. Tanto el sistema primario y secundario de distribución de energía monitorean, controlan y protegen la barras de la red. Las protecciones y las fuentes eléctricas mencionadas se muestran en la **Figura 4.7**.

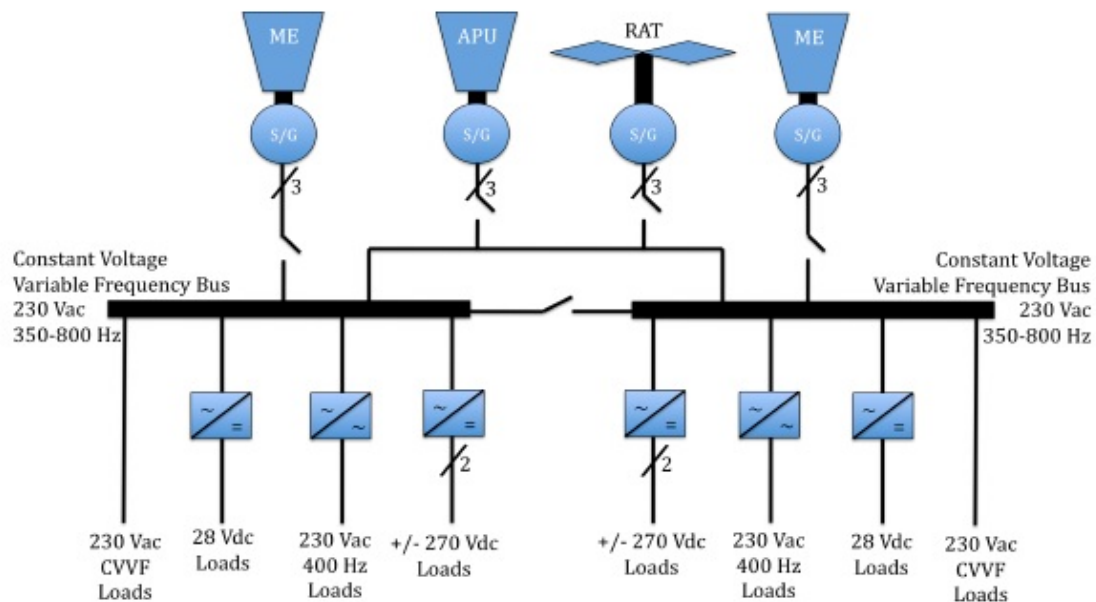


Figura 4.7: Bus FV - Voltaje constante para un MEA

En los nuevos aviones como el B787, A380 ó A350, la barra de energía convencional (voltaje constante - frecuencia constante) es reemplazada por un bus de voltaje constante y frecuencia variable. En este caso, mientras el voltaje está regulado a 115 [V] ó 230 [V] AC, la barra de energía cambia la frecuencia proporcionalmente a la velocidad del motor y el tipo de avión; así la frecuencia puede variar entre los 300 [Hz] y 800 [Hz] (Olaiya and Buchan, 1999).

Una ventaja adicional de las aeronaves más eléctricas (MEA), es la flexibilidad para generar y distribuir eficientemente la energía cerca de donde es necesario su consumo. Bajo el modelo tradicional en el diseño de

un avión, toda la energía es generada a partir de los motores principales y en la parte posterior en la APU, en la **Figura 4.8** es posible ver en forma clara la diferencia entre el modelo tradicional y la futura arquitectura de distribución de energía al interior de una aeronave comercial.

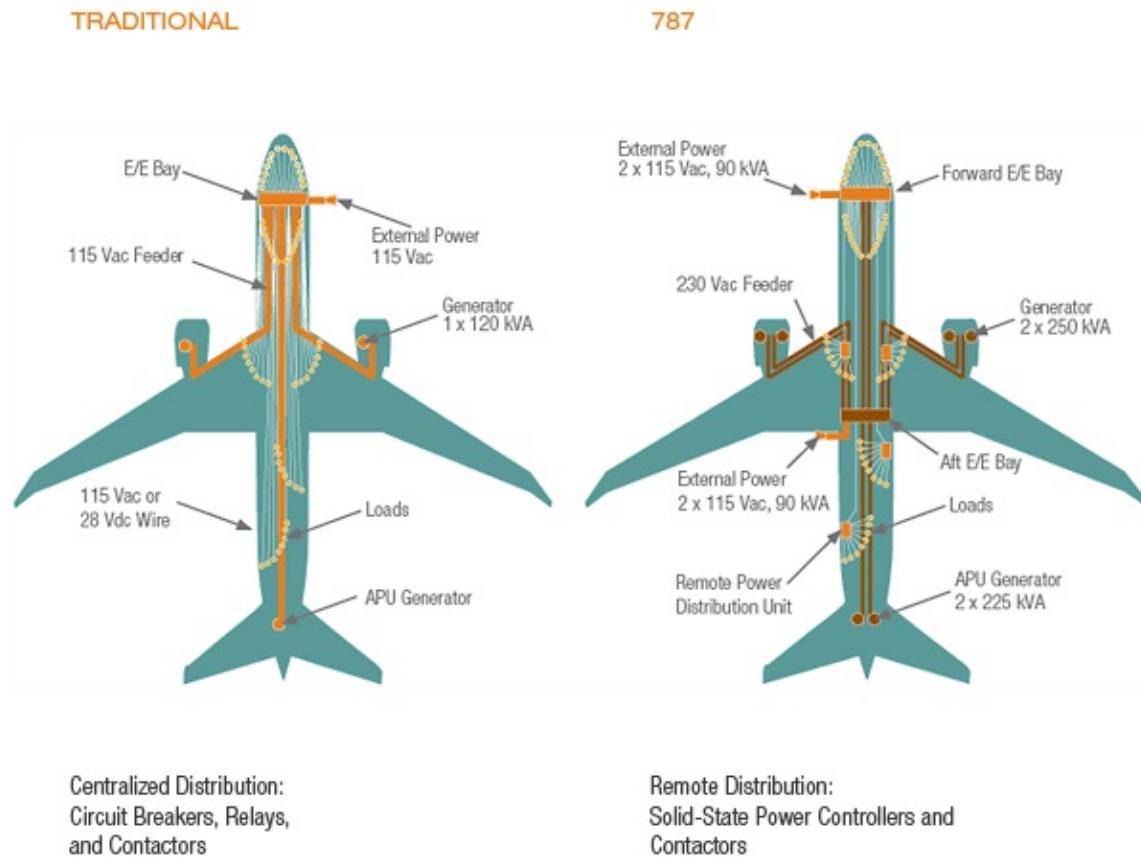


Figura 4.8: Configuración tradicional y nueva en distribución de energía para aeronaves comerciales

La arquitectura tradicional hace referencia a un sistema de distrución eléctrica centralizado; bajo el concepto MEA los controladores de potencia y contactores permiten eliminar la configuración tradicional a favor de una distribución remota. Esto da como resultado un aumento en la eficiencia del sistema de distribución de energía, ya que las pérdidas se reducen debido a distancias menores entre generación y consumo eléctrico. Más aún, el ahorro por la pérdida significativa de peso y volumen junto con esta nueva configuración permiten lograr mayores eficiencias en el uso del combustible y ahorros en mantenimiento.

4.6.2. Motores Principales

El sistema de arranque principal de motores (MES, Main Engine Start) utiliza la energía neumática del APU; el APU genera aire comprimido que se dirige desde la cola del avión hasta los motores principales. Dentro de la nacela (nacelle) del motor se encuentra un dispositivo llamado arrancador de turbina (ATS, Air Turbine Starter). El ATS actúa como un motor neumático que hace girar lentamente el motor, una vez que el motor principal alcanza cierta velocidad, en la cámara de combustión, se mezclan el aire y combustible para generar el arranque del motor a través de la combustión.

Este modo de arranque a través del APU, tiene una limitación operacional, ya que sólo puede ser utilizada mientras el avión se encuentre en tierra o hasta los 20.000 [ft] ya que a mayor altitud el APU puede no funcionar correctamente debido a la menor densidad que presenta el aire. En los Airbus A350 y A380, utilizan el sistema de aire neumático para el arranque de motores; sin embargo, recientemente los Boeing B787 han eliminado este sistema. En su lugar, los generadores principales del motor funcionan como "motores independientes" para lograr el arranque (Sinnott, 2007).

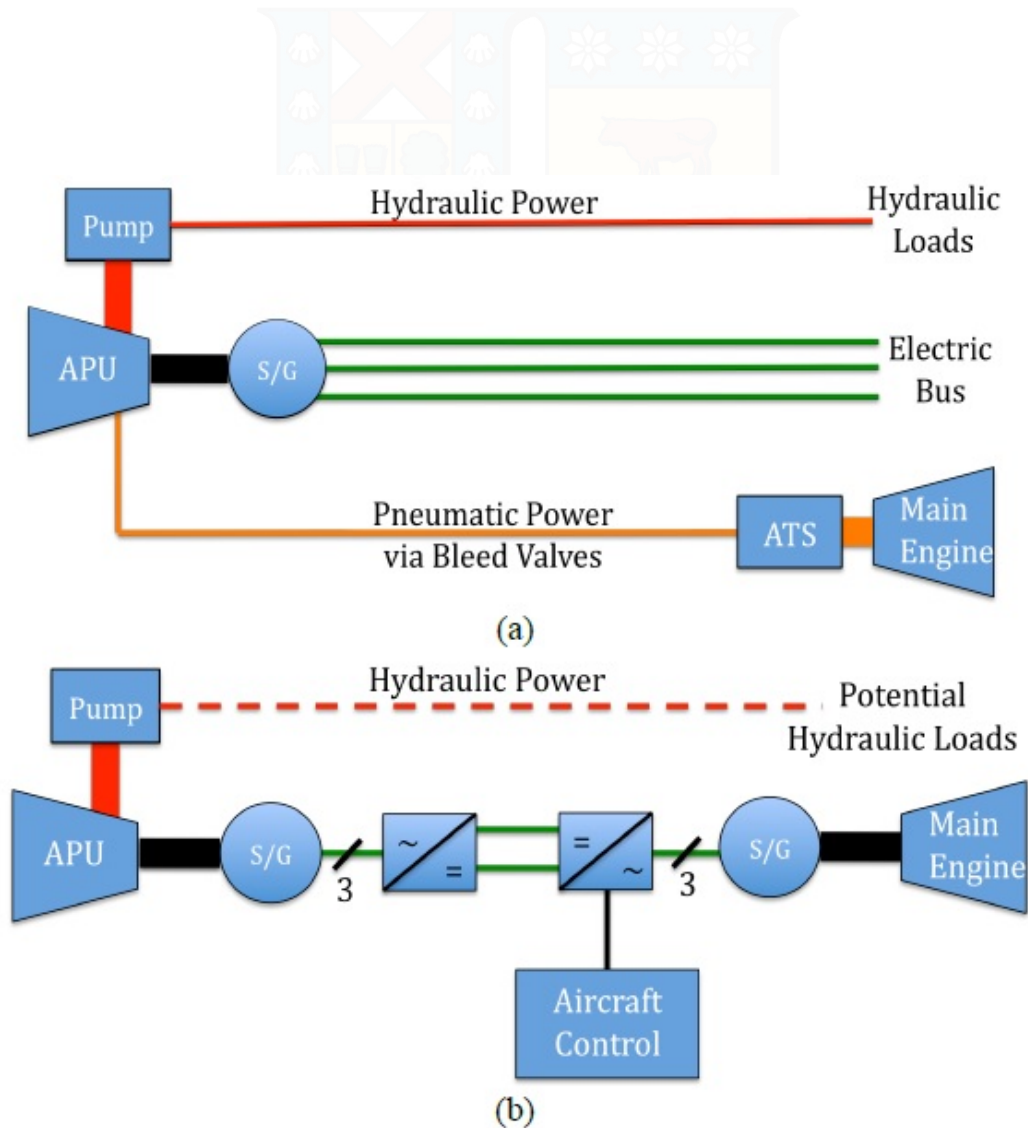


Figura 4.9: (a) APU tradicional con sistemas eléctrico, hidráulico y neumático. (b) MES APU eléctrica

Este nuevo sistema requiere convertir corriente alterna desde los generadores del APU, a corriente continua y luego nuevamente de DC a AC para lograr voltaje y frecuencia variable, por lo tanto rectificadores e inversores son necesarios. En la **Figura 4.9** se muestra un diagrama del sistema de puesta en marcha de los motores principales con APUs tradicionales y eléctricas.

Tabla 4.3: Comparación sistemas eléctricos aviones comerciales Wide Body

Modelo Avión	Boeing 787	Airbus 380	Airbus 350
N° Motores	2	4	2
N° Generadores por motor	2	1	2
Clasificación del Generador	250 [kVA]	150 [kVA]	100 [kVA]
Voltaje salida del Generador	235 [V]	115 [V]	230 [V]
N° Generadores por APU	2	1	1
Clasificación de APU	225 [kVA]	120 [kVA]	100 [kVA]

El reto por el arranque de motores primarios radica principalmente, en la capacidad de dimensionar adecuadamente: los generadores de motor principal, los convertidores electrónicos de potencia y el APU.

4.6.3. APU

Comúnmente las unidades de poder auxiliar (APU's) (**Figura 4.9a**) son motores a combustión que proveen de energía eléctrica y neumática al avión mientras el avión se encuentra en tierra y/o en el aire (bajo ciertas limitaciones de altitud). Tradicionalmente el APU puede conectarse a una bomba hidráulica de respaldo en caso de falla del sistema hidráulico principal de la aeronave.

Mientras el avión se encuentra en tierra el APU se utiliza para entregar aire comprimido necesario para dar partida a los motores principales, entrega además aire acondicionado a la cabina y energía/potencia a la aeronave. En el aire, la APU puede ser usada en condiciones de emergencia para proporcionar aire comprimido, potencia hidráulica y eléctrica. La APU opera a frecuencia constante de 400 [Hz] y entrega electricidad a 115 [V] ó 230 [V], este tipo de APU es utilizada en prácticamente todos los aviones del mundo.

Bajo el concepto de un avión totalmente eléctrico (MEA), el arranque eléctrico de los aviones más modernos, permite eliminar la función neumática e hidráulica del APU, logrando así el diseño de nuevas unidades de poder auxiliar totalmente eléctricas como se muestra en la **Figura 4.9b**; este es el tipo de APU utilizada en el Boeing B787. Una de las principales diferencias entre un APU convencional y eléctrica es, que esta última requiere un generador mucho más grande y como resultado en las consideraciones de diseño, en particular para el B787, dos generadores se encuentran están conectados al APU para incrementar la potencia eléctrica y cumplir con la demanda de energía del avión. También, se justifica la existencia de dos generadores debido a restricciones complejas por redundancia y ETOPS como seguridad de equipos críticos. En la **Tabla 4.3**, se muestra una comparación de las especificaciones eléctricas de los más recientes aviones de la industria.

4.6.4. Análisis de Confiabilidad para APU: Conceptos Relevantes

La confiabilidad de un elemento mecánico es la característica más importante, expresa la probabilidad de que el componente realizará su función bajo determinadas condiciones durante un periodo específico de tiempo. El estudio de la confiabilidad es de suma importancia ya que permite comprender el comportamiento, modos de falla y consecuencias que produce un elemento mecánico dentro de un sistema. Aumentar el grado de confiabilidad lleva directamente a la disminución en costos de mantenimiento inherentes a las fallas y a la falta de productividad (costos de ineficiencia).

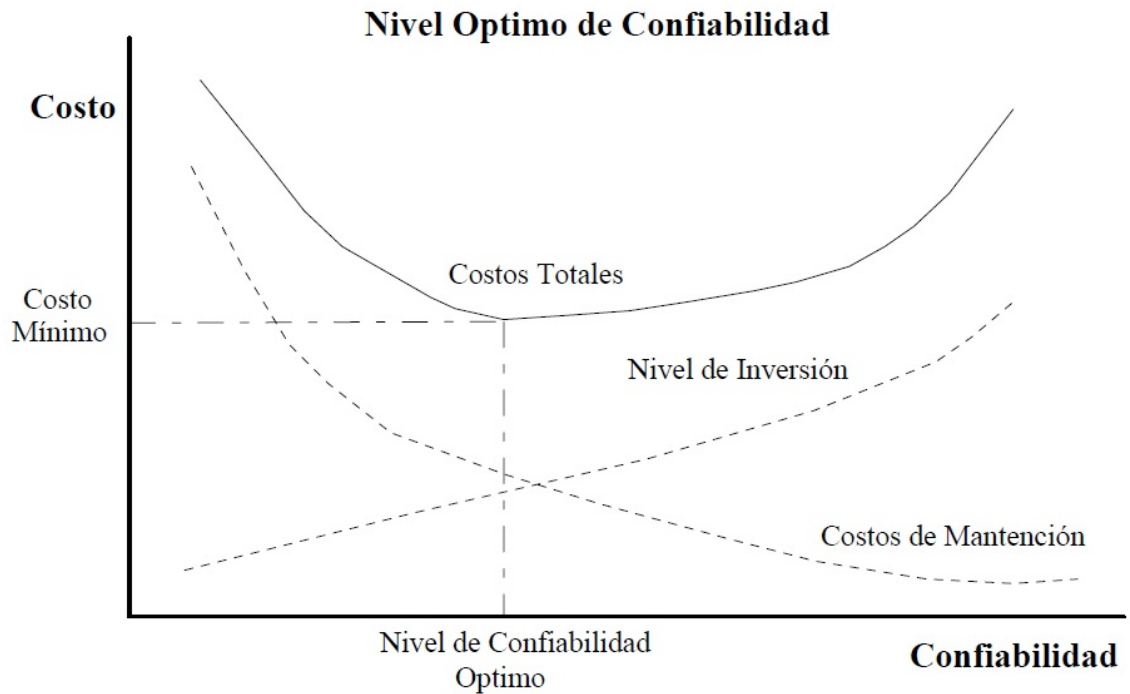


Figura 4.10: Costos asociados al nivel de confiabilidad de un elemento

De esta forma, el costo asociado a la confiabilidad resulta de la suma de costos de mantenimiento e ineficiencia; obteniéndose un mínimo correspondiente al nivel óptimo de confiabilidad para el elemento **Figura 4.10**

Para iniciar el análisis de confiabilidad para el APU, es necesario definir qué es confiabilidad:

Confiabilidad de un elemento es la probabilidad de que dicho elemento funcione sin fallas durante un tiempo "t" determinado bajo condiciones ambientales dadas. (Arata, 2009)

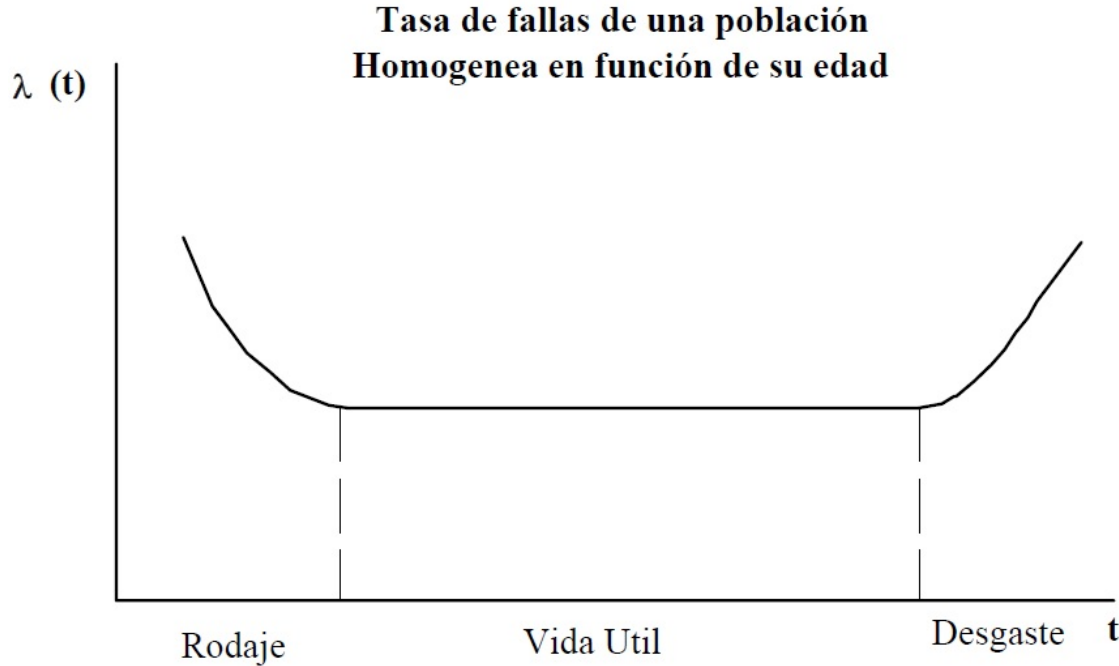
A todo elemento es posible asignarle dos estados que lo caracterizan en todo instante de su vida: el de buen funcionamiento, y el de funcionamiento defectuoso. La definición de confiabilidad anterior presupone (Arata, 2009):

1. Se ha fijado un criterio que determina si el elemento funciona o no.
2. Se establecen exactamente las condiciones ambientales y de utilización, y que se mantengan constantes en el periodo de tiempo.
3. Se define el intervalo de tiempo t durante el cual se requiere que el elemento funcione.

Una falla o degradación de la funcionalidad en un elemento mecánico es posible clasificarla en dos categorías: *fallas espontáneas*, la cual es casi imposible la puesta en marcha del sistema; o *fallas producto del desgaste*, donde es posible identificar el avance de un deterioro debido al aumento del roce, resistencia, etc.

Se entiende por **tasa de falla** $\lambda(t)$: probabilidad de tener una falla del sistema o del elemento entre los instantes t y $(t + \Delta t)$ a condición de que el sistema haya sobrevivido hasta el tiempo " t ". Esta función tiene una forma características a lo largo de la vida útil del elemento, comúnmente se le conoce como la curva de la bañera, donde se distinguen tres períodos:

1. **Rodaje:** surgen fallas tempranas, asociadas a equipos nuevos normalmente surgen por partes faltantes, falta de capacitación de las personas que instalan el equipo, daño causado por a los aparatos o

**Figura 4.11:** Tasa de falla - Curva de la bañera

dispositivos o simplemente por fallas/defectos de fabricación debido al poco asentamiento de las piezas y uniones.

2. **Vida Útil:** tasa de falla constante (o fallas aleatorias) en el tiempo, este tipo de fallas son inesperadas y pueden surgir por sobrecargas o averías causadas por factores externos.
3. **Desgaste:** tasa de falla creciente por desgaste u obsolescencia, son fallas debido a la edad, fatiga, corrosión, deterioro mecánico/eléctrico/hidráulico o por el bajo nivel de mantenimiento recibido durante el periodo de operación.

Para sistemas reparables (generalmente mecánicos) es conveniente hablar del tiempo medio entre fallas **MTBF (Mean Time Between Failures)**, es decir, el tiempo comprendido entre el instante en que el elemento entra (o vuelve a entrar) en servicio (una vez finalizado el mantenimiento), excluyendo el intervalo de tiempo necesario para el mantenimiento.

La ley de Weibull se utilizará para el análisis de confiabilidad debido a que este modelo es posible representar todo el ciclo de vida de un elemento (APU). Las relaciones que representan este modelo son las siguientes:

$$f(t) = \frac{\beta}{\alpha} \cdot \left(\frac{t-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta-1} \cdot \left(\frac{t-\gamma}{\alpha}\right) \cdot e^{-\left[\left(\frac{t-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta}\right]} \quad (4.1)$$

$$R(t) = e^{-\left[\left(\frac{t-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta}\right]} \quad (4.2)$$

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\alpha} \cdot \left(\frac{t-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta-1} \quad (4.3)$$

$$E(t) = \gamma + \alpha \cdot \Gamma\left(\frac{\beta + 1}{\beta}\right) \quad (4.4)$$

Gráficamente, las relaciones anteriores representan lo siguiente:

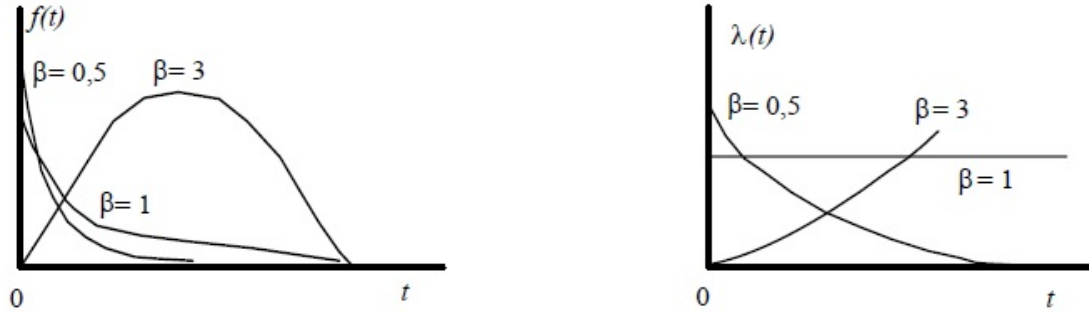


Figura 4.12: Distribución de Weibull

donde:

- γ : *parámetro de localización*, se encuentra en las mismas unidades de t y define el punto de partida de la distribución.
- α : *parámetro de escala*, alargamiento de la distribución en el eje del tiempo.
- β : *parámetro de forma*, parámetro que controla la forma de la distribución.

Si

$\beta < 1$, $\lambda(t)$ es decreciente $\beta = 1$, $\lambda(t)$ es constante $\beta > 1$, $\lambda(t)$ es creciente

Otras funciones importantes a reconocer son las siguientes:

- **Función Confiabilidad:**

$$R(t) = \int_s^{\infty} f(s) \cdot ds = e^{-\left[\left(\frac{t-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta}\right]} \quad (4.5)$$

- **Función Distribución Acumulada:**

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\left[\left(\frac{t-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta}\right]} \quad (4.6)$$

4.6.5. Análisis Numérico Confiabilidad APU

Como se mencionó en la sección anterior, la distribución *Weibull* es una de las herramientas más útiles para analizar y estudiar la confiabilidad de un elemento mecánico como es la APU. De esta forma, se realiza el siguiente análisis matemático para determinar en primer lugar: los parámetros principales que describen el comportamiento de la curva (en particular para la forma que describe el modelo de falla del APU).

Y luego, calcular: cuánto es el tiempo esperado de funcionamiento de un APU antes de fallar, entender las principales fallas que presenta esta unidad y por último dimensionar el costo promedio que significa la mantención de este elemento mecánico para una aerolínea.

4.6.5.1. Determinación de los parámetros por el Método de los Mínimos Cuadrados

El Método de los Mínimos Cuadrados permite calcular los parámetros de forma y escala, mediante la transformación doble logarítmica de la Función distribución (*Ecuación 4.6*). El cálculo del parámetro de localización es más complejo, para el cual se utilizará el programa *Solver de Excel* para resolver.

La transformación doble logarítmica permite transformar la función distribución acumulada en una ecuación lineal de regresión:

$$\begin{aligned}
 F(t) &= 1 - e^{-\left[\left(\frac{t-\gamma}{\alpha}\right)^\beta\right]} \\
 e^{\left[\left(\frac{t-\gamma}{\alpha}\right)^\beta\right]} &= \frac{1}{1-F(t)} \\
 \left(\frac{t-\gamma}{\alpha}\right)^\beta &= \ln\left(\frac{1}{1-F(t)}\right) \\
 \beta \cdot \ln\left(\frac{t-\gamma}{\alpha}\right) &= \ln\left(\ln\left(\frac{1}{1-F(t)}\right)\right) \\
 \underbrace{\beta \cdot \ln(t-\gamma) - \beta \cdot \ln(\alpha)} &= \underbrace{\ln\left(\ln\left(\frac{1}{1-F(t)}\right)\right)} \\
 \boxed{\beta \cdot x - b = y}
 \end{aligned}$$

1. $x = \ln(t - d)$
2. $b = \beta \cdot \ln(\alpha)$
3. $y = \ln\left(\ln\left(\frac{1}{1-F(t)}\right)\right)$
4. $\beta =$ (parámetro de forma) pendiente de la recta de regresión

Desde 2. es posible obtener, el parámetro de escala tal como sigue:

$$\boxed{b = \beta \cdot \ln(\alpha) \Rightarrow e^{\frac{-b}{\beta}} = \alpha}$$

4.6.5.2. Estimador Rango de Mediana

Para trazar la recta de regresión, se debe calcular un estimador para la función de distribución acumulada $F(x)$ (*Ecuación 4.6*). Este estimador se llama *Rango de Mediana*, es un estimador no paramétrico basado en el orden de las fallas; esto implica que la muestra de datos se debe organizar en forma ascendente.

La expresión de este estimador es la siguiente:

$$w_a(x_i) = \frac{\frac{i}{n-i+1}}{\frac{i}{n-i+1} + F_{1-\alpha, 2(n-i+1), 2i}} \quad (4.7)$$

Donde:

1. $w_a(x_i)$: es el rango de media para un nivel de confianza $1 - \alpha$, donde α es el nivel de significancia que toma valor 0,5.
2. i : orden de la falla.
3. n : número total de datos de la muestra.
4. $F_{\alpha, v1, v2}$: valor crítico de la distribución F, evaluada en el nivel de significancia α y con grados de libertad $v1$ y $v2$.

Dada la complejidad de la Ecuación 4.7, generalmente el rango de media se aproxima a la siguiente expresión:

$$RM_{(x_i)} = \frac{i - 0,3}{n + 0,4} \quad (4.8)$$

Tal que:

1. $RM_{(x_i)}$: rango de mediana.
2. i : orden de falla.
3. n : número total de datos de la muestra.

4.6.5.3. Consideraciones sobre el Parámetro de Localización

Al momento de obtener un parámetro de localización γ distinto de cero, se debe tener presente lo siguiente:

- Si al graficar los puntos de la muestra aparecen extremos crecientes o decrecientes (colas de puntos), es un indicativo de que el parámetro debe ser calculado.
- Un extremo hacia abajo o una reducción súbita de la pendiente, es un indicativo de que un parámetro de localización está presente.
- Un extremo hacia arriba o incremento súbito de la pendiente son indicativos de que un parámetro de localización negativo está presente.
- Valores grandes del parámetro de forma ($\beta > 10$) es otro indicativo de que el parámetro de localización debe ser calculado.

4.6.6. Resultados

Dentro de la industria aeronáutica existen dos principales proveedores de APU: Pratt & Whitney Canada (PWC) con el modelo APIC-APS3200 y Honeywell con su modelo 131-9A; ambas compañías abastecen al mercado aeronáutico de APUs de aviones A320FAM.

4.6.6.1. Remociones No Programadas (UER): Modelo APU APS3200

Al aplicar el modelo revisado en la sección anterior se obtienen los siguientes resultados:

La regresión realizada para determinar el parámetro de forma (β) se representa en la **Figura 4.17** de donde se obtiene la siguiente ecuación:

$$y = 1,1221 \cdot x - 9,6633$$

Presentando un coeficiente de determinación (R^2) igual a 94,2 %, de tal forma que el ajuste lineal realizado permite explicar de muy buena forma la variación total que presenta la variable Y.

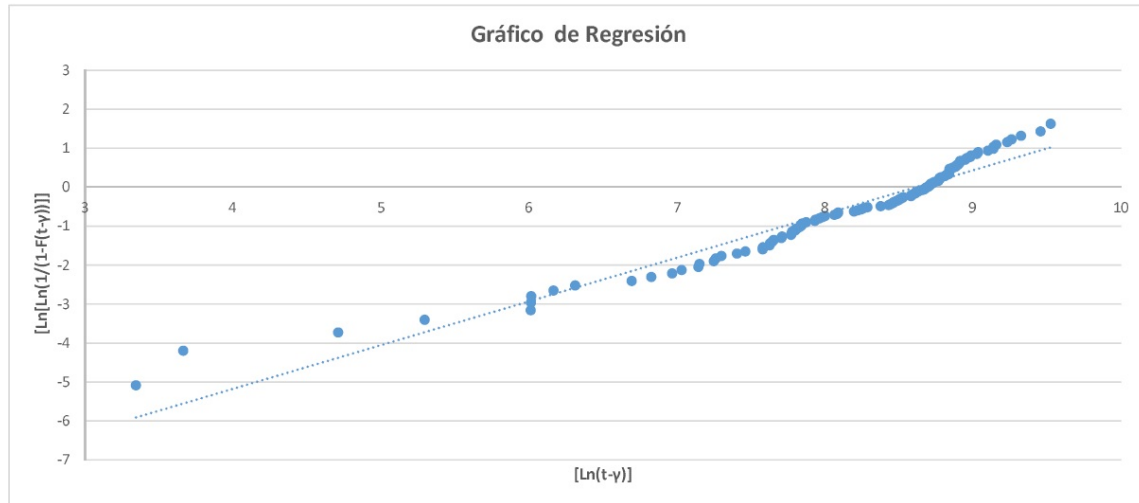


Figura 4.13: Regresión UER APS3200

Tabla 4.4 resume los valores de los parámetros de forma, escala y localización (de acuerdo a las consideración realizadas sobre el parámetro de localización, se aplica una simplificación al modelo considerando $\gamma = 0$):

Tabla 4.4: Valor parámetros: forma, escala y localización - UER APS3200

Parámetro	Valor
Forma (β)	1,12
Escala (α)	5498,17
Localización (γ)	0

Con los parámetros determinados es posible formular la función Weibull que describe el comportamiento para este caso:

$$f(t) = 2,04 \cdot 10^{-4} \cdot \left(\frac{t}{5498,17} \right)^{0,1221} \cdot e^{-\left[\left(\frac{t}{5498,17} \right)^{1,1221} \right]} \quad t \geq \gamma \quad (4.9)$$

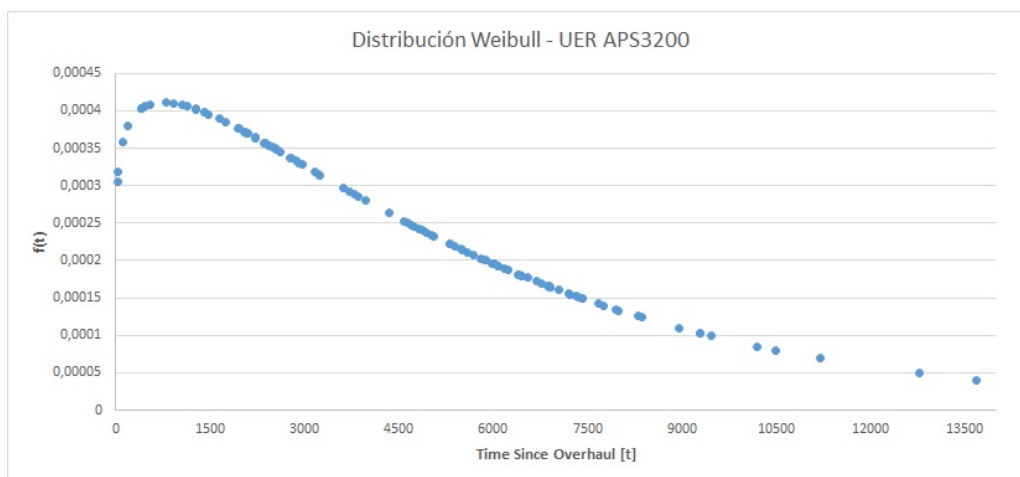


Figura 4.14: Distribución Weibull: Caso UER APS3200

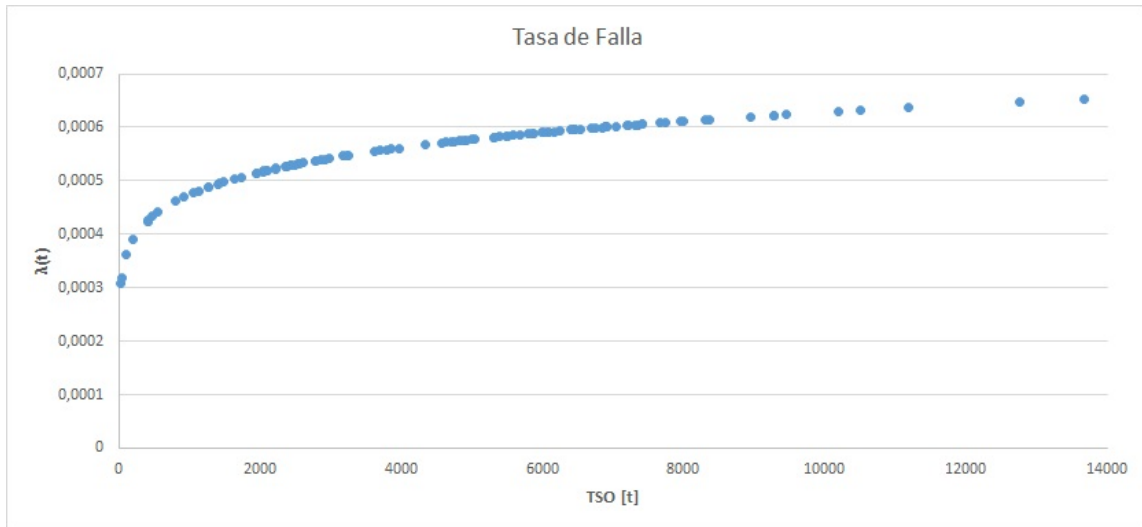


Figura 4.15: Tasa de Falla: UER APS3200

Tanto la **Figura 4.14** como la **Figura 4.15**, concuerdan con los resultados obtenidos para el parámetro de forma $\beta > 1$; esto muestra claramente que para este modelo de APU nos encontramos en la tercera fase de su ciclo de vida (etapa de desgaste) por lo que el *mantenimiento preventivo* es la mejor opción para evitar costos o gastos mayores en cuanto a ineficiencias en la operación: como por ejemplo, no contar con aire acondicionado en la cabina (generando molestias y reclamos de los pasajeros, imposibilidad de encender motores en tierra ya que no se cuenta con el sistema neumático, externalizar carros terrestres para energizar el avión, etc).

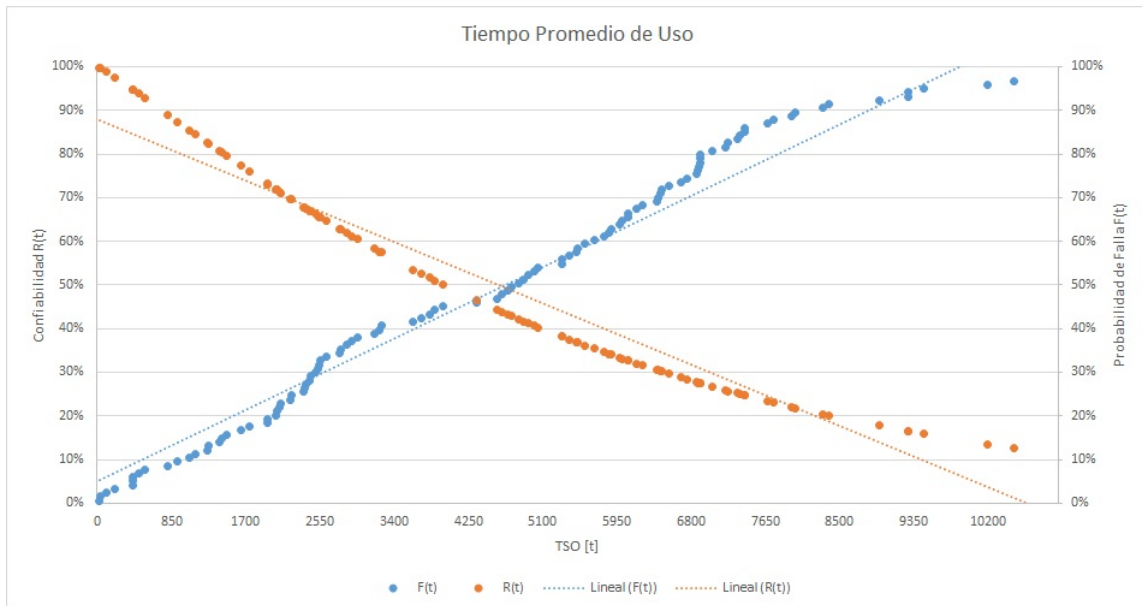


Figura 4.16: Tiempo Promedio de Uso: UER APS3200

Finalmente, si se analizan los tiempos promedio de falla de esta APU, se obtiene la **Figura 4.16** donde es posible estimar que entre las 4.200 - 4.600 [hr] se producirá una remoción no programada. Considerando que una flota compuesta por 100 aviones opera alrededor de 220.000 [horas APU/año], de acuerdo al resultado anterior se deberían considerar alrededor de 3-4 remociones no programadas mensuales en la flota (costo reparación APU: 189.000 USD).

4.6.6.2. Remociones Programadas: Modelo APU APS3200

Siguiendo el mismo procedimiento presentado en la sección anterior se obtiene la recta de regresión considerando el caso de remociones programadas (mantención de la APU):

$$y = 1,41 \cdot x - 12,75$$

Con un coeficiente de determinación (R^2) igual a 82 %.

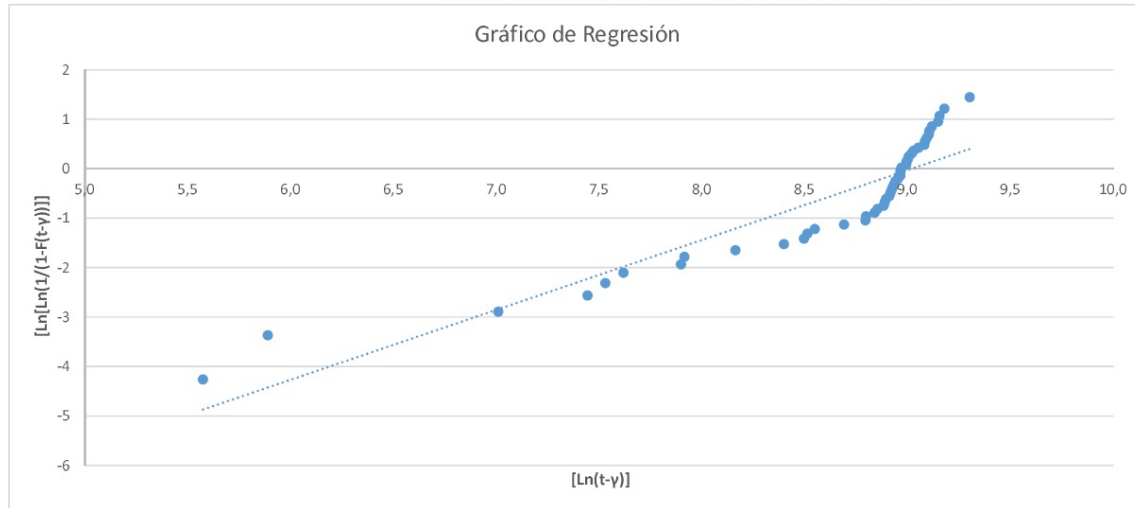


Figura 4.17: Regresión remociones programadas APS3200

Tabla 4.5 resume los valores de los parámetros de forma, escala y localización (de acuerdo a las consideración realizadas sobre el parámetro de localización, se aplica una simplificación al modelo considerando $\gamma = 0$):

Tabla 4.5: Valor parámetros: forma, escala y localización - Remociones programadas APS3200

Parámetro	Valor
Forma (β)	1,41
Escala (α)	8252,59
Localización (γ)	0

Con los valores de la tabla anterior se determina la función Weibull que describe el comportamiento para este caso:

$$f(t) = 1,71 \cdot 10^{-4} \cdot \left(\frac{t}{8252,59} \right)^{0,41} \cdot e^{-\left[\left(\frac{t}{8252,59} \right)^{1,4140} \right]} \quad t \geq \gamma \quad (4.10)$$

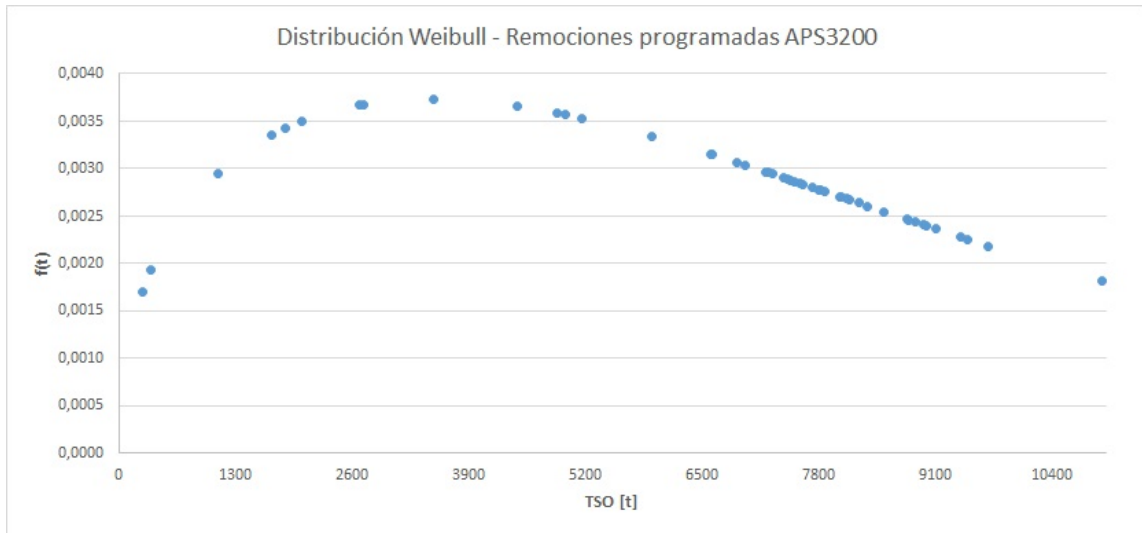


Figura 4.18: Distribución Weibull: Remociones Programadas APS3200

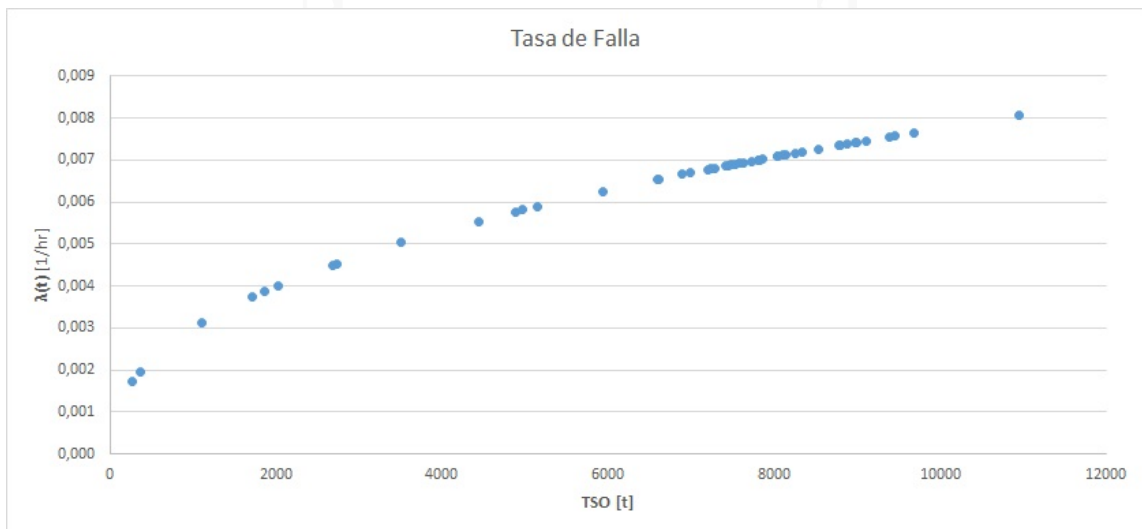


Figura 4.19: Tasa de Falla: Remociones Programadas APS3200

Nuevamente las **Figuras 4.17 y 4.18**, representan el parámetro de forma $\beta > 1$ junto con la fase de desgaste en que se encuentra la unidad (APU).

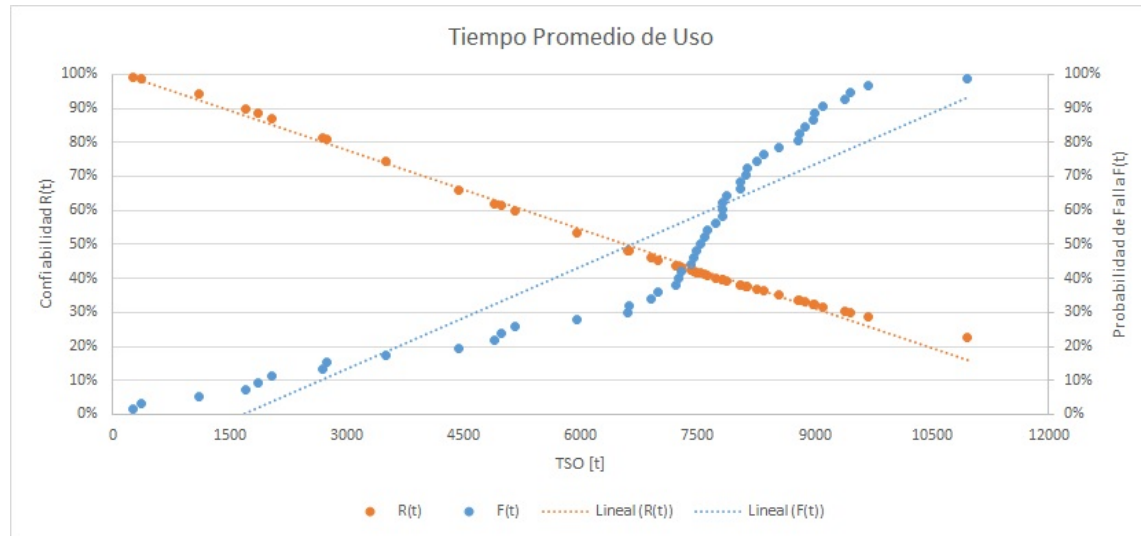


Figura 4.20: Tiempo Promedio de Uso: Remociones Programadas APS3200

A diferencia que, en el caso de remociones no programadas, la **Figura 4.20** representa el tiempo promedio en que se remueve una APU para realizar reemplazo programado preventivo y así evitar posibles impactos operacionales. El tiempo promedio al cual se realiza la remoción alcanza las 7.300-7.500 horas, bajo el supuesto de operación anterior para la flota (220.000 [horas APU/año]) la cantidad de remociones programadas por mes fluctúa entre 2-3 cambios por mes.

4.6.6.3. Remociones No Programadas (UER): Modelo APU 131-9A

El análisis para este nuevo modelo de APU, es idéntico al realizado anteriormente, se simplifican los resultados para obtener una comparación de los dos principales proveedores de estos motores.

Se obtiene la siguiente regresión:

$$y = 1,098 \cdot x - 12,063$$

Con un coeficiente R^2 igual a 97,2 %

Tabla 4.6 resume los valores de los parámetros de forma, escala y localización (de acuerdo a las consideración realizadas sobre el parámetro de localización, se aplica una simplificación al modelo considerando $\gamma = 0$):

Tabla 4.6: Valor parámetros: forma, escala y localización - Remociones no programadas 131-9A

Parámetro	Valor
Forma (β)	1,098
Escala (α)	9516,17
Localización (γ)	0

$$f(t) = 1,15 \cdot 10^{-4} \cdot \left(\frac{t}{9516,17} \right)^{0,098} \cdot e^{-\left[\left(\frac{t}{9516,17} \right)^{1,098} \right]} \quad t \geq \gamma \quad (4.11)$$

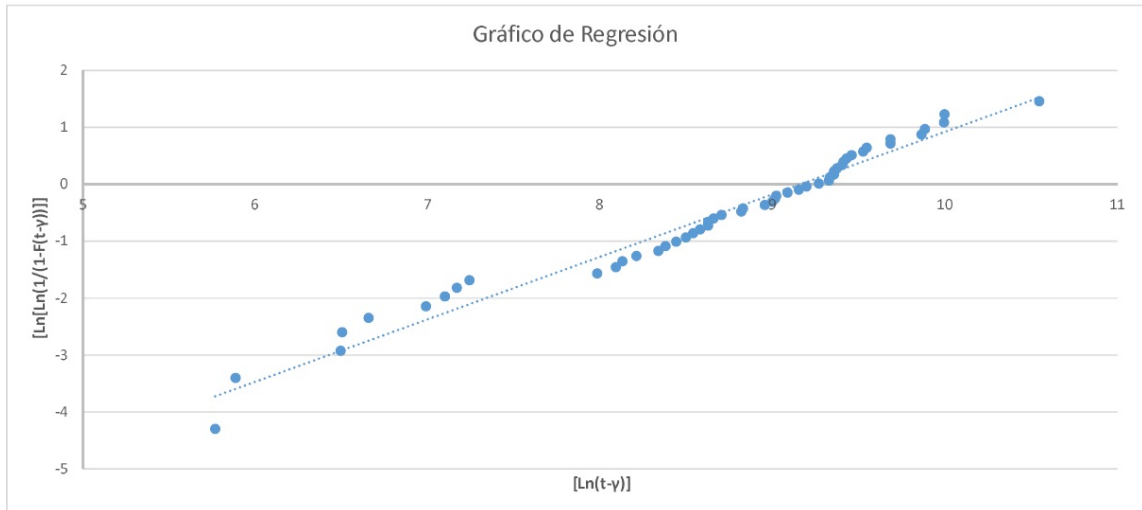


Figura 4.21: Regresión remociones no programadas APU 131-9A

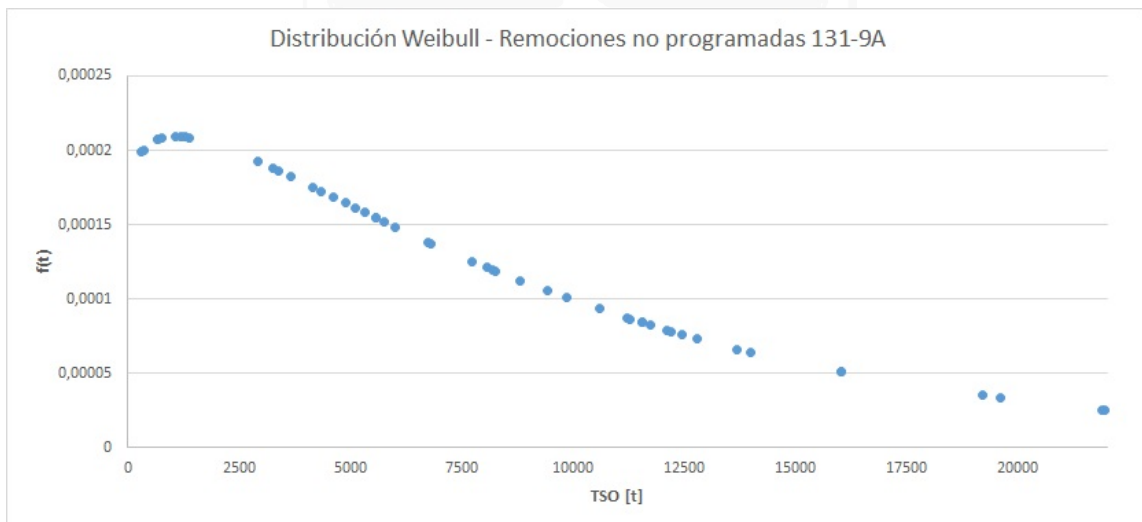


Figura 4.22: Distribución Weibull: Remociones No Programadas 131-9A

4.6.6.4. Remociones Programadas: Modelo APU 131-9A

Recta de regresión remociones programadas 131-9A:

$$y = 1,32 \cdot x - 12,41$$

Con un coeficiente R^2 igual a 91,3 %.

Tabla 4.7 resume los valores de los parámetros de forma, escala y localización (de acuerdo a las consideración realizadas sobre el parámetro de localización, se aplica una simplificación al modelo considerando $\gamma = 0$):

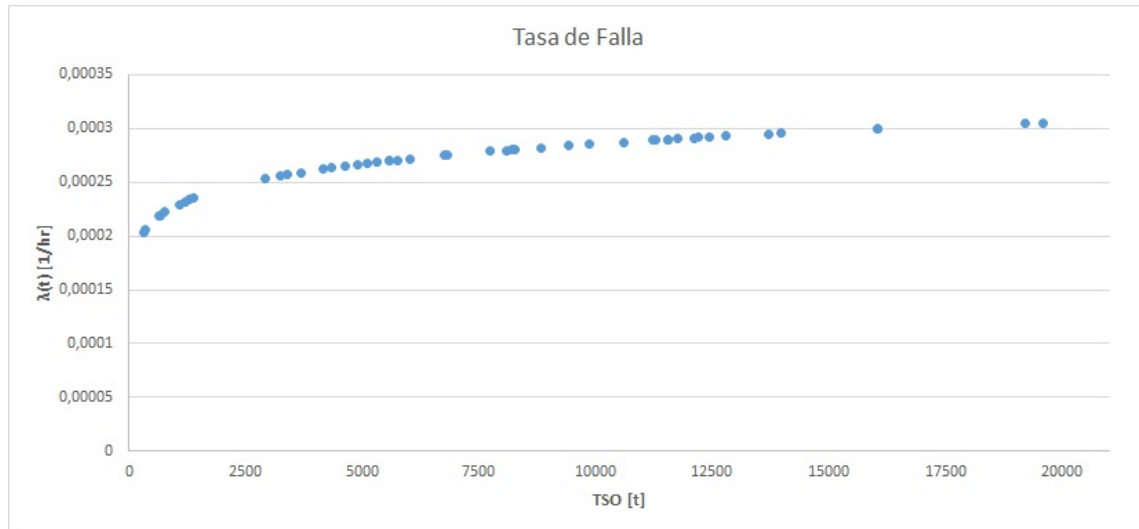


Figura 4.23: Tasa de Falla: Remociones no programadas 131-9A

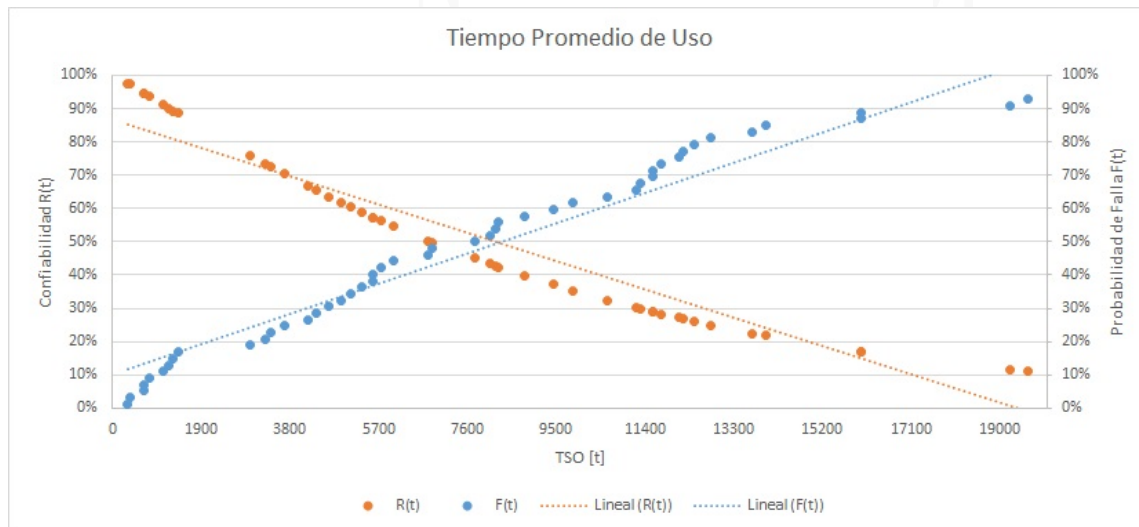


Figura 4.24: Tiempo Promedio de Uso: Remociones no programadas 131-9A

Tabla 4.7: Valor parámetros: forma, escala y localización - Remociones no programadas 131-9A

Parámetro	Valor
Forma (β)	1,32
Escala (α)	11.870,78
Localización (γ)	0

$$f(t) = 1,11 \cdot 10^{-4} \cdot \left(\frac{t}{11870,78} \right)^{0,32} \cdot e^{-\left[\left(\frac{t}{11870,78} \right)^{1,32} \right]} \quad t \geq \gamma \quad (4.12)$$

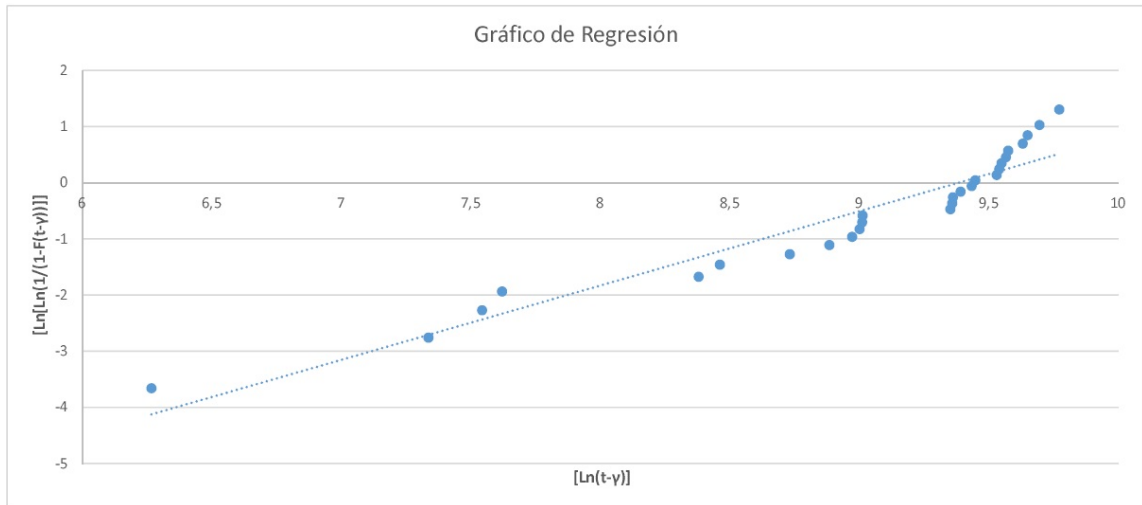


Figura 4.25: Regresión remociones programadas APU 131-9A

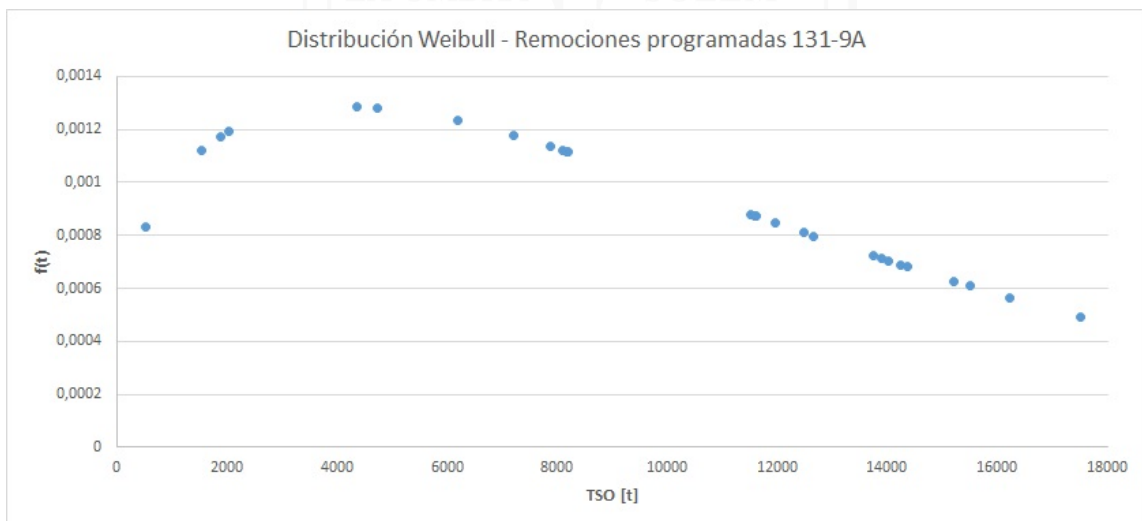


Figura 4.26: Distribución Weibull: Remociones Programadas 131-9A

Técnicamente la evaluación de ambos modelos permiten realizar comparaciones de operación y confiabilidad, junto con el tiempo esperado de uso que presentan en condiciones de remoción programada y no programada.

El modelo 131-9A resulta tener un mejor desempeño respecto del tiempo esperado de remociones no programadas y programadas, lo que presume generar mayores ahorros en mantenimiento e indisponibilidad del motor (APU) que afecten a la operación.

Ambos modelos se encuentran en la fase de desgaste, por lo cual, están sujetos a eventos cuasales y casuales que afectan el desempeño total. Generar un plan de mantenimiento acorde a la utilización y operación de los modelos permitirán una mejor gestión del activo.

No obstante lo anterior, considerar el uso de nuevas fuentes de energía como las celdas de combustible, son un desafío que se debe enfrentar en el futuro para avanzar hacia una operación más segura, eficiente y acorde a los requerimientos de la industria.

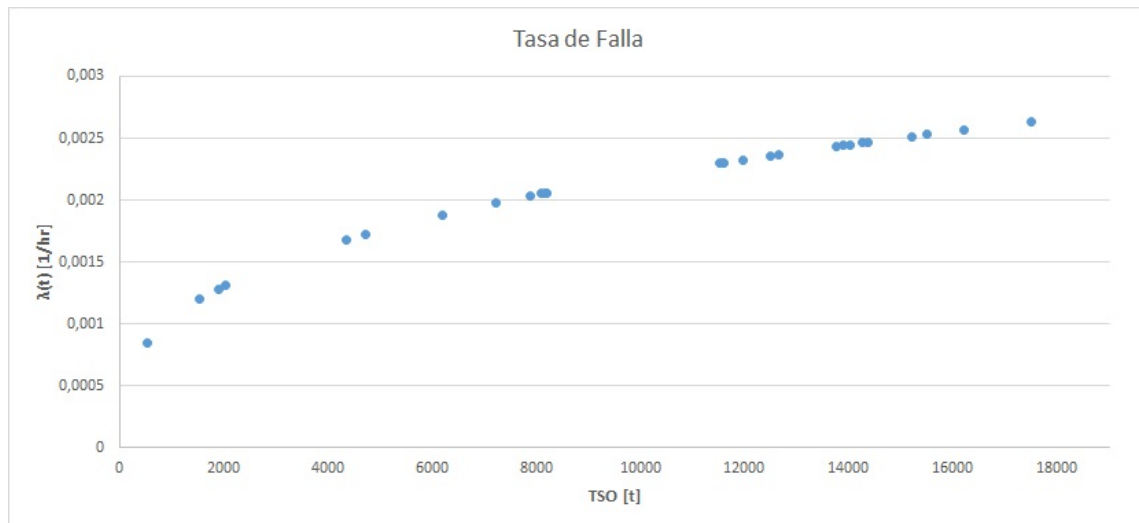


Figura 4.27: Tasa de Falla: Remociones programadas 131-9A

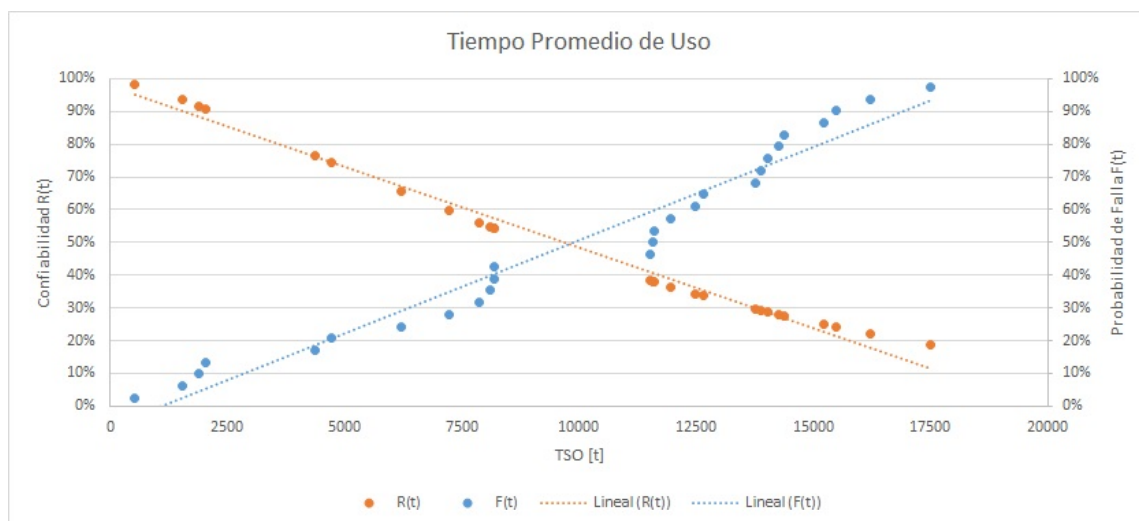


Figura 4.28: Tiempo Promedio de Uso: Remociones Programadas 131-9A

5 | Marco Teórico - Fuel Cells

5.1. Fuel Cells

5.1.1. El desarrollo de las Fuel Cells

La invención de las Fuel Cells como sistema de conversión de energía data de la mitad del siglo XIX, los primeros estudios se atribuyen a Sir William Grove, sin embargo, el principio de aplicabilidad para las FC fue descubierto por Christian Friedrich Schobain ([Bossel, 2000](#)). En cualquier caso, las FC es una de las tecnologías más antiguas de conversión de energía conocidas por el hombre. Su desarrollo durante el siglo XIX careció del impulso necesario ya que: las fuentes de energía primaria eran abundantes, casi ilimitadas y económicas.

No obstante, a inicios del siglo XX la conversión de energía química en energía eléctrica se volvió más importante debido al aumento del uso de electricidad en todo el mundo. Los sistemas de conversión de energía eléctrica se introdujeron inicialmente como pequeños generadores, pero pronto los nuevos desarrollos dieron origen a plantas de gran escala.

En la última década, la tendencia a generar electricidad debido al aumento de la población mundial ha intensificado el interés por desarrollar y construir plantas de poder con mayor potencia y equitativamente distribuida en la población. Se espera que la descentralización de las plantas de generación reduzca el costo de capital al instalar sistemas más pequeños, pero más eficientes, donde distribución de electricidad y calor sea más fácil.

Uno de los principales factores que ha influenciado en el desarrollo de las FC ha sido la creciente preocupación sobre las consecuencias en el medio ambiente por el uso de los combustibles fósiles usados en la producción de electricidad y propulsión de vehículos. La dependencia del petróleo en países industrializados se ha hecho evidente en las últimas crisis económicas. Sin embargo, lo más importante es la concientización del mundo a partir de cómo las actividades humanas influyen en el medio ambiente y cómo se puede lograr un desarrollo sostenible durante los próximos años.

Las Fuel Cells pueden ayudar a disminuir la dependencia actual sobre los combustibles fósiles y al mismo tiempo, disminuir la emisiones contaminantes a la atmósfera; debido a las mayores eficiencias en generación eléctrica que tienen por sobre los motores a combustión. El uso de Hidrógeno puro en las FC sólo produce agua como resultado de la reacción.

La fracción de energía producida por el viento (energía eólica), agua (energía hidráulica) y el sol (energía solar) incrementará durante los próximos 20 años, pero no lograrán cubrir la demanda eléctrica en su totalidad. Por lo que, combinar estas fuentes para producir Hidrógeno en cooperación con las FC serán la mejor opción para generar energía en el futuro.

De acuerdo al informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el cambio climático (IPPC) ([Lister](#)

et al., 1999), el transporte aéreo es actualmente responsable de casi el 2 % de las emisiones globales de CO_2 , no obstante se espera que se alcancen niveles cercanos al 3,5 % debido al aumento del tráfico mundial de aeronaves comerciales. Aunque respecto de las emisiones globales estos porcentajes resultan bajos (en comparación a otras industrias de transporte) existe una presión creciente entre los fabricantes de aeronaves por mejorar la eficiencia de sus aviones reduciendo al máximo el impacto medio ambiental.

De esta forma las futuras generaciones de aviones deben enfrentar mayores requisitos en cuanto a productividad, protección del medio ambiente y disponibilidad operacional; afectando principalmente aspectos técnicos, operativos y económicos de los sistemas de generación de energía en vuelo y tierra. Hoy el desarrollo de la aviación apunta a una arquitectura con tendencia a un *avión más eléctrico* caracterizado por una mayor proporción de sistemas eléctricos en reemplazo de aquellos controlados hidráulica o neumáticamente; aumentando así los requerimientos de energía al interior de la aeronave.

En este contexto, las Fuel Cells representan una solución tecnológica prometedora en cuanto a mejorar la eficiencia energética para operaciones en tierra y aire. En cooperación con Airbus, el Centro Aeroespacial Alemán (DLR) ha identificado múltiples aplicaciones para las FC dentro de un avión comercial tanto para operaciones terrestres como crucero (Renouard-Vallet et al., 2010). Las FC son capaces de soportar e incluso reemplazar a los actuales sistemas de suministro de electricidad para la cabina así como la generación de agua.

El consumo de energía dentro de un avión es destinado a iluminación, galleys y actuadores electro-hidráulicos. En aviones convencionales, esta energía es proporcionada por los motores principales. En tierra cuando los motores se encuentran apagados, se utiliza la fuente de poder auxiliar (APU) para proveer energía a los sistemas del avión. Las Fuel Cells surgen como una alternativa para combinar la generación de electricidad a través de los motores y fuentes auxiliares; así mismo siendo las FC una fuente independiente, puede entregar energía tanto en vuelo como en tierra. Las principales beneficios del uso de FC son: la producción de agua, gases no contaminantes, menor consumo de combustible y operaciones silenciosas.

5.1.2. Definición

Es complejo definir de manera precisa y universal que es y que no es, una celda de combustible (Fuel Cell). En una forma ideal, una FC es un simple dispositivo alimentado por: carbón, petróleo crudo o gasolina que puede generar electricidad a partir de una reacción directa de oxidación electroquímica usando el oxígeno del aire. No obstante, existen otras definiciones para el término "celda de combustible". De acuerdo a Bacon, el uso común (como definición) para una FC se aplica a una variedad de dispositivos generadores de energía electroquímica (Bacon, 1969). Boudghene, las define como: dispositivos estáticos convertidores de energía, realizada a partir de una reacción química de combustibles que se transforman directamente en energía eléctrica, produciendo agua como subproducto (Stambouli, 2011).

De las definiciones anteriores, la idea central para una FC y que servirá de guía de aquí en adelante será, considerar una celda de combustible como: *un dispositivo/generador capaz de producir electricidad y calor combinando electroquímicamente un combustible gaseoso (Hidrógeno) y un gas oxidante (oxígeno presente en el aire) a través de electrodos y un electrolito conductor de iones.*

Durante este proceso, se formará agua como un producto de la reacción, una característica particular y que distingue a las FC del resto de las baterías es que ésta no se agota (no requiere recargar). Es capaz de producir energía continuamente mientras sea abastecida de los reactivos (combustible y oxidante) dejando escapar al exterior los productos de la reacción (agua). Otra de sus características es, la capacidad de convertir directamente energía química en energía eléctrica, entregando eficiencias de conversión mucho más altas que cualquier sistema termomecánico convencional (motores a combustión) de dos a tres veces la eficiencia de los generadores actuales, lo que permite como resultado la posibilidad de extraer más electricidad a partir de la misma cantidad de combustible.

Finalmente, se debe considerar que esta operación no requiere de combustión por lo cual está libre de

contaminación y su funcionamiento es prácticamente silencioso ya que no existen partes móviles que requieran mantenimiento. Esto permite dimensionar la importancia que tienen hoy y tendrán en el futuro cercano la células de combustibles para todo el mundo.

A continuación, la **Figura 5.1** muestra cómo se produce la conversión química de energía del combustible fósil por medio de una FC y una planta de poder convencional (motor a combustión):

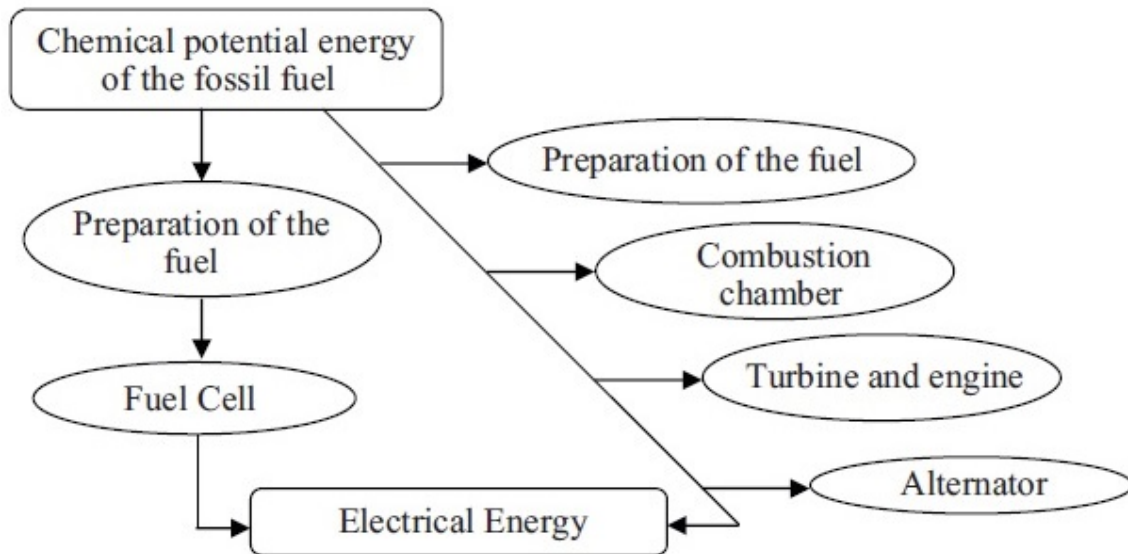


Figura 5.1: Comparación conversión de energía entre FC y planta de poder.

5.1.3. Beneficios de las Fuel Cells

De la figura anterior, es posible verificar la transición casi directa que tiene la obtención de energía eléctrica por medio de una celda de combustible a partir de combustible fósil. Siendo esto uno de sus principales atributos que potencian su uso; se presentan a continuación los principales beneficios que se pueden obtener de una FC:

- **Seguridad Energética**
 - Reducir consumo de petróleo.
- **Confiabilidad**
 - Tiempos de funcionamiento superiores al 90 %.
 - Disponibilidad de energía 99.99 % del tiempo.
- **Bajo costo de Operación**
 - Bajo número de intervenciones por mantenimiento durante su vida útil.
 - Degradación mínima por operación.
- **Producción de Energía constante**
 - Generación continua de energía a diferencia de motores diesel a combustión interna.
 - Alta disponibilidad/confiabilidad
 - Temperatura de funcionamiento de 50 [°C] a 1000 [°C]

■ Opción de Combustible

- Flexibilidad en la selección de combustibles.
- Gas Natural.

■ En comparación con una fuente de poder tradicional

- Evita la producción de 180 toneladas/año de CO_2 .
- Evita la contaminación ambiental de 1.035 kg/año de NO_x .
- Retiene el NO y SO_2 de ser enviado al medio ambiente, eliminando 20.000 kg/año de lluvia ácida.
- Reduce las emisiones de dióxido de carbono por más de 2 millones kg/año.

■ Operación Silenciosa

- No requiere de elementos de protección contra el ruido ni audífonos como en el caso de motores a combustion.

■ Alta Eficiencia

- Convierte hasta 50-70 % del combustible disponible en electricidad (90 % con recuperación de calor).
- Reduce los costos por combustible y conserva los recursos naturales.

Las FC poco a poco han ganado aceptación mundial como el mejor medio para generar y distribuir electricidad debido a su alta eficiencia de conversión, compatibilidad medioambiental, operación confiable y silenciosa. Cuando se utiliza como dispositivo de almacenamiento de energía las fuel cells normalmente se combinan con un dispositivo de generación de combustible, comúnmente un *electrolizador*³, esto permite crear un sistema regenerativo (*RCF: Regenerative Fuel Cell System*) capaz de convertir energía eléctrica en combustible almacenable y luego utilizar el mismo combustible para proporcionar electricidad cuando sea necesario (Smith, 2000).

Los tipos más comunes de RCF propuestos para ser utilizados consideran al Hidrógeno como fuente de combustible y medio de almacenamiento para la generación de energía a través de la electrólisis del agua. La clave para la eficacia del sistema RCF es la capacidad de separar la función almacenamiento de energía de la conversión, permitiendo optimizar cada uno (ver **Figura 5.3**).

5.2. ¿Cómo opera una Fuel Cell?

Una Fuel Cell es un dispositivo electroquímico que convierte la energía química de un combustible directamente en electricidad. La FC está constituida por un electrolito intercalado entre dos electrodos; el electrolito es una membrana conductora de protones, el combustible es hidrógeno y el oxidante es el oxígeno.

³Aparato que produce corrientes eléctricas continuas para realizar la electrólisis

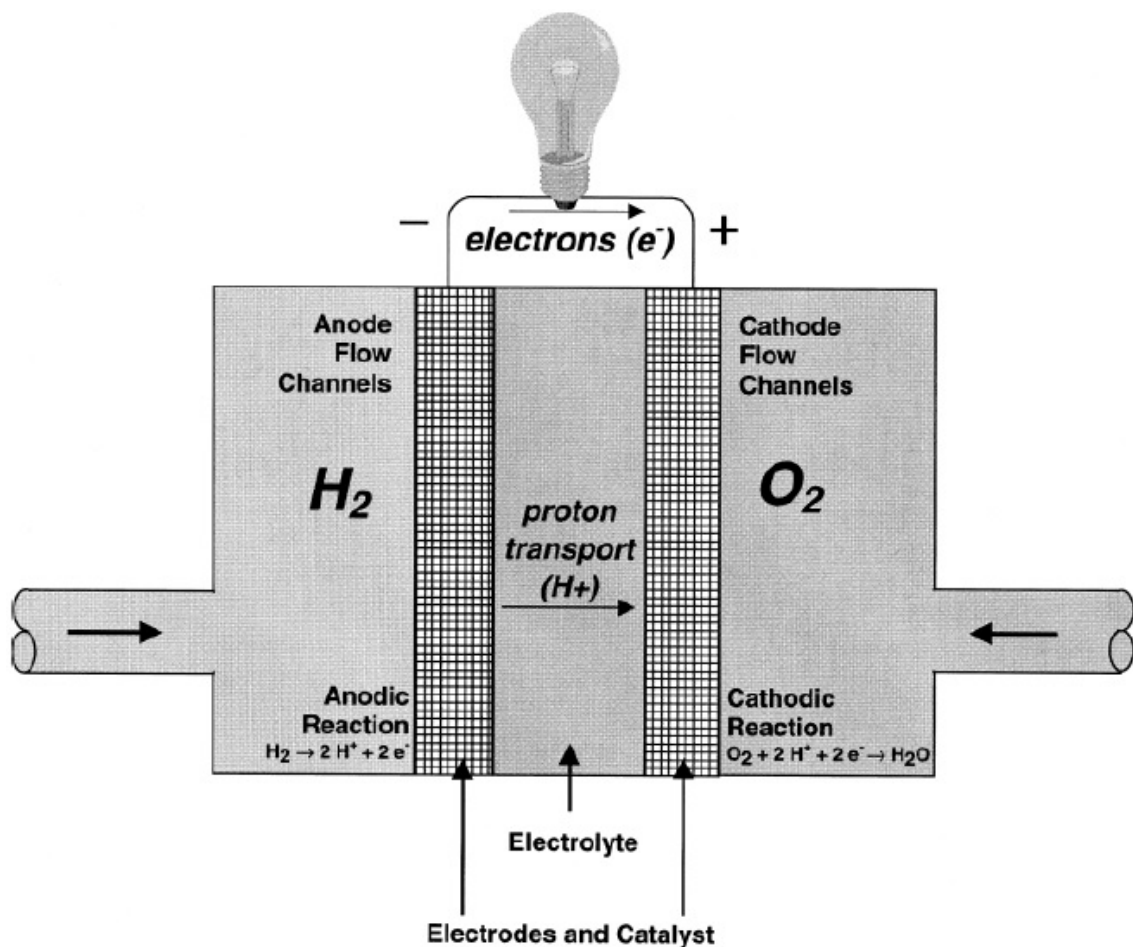


Figura 5.2: Reacción electroquímica de una Fuel Cell

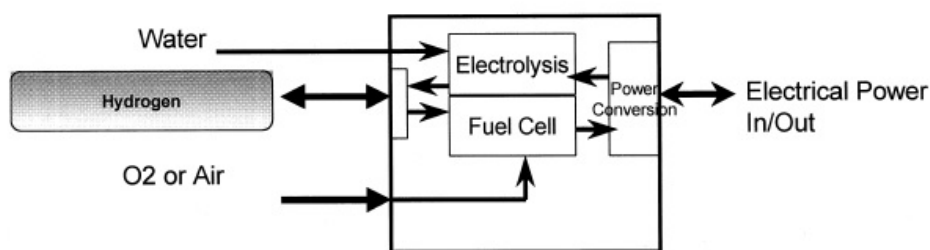


Figura 5.3: Sistema RCF

Una FC esencialmente requiere de sólo cuatro componentes fundamentales (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.

- 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 FC, 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. **Figura 5.4** y **Figura 5.5** muestran ambas situaciones.
- Cable de interconexión de O_2

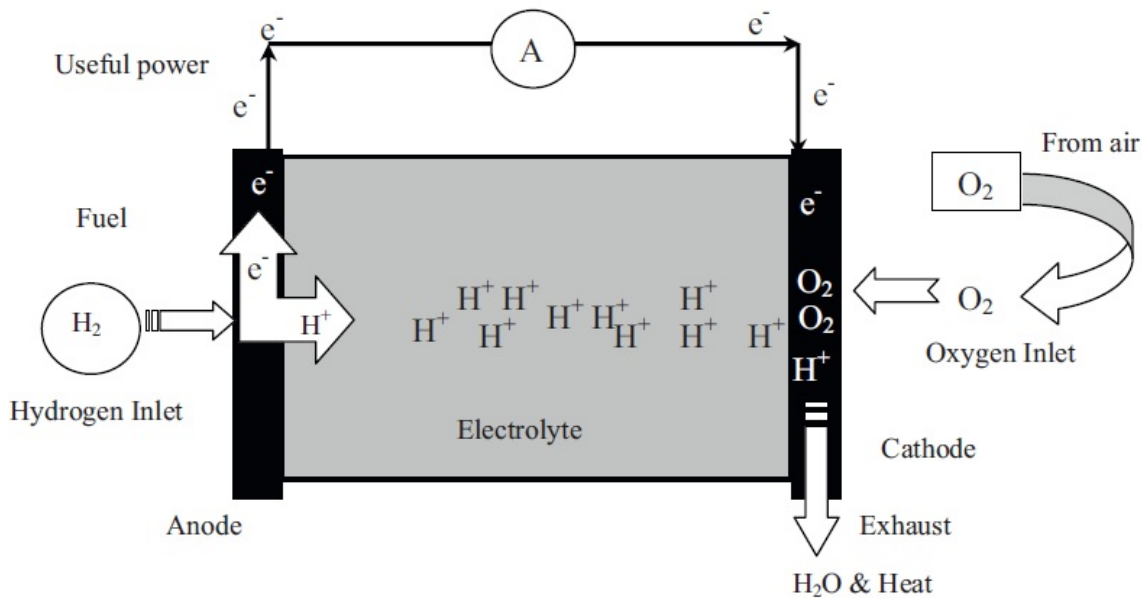


Figura 5.4: Configuración de una FC - conductor protón hidrógeno

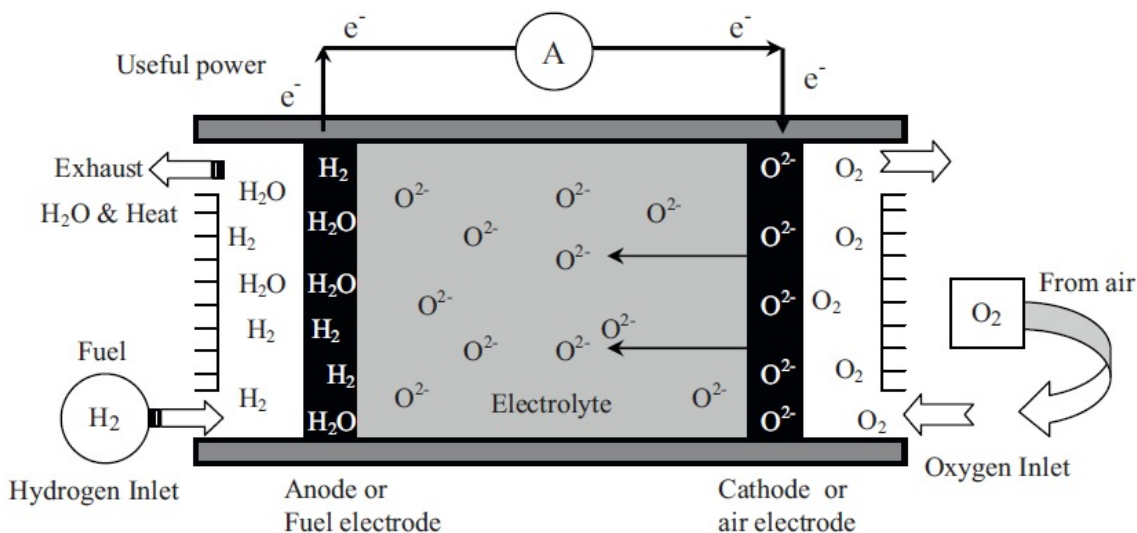


Figura 5.5: Configuración de una FC - conductor ión oxígeno

El catalizador se utiliza para facilitar la reacción del oxígeno con el hidrógeno, este puede ser un recubrimiento de platino o níquel. El catalizador en el ánodo, promueve la oxidación de moléculas de hidrógeno en iones H^+ y electrones: los iones de hidrógeno se mueven a través de la membrana hasta el cátodo, donde el cátodo catalizador provoca la combinación de los iones de hidrógeno, electrones y oxígeno para formar agua.

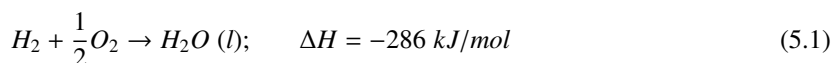
Durante el funcionamiento de la FC, el hidrógeno se ioniza en protones y electrones en el ánodo; los iones de hidrógeno son transportados a través del electrolito al cátodo, y los electrones también se desplazan al cátodo, pero por un camino diferente, a través del circuito externo. En el cátodo, el oxígeno (en la mayoría de los casos proveniente del aire) se combina con los iones de hidrógeno y electrones para producir agua. Por lo tanto, la reacción global en la FC es la reacción espontánea del hidrógeno y el oxígeno para producir electricidad y agua (Srinivasan et al., 1999).

Desde el punto de vista termodinámico, el cambio de energía libre (ΔG) de la reacción química es la energía que está disponible para convertirse directamente a energía eléctrica, mientras que la entalpía de reacción (ΔH) es la cantidad total de energía que se libera en la reacción a presión constante. La **Tabla 5.1** resume estos valores para una celda de combustible H_2/O_2 que funciona de forma reversible a $\pm 25^\circ\text{C}$ y 1 atm de presión. El potencial de la celda para este ejemplo es de 1,23 V; basado en el valor máximo de temperatura del hidrógeno. Normalmente, las eficiencias se basan en ΔG o ΔH de la reacción. Sin embargo, cuando se produce una reacción química en la que uno de los productos de la reacción es agua (la cual podría estar en fase líquida o gaseosa) existe cierta ambigüedad en cuanto al verdadero valor del calor de reacción (ΔH a presión constante).

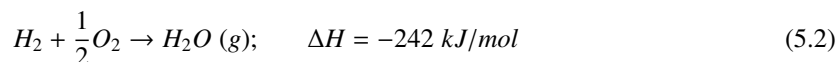
Tabla 5.1: Parámetros de FC a máxima y mínima temperatura alcanzado por el Hidrógeno.

Parámetro	Valor a máxima temperatura	Valor a mínima temperatura
Entalpía (ΔH)	-286 kJ/mol	-242 kJ/mol
Energía libre de Gibbs (ΔG)	-237 kJ/mol	-229 kJ/mol
Voltaje Reversible	1.229 V	1.185 V
Eficiencia teórica	83 %	94.5 %

El valor máximo a temperatura, corresponde a la liberación de calor cuando el producto de la reacción con oxígeno es agua líquida, como se muestra en la siguiente ecuación:



El valor mínimo a temperatura corresponde al calor liberado cuando el producto de la reacción es vapor de agua:



La diferencia de entalpías en el valor máximo y mínimo es el calor necesario para vaporizar el agua de los productos. Cuando el agua de los productos es capaz de condensarse en líquido, hay más calor liberado por la reacción. Por consistencia en el desarrollo de este trabajo, todas las eficiencias se basarán en el valor a mínima temperatura de la reacción.

Debido a la irreversibilidad de las reacciones en la interfase electrodo/electrolito, el transporte de masa y las pérdidas óhmicas; la eficiencia de las FC son inferiores a los valores teóricos. Aún así, las eficiencias alcanzadas en prototipos son considerablemente más altas. Las reacciones electroquímicas en una fuel cell en la interfase electrodo/electrolito son similares a reacciones heterogéneas en interfases sólido/gas o sólido/líquido.

Para aplicaciones prácticas (generación de energía, vehículos eléctricos, y fuentes portátiles de energía) se requieren niveles de potencia elevados. Por lo tanto, la parte esencial de una fuel cell como planta de poder es el número de FC individuales en una configuración capaz de responder a estos requerimientos. Tal

configuración requiere de equipos auxiliares para el conjunto de FC que provean de reactantes, ayuden en eliminación de productos y en la gestión térmica del agua (ver **Figura 5.6**).

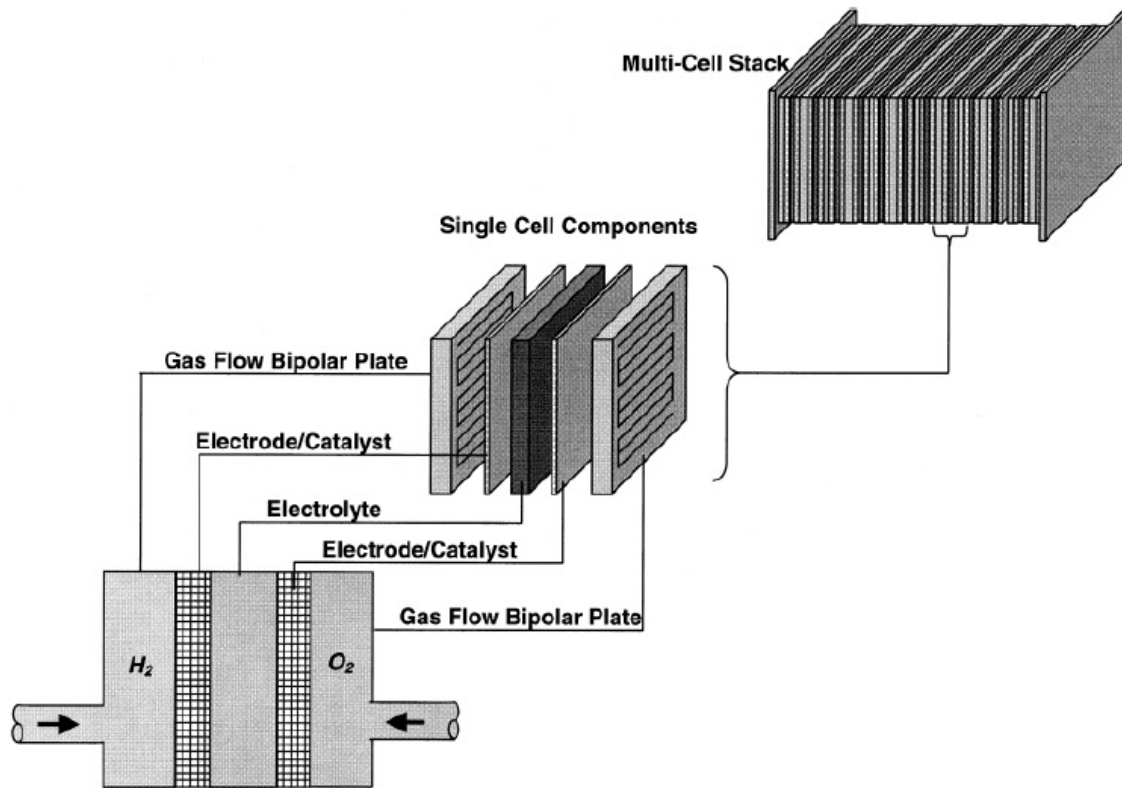


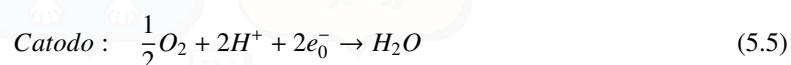
Figura 5.6: Conjunto de Fuel Cells

5.2.1. Eficiencia y Características de Potencia

De acuerdo a lo revisado en la sección anterior, la reacción predominante en una FC es:



Esta reacción en general, es la misma que ocurre en la combustión del hidrógeno en una central térmica. En una planta de poder de FC la energía química de un combustible se convierte directamente en energía eléctrica como se muestra en la **Figura 5.2** y **Figura 5.6**; la ecuaciones que representan esta transformación son las siguientes:



La reacción del hidrógeno y el oxígeno para producir agua es espontánea, es decir, que termodinámicamente es una reacción favorecida porque la energía liberada de los productos es menor que la energía liberada de los reactantes. El ΔG de la reacción mostrada por la **Ecuación 5.3** es la energía disponible en un proceso isotérmico. Idealmente, esta energía se puede convertir completa y directamente en energía eléctrica. Y debido a que ΔH para la reacción es la energía total disponible, la *eficiencia teórica reversible* (ε_r) para una FC se representa por la siguiente relación:

$$\varepsilon_r = \frac{\Delta G}{\Delta H} \quad (5.6)$$

Cuando el producto de la reacción electroquímica en la FC es agua líquida, a 25°C y 1 atm de presión para cada uno de los gases reactivos, $\varepsilon_r = 0,83$. Sin embargo, como se había mencionado en el apartado anterior, la eficiencia teórica era de 0,94. La energía libre (ΔG) de la reacción es menor que la entalpía (ΔH) porque se debe generar cierto calor, sumado a que la entropía del sistema disminuye. Esta pérdida de potencial (representada en la Región 1 de la **Figura 5.7**) es causada por la diferencia entre la energía libre y la entalpía de la reacción.

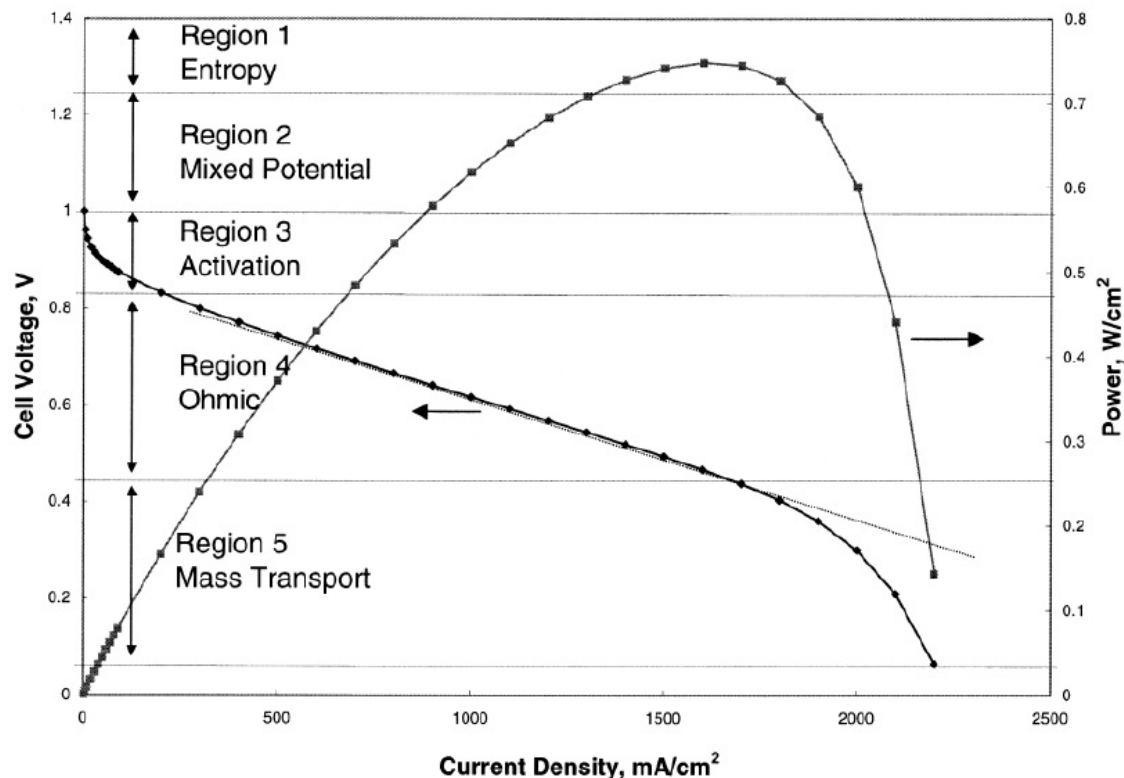


Figura 5.7: Potencial de una Fuel Cell

Las eficiencias que logran las FC, en general son un 30 % ó 40 % menores que los valores teóricos (Srinivasan et al., 1999). Como se muestra en la Región 2 de **Figura 5.7**, el potencial de circuito abierto es menor que el potencial reversible de 1,23 V, calculado a partir del ΔG de la reacción. Esto se debe principalmente a dos factores: la mezcla de combustible desde el ánodo al cátodo y un potencial mixto que resulta de las corrientes galvánicas ⁴ en el electrodo de oxígeno, que es causada por la oxidación del platino.

Por otra parte, los estudios cinéticos han demostrado que existen tres tipos principales de pérdidas en el potencial de las FC (E) frente al comportamiento de la densidad de corriente (i). La **Figura 5.7** muestra cada una de estas pérdidas de potencial (la disminución desde el valor teórico en el voltaje de operación con el incremento en la densidad de corriente). El comportamiento semi-exponencial de la curva E vs i , a densidades de corriente baja (Región 3) surge de la velocidad cinética (lenta) de la reacción de reducción de oxígeno representada por la **Ecuación 5.5**.

Para lograr densidades de corriente elevadas, es de vital importancia minimizar la transferencia de carga y las pérdidas potenciales por el transporte óhmico y de masa. Las FC que operan a elevadas temperaturas, tales como: las de carbonato fundido y las de óxido-sólido (MCFC y SOFC), muestran mejoras significativas en la cinética de las reacciones esto se refleja en la ausencia de la región semi-exponencial en el gráfico E vs i . En estos tipos de FC, la pérdida de eficiencia es causada por la resistencia óhmica del electrolito.

La eficiencia de voltaje (ε_v) de una FC está dada por:

$$\varepsilon_v = \frac{E(i)}{E_r} \quad (5.7)$$

⁴Corriente continua, ininterrumpida y de intensidad constante, también denominada directa. Se le denomina constante, porque mantiene su intensidad fija durante el tiempo de aplicación

Donde $E(i)$ es el potencial de la FC en función de la densidad de corriente i , la forma del gráfico ε_v vs i es idéntica a la gráfica E vs i debido a que el potencial es proporcional a la eficiencia. Otro tipo de pérdida en eficiencia que ocurre en una FC se produce cuando parte de la energía química del combustible no se convierte en energía eléctrica; esto puede ocurrir debido al cruce de combustible en el cátodo donde se consume sin el flujo de electrones a través de la carga externa.

Otro tipo de pérdida en eficiencia puede ocurrir cuando el combustible entra a la FC pero no es consumido del todo, atravesando la celda sin reaccionar. Normalmente los sistemas están diseñados para aprovechar situaciones como esta generando un flujo de escape que alimente una cámara de combustión y turbina.

La eficiencia farádica o eficiencia de corriente (ε_f), siempre es menor a 1 y se representa de la siguiente forma:

$$\varepsilon_f = \frac{i_f}{i_t} \quad (5.8)$$

Donde i_f representa la corriente generada en la FC e i_t es la corriente total si todo el combustible fuera oxidado electroquímicamente, en la FC, a CO_2 y H_2O .

La eficiencia global (ε) de una FC, en base al cambio de entalpía por la reacción interna, es el producto de estas tres eficiencias:

$$\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_v \varepsilon_f \quad (5.9)$$

Debido a que ε_f es siempre cercano a 1, la eficiencia global es normalmente igual a la eficiencia de voltaje multiplicado por la eficiencia reversible. Comúnmente la eficiencia global de una FC se representa por la siguiente ecuación:

$$\varepsilon_{fc} = \frac{V}{1,482} \quad (5.10)$$

La energía eléctrica generada por una FC (por unidad de área del electrodo) está dada por la siguiente ecuación:

$$P = E \cdot i \quad (5.11)$$

De la **Figura 5.7**, se sigue que el gráfico P vs i pasa a través de un punto máximo. Debido a que la región lineal es la que domina en la gráfica E vs i (curva de polarización), la potencia máxima se encuentra en un potencial de celda que es aproximadamente igual a la mitad del potencial del circuito abierto. Por lo tanto, la eficiencia en una planta de FC sería de $\sim 40\%$. Sin embargo, para la mayoría de las aplicaciones (generación de electricidad y transporte), es deseable conseguir una mayor eficiencia, pero en sacrificio de una máxima densidad de potencia, operando así a un potencial más alto pero a una menor densidad de corriente. Las eficiencias de voltaje a densidades de corriente típicas de operación para todos los tipos de FC están generalmente en el rango de 50% a 60% .

Las pérdidas irreversibles, esto es: entropía, transferencia de carga, transporte de masa y sobrepotencial óhmico en un FC operativa dan como resultado la generación de calor residual. La tasa ($\dot{Q}$) se representa por la siguiente ecuación:

$$\dot{Q} = -\frac{T\Delta S}{nF} + i(\eta_{act} + \eta_{ohmic} + \eta_{conc}) \quad (5.12)$$

Donde T es temperatura, ΔS es el cambio de entropía por la reacción ($\Delta G = \Delta H - \Delta S$), n es el número de electrones involucrados en la reacción, F es la constante de Faraday, y η_{act} , η_{ohmic} y η_{conc} son los sobrepotenciales de transferencia de carga, óhmico y de transporte de masa, respectivamente. Cualquiera sea la fracción de entalpía total de la reacción que no entra en la generación de electricidad, en última instancia terminará como calor. Por lo tanto, para una FC que funciona al 50 % de eficiencia global, el sistema de refrigeración debe ser capaz de eliminar el calor a una velocidad igual a la potencia eléctrica que se genera (es decir, $\dot{Q} = P$).

Muchos autores recientemente han intentado analizar el potencial de las FC respecto del comportamiento en la densidad de corriente utilizando como ejemplo una PEMFC, esta base teórica podría ser aplicada a otros tipos de FC (Bernardi and Verbrugge, 1992) (Springer et al., 1993) (Rho et al., 1994).

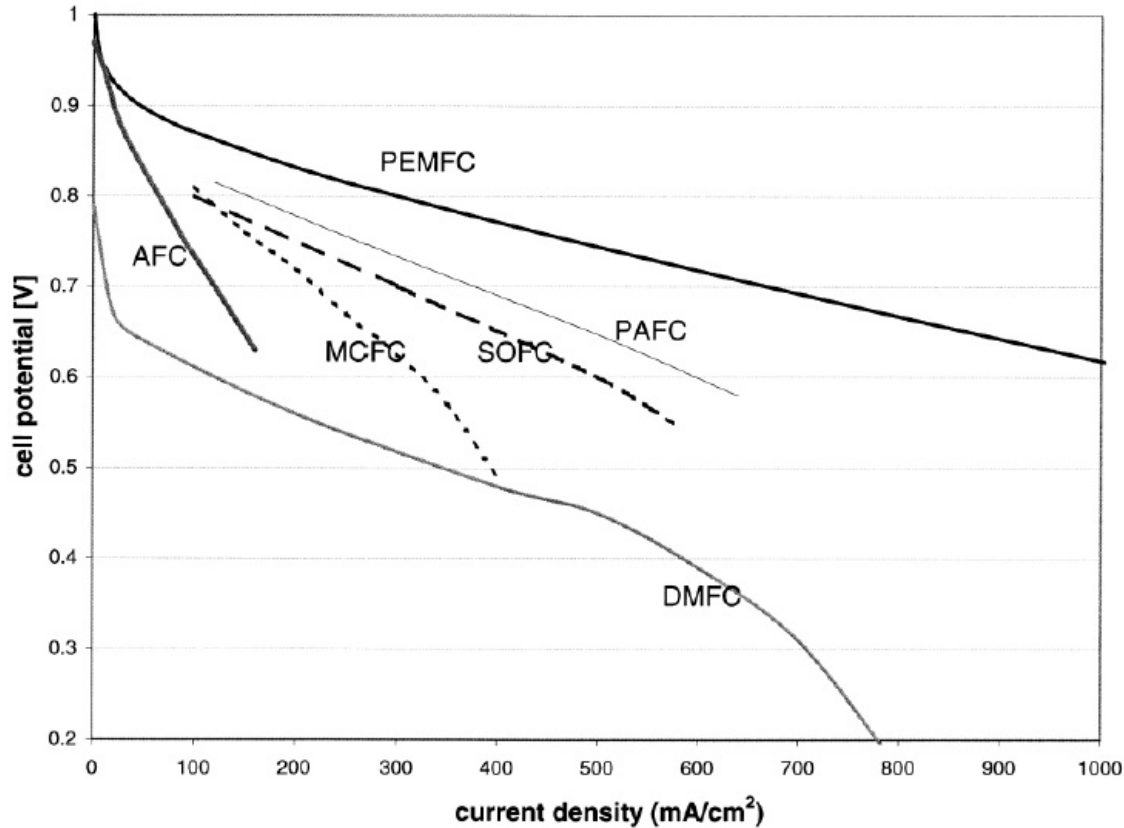


Figura 5.8: Potencial de corriente vs densidad para tipos de FC existentes

El análisis realizado por los autores, permite determinar una ecuación que describe el comportamiento del potencial para una FC (PEMFC):

$$E(i) = E_o - b \ln(i) - i R \quad (5.13)$$

donde,

$$E_o = E_r + b \ln(i_o) \quad (5.14)$$

se ha demostrado que las ecuaciones anteriores se ajustan a los datos experimentales. E_r representa el potencial termodinámico reversible, i_o es el cambio en la densidad de corriente, b es la pendiente de Tafel, R resistencia óhmica del electrolito.

No ha sido posible derivar una expresión para la dependencia del potencia para la FC sobre la densidad de corriente cuando cada tipo de sobrepotencial (η_{act} , η_{ohmic} , η_{conc}) es significativo. Los resultados han llevado a una ecuación semi-empírica que se ajusta bastante bien:

$$E_i = E_o - b \ln(i) - Ri - m e^{ni} \quad (5.15)$$

donde,

$$E_o = E_r + b \ln(i_0) \quad (5.16)$$

El último término de la **Ecuación 5.14** representa la variación del potencial con la densidad de corriente debido al sobrepotencial del transporte de masa (Región 5 en la **Figura 5.7**), m y n son parámetros empíricos.

5.3. Tipos Fuel Cells

Durante el transcurso de los años, las investigaciones desarrolladas en el campo de las FC han establecido varias formas de clasificarlas, como por ejemplo: tipo de combustible utilizado, temperatura de operación, electrolito utilizado, sistema directo/indirecto, sistema primarios y regenerativos, entre otros. En el último tiempo la clasificación más utilizada ha sido por el tipo de electrolito usado en la FC ([Matera et al., 2011](#)).

A continuación se describen los principales tipos de FC conocidos y estudiados en la actualidad:

5.3.1. Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)

También se conoce como, SPEFC (Solid Polymer Electrolyte Fuel Cell). El electrolito utilizado en esta célula es una membrana polimérica que permite el intercambio iónico; la función de esta membrana es proveer un camino de conducción iónico mientras que al mismo tiempo es una barrera que separa el combustible del oxidante, por otra parte la membrana debe ser un aislante eléctrico. El transporte de iones en la membrana depende de la cantidad de agua libre y cómo esté dentro del polímero ([de Lucas Martínez, 2007](#)). La temperatura de operación está limitada a los 100°C debido a la pérdida de agua por evaporación desde la membrana.

Membranas muy delgadas (10-100 μm) son utilizadas en este tipo de FC para minimizar la resistencia óhmica de esta forma se obtienen altas eficiencias y densidades de potencia, de acuerdo a la **Figura 5.8** las PEMFC muestran los niveles más altos de rendimiento en comparación con los otros tipos de FC.

El desarrollador líder en este tipo de FC es Ballard Power System, Inc ([Ballard, 2017](#)). Ha construido plantas de poder de potencia nominal (demostrada) igual a 1-100 kW, con una eficiencia $\sim 44\%$ (basada en HHV o temperatura máxima de operación) y densidad de poder $>0,5 \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}$; células individuales operan a $1 \frac{\text{A}}{\text{cm}^2}$ y ~ 65 V. Debido a la tasa de generación de calor (elevada) a este nivel de potencial ($\sim 0,8 \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}$) se requiere un sistema de refrigeración muy eficiente.

El renacimiento de esta tecnología desde mediados de 1980, es en gran parte resultado de la capacidad de la PEMFC para alcanzar una potencia específica, densidad de potencia y eficiencia energética alta (en comparación con otros tipos de FC). Estos atributos y la baja temperatura de funcionamiento, junto con los cortos tiempos de arranque son vitales para su uso en transporte ([Gottesfeld and Zawodzinski, 1997](#)).

5.3.2. Direct Methanol Fuel Cells (DMFC)

Este tipo de FC es un tipo especial de célula de combustible que funciona a baja temperatura, normalmente a temperaturas ligeramente superiores a la PEMFC. En la DMFC el metanol alimenta directamente a la célula sin etapas intermedias que reforman el alcohol en hidrógeno (Barton et al., 1998). Por otra parte, el metanol resulta un fuente muy atractiva de combustible porque puede ser producido del gas natural o de recursos renovables como la biomasa. Tiene la ventaja de una elevada densidad de energía específica (ya que es líquido en condiciones de funcionamiento); de esta forma las DMFC puede operar con mezclas líquidas o gaseosas de metanol/agua.

Las ventajas técnicas y económicas proyectadas para este tipo de FC, por sobre las PEMFC son (Carrette et al., 2001):

1. Elimina la necesidad de un procesador de combustible para producir hidrógeno, por lo tanto se reduce peso, volumen y costo.
2. El metanol es un líquido con una alta densidad de energía (mismo potencial energético, pero en la mitad del volumen y peso de la gasolina); por otra parte, es mucho más fácil de transportar a bordo de un vehículo que el hidrógeno, de este modo se puede eliminar el procesador de combustible.
3. Usando alrededor de un mol de metanol directamente en la fuel cell, es posible minimizar en gran medida los problemas de gestión de agua y temperatura.
4. Una DMFC compacta es una fuente portátil de energía ideal para salidas que requieren desde unos pocos vatios hasta uno cuantos kilowatts debido a los mayores valores de energía específica y densidad que cualquier otra batería similar.

Los desafíos futuros en el desarrollo de las DMFC apuntan a:

1. Encontrar electrocatalizadores que mejoren la cinética de electro-oxidación del metanol.
2. Minimizar el crossover de metanol (a diferencia del H_2 , el metanol es completamente soluble en el electrolito) y por lo tanto la pérdida de eficiencia farádica.
3. Reducir la degradación en el desempeño causado por el envenenamiento del electrocatalizador por la absorción de CO.

5.3.3. Alkaline Fuel Cells (AFC)

Las AFC presentan una ventaja única por sobre cualquier otra FC, tiene la mayor eficiencia eléctrica; pero funcionan correctamente sólo con gases muy puros, que normalmente es una restricción en la mayoría de las aplicaciones. El electrolito de KOH usado en las AFC (usualmente en concentraciones de 30-45 % peso) tiene la ventaja en cuanto a la velocidad de óxido reducción en el electrolito alcalino que en uno ácido, haciendo esto mucho más atractivas a las AFC para aplicaciones específicas. Las AFC fueron las primeras FC utilizadas en misiones espaciales como las misiones Apolo, el programa espacial Shuttle y en el proyecto europeo Hermes (Kordesch et al., 2000).

Por otra parte, un problema importante que presenta este tipo de FC es la baja tolerancia al CO_2 incluso en concentraciones bajas como las que se encuentran en el aire (350 ppm), y que son la fuente de oxígeno para la reacción en las FC; de tal forma que se requiere un depurador (como subsistema) de CO_2 . El problema del CO_2 radica en los depósitos de carbonato sólido que se forman tanto en los electrodos como en el electrolito, bloquean los canales de flujo restringiendo el transporte de reactivos a los sitios activos reduciendo así la conductividad iónica del electrolito (De Geeter et al., 1999).

5.3.4. Phosphoric Acid Fuel Cells (PAFC)

Las PAFC ha sido el único tipo de FC que ha alcanzado la etapa comercial durante el siglo XX. El ácido fosfórico (H_3PO_4) es un excelente electrolito capaz de utilizar el hidrógeno producido por conversión de vapor reformado de hidrocarburos orgánicos (por ejemplo, gas natural) y alcoholes (metanol o etanol). A diferencia de otros sistemas electrolíticos ácidos, el agua no interviene en el mecanismo de transporte; los protones son conducidos directamente por el ácido que también sirve como disolvente. Se forma el ión fosfonio (H_4POC_4), similar al ión hidronio (H_3OC) y se produce un salto de protones a través de la molécula de ácido fosfórico (Carrette et al., 2001).

La temperatura de funcionamiento alcanza $\sim 200^\circ\text{C}$, por encima de los 150°C el ácido fosfórico se polimeriza en ácido pirofosfórico ($H_4P_2O_7$) alcanzando mayor conductividad debido a su fuerte ionización con el ácido.

Las ventajas de este sistema son:

1. Electrolito inerte y estable en un entorno oxidante o reductor.
2. Capacidad de operar $\sim 200^\circ\text{C}$, y logrando que el calor residual alcance temperaturas que permiten el procesamiento de combustible.
3. Debido a su funcionamiento en el intervalo de temperatura $180\text{-}200^\circ\text{C}$, la tolerancia al CO en el ánodo es $\sim 1\text{-}2\%$ por lo que no existe la necesidad de una etapa de oxidación preferencial como sí se requieren en las PEMFC.
4. El agua producida se elimina como vapor.

De esta forma las ventajas de las PAFC se pueden agrupar en: su fácil construcción, estabilidad térmica, química y electroquímica y la baja volatilidad del electrolito a temperaturas de funcionamiento ($150\text{-}200^\circ\text{C}$).

5.3.5. Molten Carbonate Fuel Cells (MCFC)

Los sistemas MCFC ofrecen una promesa de alta eficiencia en la generación de electricidad junto con la capacidad de consumir combustibles a base de carbono. En las MCFC, la reacción catódica consume oxígeno y dióxido de carbono para producir iones carbonato; estos iones se transportan a través del electrolito hasta ánodo en donde el hidrógeno reacciona con el carbonato para producir agua y dióxido de carbono. El CO_2 se recicla y regresa a la corriente catódica (Baker and Maru, 1997).

Las principales características de este sistema son:

1. Altas temperaturas de funcionamiento ($600\text{-}700^\circ\text{C}$).
2. El monóxido de carbono es un combustible y no un contaminante, lo que no ocurre con las FC que operan a temperatura baja o intermedia (PEMFC y PAFC, respectivamente).
3. El calor residual procedente de la FC es de calidad suficiente para ser utilizado en la generación de energía eléctrica adicional en una turbina de vapor o gas, permitiendo procesos químicos de alta eficiencia.
4. Es posible llevar a cabo el procesamiento de combustible a base de gas natural en la FC.

Las MCFC pueden alcanzar eficiencias eléctricas de hasta 50% o incluso 70% al combinar la celda de combustible con otros generadores de energía. Las MCFC pueden funcionar en una amplia gama de combustibles diferentes y no son propensos a la contaminación por CO o CO_2 como en el caso del resto de las FC.

No obstante, las principales dificultades que presenta este tipo de células son las siguientes:

1. Sintetización de las partículas de níquel en el ánodo.

2. Corrosión.
3. Migración del electrolito.

5.3.6. Solid Oxide Fuel Cells (SOFC)

La SOFC es el competidor directo de las MCFC, ambos tipos de celdas funcionan a altas temperaturas; en las SOFC es posible alcanzar los 1000°C durante su operación. Una de las características más atractivas de este tipo de FC es que utiliza un electrolito sólido y por lo tanto, es un sistema de dos fases (sólido/gas) en cambio las otras FC funcionan a tres estados (sólido/gas/líquido). De esta forma, se elimina el problema asociado al transporte masivo de reactivos y productos en fases líquidas dentro del electrodo (Park et al., 1999).

Las SOFC utilizan un electrolito cerámico, en su mayoría los desarrolladores industriales utilizan actualmente 85-90 % de Zirconio y aproximadamente 10-15 % de Itrio como electrolito sólido. Los materiales para construir una SOFC son relativamente económicos, pero las técnicas de fabricación requieren elementos y técnicas considerablemente costosas (Ihara et al., 1999).

Los principales avances que ha logrado este tipo de FC han sido:

1. Usar métodos de conducción iónico-electrónica mixta en ánodos y cátodos para mejorar el área de reacción y reducir el sobrepotencial de activación.
2. Desarrollar celdas de capa ultra finas de electrolito sólido, minimizando el sobrepotencial óhmico y permitiendo así alcanzar temperaturas de operación entre los 650-800°C (temperatura ideal para la transformación interna de combustible, tales como el gas natural).

Tabla 5.2: Reacciones electroquímicas en las diferentes tipos de FC

Fuel Cell	Reacción en el Ánodo	Reacción en el Cátodo	Ion conducido por el electrolito
AFC	$H_2 + 2OH^- \rightarrow 2H_2O + 2e_0^-$	$\frac{1}{2}O_2 + H_2O + 2e_0^- \rightarrow 2OH^-$	OH^-
PEMFC	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e_0^-$	$\frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e_0^- \rightarrow H_2O$	H^+
DMFC	$CH_3OH + H_2O \rightarrow CO_2 + 6H^+ + 6e_0^-$	$\frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e_0^- \rightarrow H_2O$	H^+
PAFC	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e_0^-$	$\frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e_0^- \rightarrow H_2O$	H^+
MCFC	$H_2 + CO_3^{2-} \rightarrow H_2O + CO_2 + 2e_0^-$	$\frac{1}{2}O_2 + CO_2 + 2e_0^- \rightarrow CO_3^{2-}$	CO_3^{2-}
SOFC	$H_2 + O^{2-} \rightarrow H_2O + 2e_0^-$	$\frac{1}{2}O_2 + 2e_0^- \rightarrow O^{2-}$	O^{2-}

Las **Tabla 5.2** y **Tabla 5.3** resumen los tipos de FC revisadas en esta sección, junto con las principales reacciones electroquímicas ocurridas en cada una de ellas (ánodo y cátodo) y el ion conducido. Por otra parte, se identifican las principales características como: temperatura de operación, combustible utilizado, contaminante liberado y las más importantes aplicaciones.

Estudiado el origen y desarrollo de las células de combustible, su operación y tipos, junto con su eficiencia. Corresponde ahora, avanzar y explorar en más detalle los costos y emisiones que resultan al utilizar este tipo de tecnología; identificar el grado de contaminación por parte de las FC y la conveniencia económica por sobre los actuales sistemas de generación eléctrica aplicados a la aviación comercial puede significar un punto de comparación clave en la futura aceptación y aplicación de esta tecnología.

Tabla 5.3: Características principales de los diferentes tipos de FC

Característica	Tipo de Fuel Cell				
	PEMFC	DMFC	AFC	PAFC	MCFC
Electrolito	PEM	PEM	Hidróxido de Potasio	Ácido Fosfórico	Carbonato Fundido
Temp. Operación	50-90°C	50-90°C (<130°C)	50-250°C	180-200°C	650°C
Transportador de Carga	H^+	H^+	OH^-	H^+	CO_3^{2-}
Electrocatalizador	Platino (Pt)	Pt	Pt, Ni/NiO _x	Pt	Ni/LiNiO _x
Combustible	H ₂ puro	CH ₃ OH	H ₂	H ₂ (reformado)	H ₂ , CO, CH ₄
Contaminante	CO >10 ppm	Asimilado	CO, CO ₂	CO >1 % // H ₂ S >50 ppm	H ₂ S >0.5 ppm
Aplicaciones	Portátil, Transporte	Portátil, Transporte	Misiones Espaciales	Generación Eléctrica, Transporte	Generación Eléctrica
					Óxido Sólido 750-1050°C O^{2-} Ni H^+ , CO, CH ₄ H_2S >1 ppm Generación Eléctrica



6 | Análisis de Costos y Emisiones

6.1. Análisis de Costos para las Fuel Cells

Como cualquier motor a combustión interna, tanto las APUs como los motores principales de un avión presentan deterioro a lo largo de su vida debido al uso. El Departamento de Energía de Estados Unidos (Brodrick et al., 2002) ha estimado que anualmente se pierde \$ 1 Millón de dólares por consumo de combustible diesel cuando un motor se encuentra en estado de ralentí (o *idle*)⁵ sumado a casi \$ 1 billón gastado en mantenimiento.

Durante la última década las Fuel Cells han recibido la atención del mundo, ya que ofrecen una alternativa real para masificar su producción (y venta) a bajo costo; cumpliendo con los requerimientos de propulsión o energéticos para vehículos de transporte, en particular el uso y beneficio que puede tener en la aviación comercial (Stodolsky et al., 2000). Mientras los turbo-propulsores (motores y APU) convencionales proporcionan una aceleración constante, la eficiencia en el uso del combustible a penas puede alcanzar el 30 % dependiendo de las condiciones. Artículos y publicaciones indican que el costo de combustible utilizado alcanza 15 veces más el precio normal; debido a los costos en transporte, distribución y almacenamiento (Lovins and Kyle Datta, 2005). El costo de distribución del combustible puede alcanzar los $600 \frac{US}{gal}$.

6.1.1. Análisis de Costo

En general, el costo de la generación de electricidad se divide en tres componentes principales (Barbir and Gomez, 1997):

1. Costo de Capital.
2. Costo del combustible.
3. Costo de Operación y Mantenimiento.

De esta forma el costo de la electricidad se puede representar como:

$$C_{elec} = \frac{CCA + CAC}{PAE} \quad (6.1)$$

Donde:

C_{elec} = Costo electricidad [\$/kWh]

CCA = Costo de capital anualizado [\$/año]

CAC = Costo anual del combustible [\$/año]

PAE = Producción Anual de electricidad [kWh/año]

⁵Durante el aterrizaje y taxeo del avión, ambos motores se configuran en posición idle o reversa para detener su marcha

El costo de capital, es decir, el costo de la Fuel Cell se puede anualizar utilizando un factor de recuperación del capital; que toma en cuenta la depreciación y el valor del dinero invertido en el tiempo:

$$C_{elec} = C_{fc} \cdot FRC \quad (6.2)$$

Donde:

C_{fc} = Costo de la FC [\$]

FRC = Factor de recuperación de Capital [1/año]

El factor de recuperación del capital, se calcula de la siguiente manera:

$$FRC = \frac{d(1+d)^L}{(1+d)^L - 1} \cong 0,244 \quad (6.3)$$

Donde:

d = Tasa de descuento ($\sim 7\%$)

L = Tiempo de vida útil [año] (~ 5 años)

Se escoge un tiempo de vida útil cercano a los 5 años ó 40.000 horas de funcionamiento, ya que la literatura expone como componente crítico a la membrana de polímero (Barbir and Gomez, 1997). Una batería de FC, consiste en una serie de FC individuales intercaladas entre placas metálicas y atornilladas junto a la barra de acoplamiento. La corriente eléctrica se extrae desde los extremos de la FC; todas las conexiones de combustible (hidrógeno), oxidante (aire) y refrigerante (agua) que forman el sistema de una FC se conecta a dos "buses" (barras que energizan todo el avión) para proporcionar la electricidad necesaria.

Por lo tanto, el costo de una FC se puede calcular como sigue:

$$C_{fc} = C_{fijo} + C_{celda} \cdot N_{celdas} \quad (6.4)$$

Donde:

C_{fijo} = Costo fijo fila FC [\$/batería].

C_{celda} = Costo de la célula (individual) [\$/célula].

N_{celda} = Cantidad de células (individuales) que forman una batería.

El costo fijo de la batería, representa el costo de aquellos componentes (de la batería) que no varían con el número de celdas; esto incluye: las placas terminales, las placas de bus, las conexiones de fluidos (combustible y oxidante), etc. Por otra parte, los costos de ensamble y pruebas iniciales ya se consideran dentro del costo fijo.

De acuerdo a lo ya revisado en capítulos anteriores, una FC consiste en una membrana de polímero y dos electrodos de gas porosos intercalados entre dos placas colectoras/separadoras. El número de placas colectores/separadoras en una batería es igual al número de FC más uno.

El número de células individuales que componen una batería es función de: la potencial nominal de salida (P_{fc}), la densidad de potencia de la célula seleccionada (P_{celda}) y el área activa de la célula (A):

$$N_{celda} = \frac{P_{fc}}{P_{celda} \cdot A} \quad (6.5)$$

La densidad de potencia de una célula está determinada por el potencial de operación (el cual varía de un potencial máximo y potencial de circuito abierto). El potencial de operación determina la eficiencia en la FC y su densidad de potencia nominal (operación).

La cantidad de electricidad producida anualmente (PAE) por la FC es una función del perfil de carga:

$$PAE = \int P(t)dt \quad (6.6)$$

6

$$PAE = P_{fc} \cdot 8760 \cdot \frac{FC}{1000} \quad (6.7)$$

El *factor de capacidad (FC)* se define como la razón entre la energía realmente producida y la energía que se habría producido, si el sistema hubiera funcionado a su máxima potencia nominal durante el mismo periodo de tiempo (normalmente 1 año). Las fuel cells pueden ser utilizadas en diversas aplicaciones, donde la carga puede ser constante o variable; para un funcionamiento constante a potencia nominal se puede suponer un $FC = 0.9$ (dejando un 10 % del tiempo para mantenimiento programado y de emergencia). En operaciones de carga variable como se muestra en la **Figura 6.1**, el factor de capacidad puede ser 0.5 o incluso tan bajo como 0.15 (este último valor corresponde al ciclo de prueba dinámico para baterías de propulsión en vehículos eléctricos) (Wood et al., 2011).

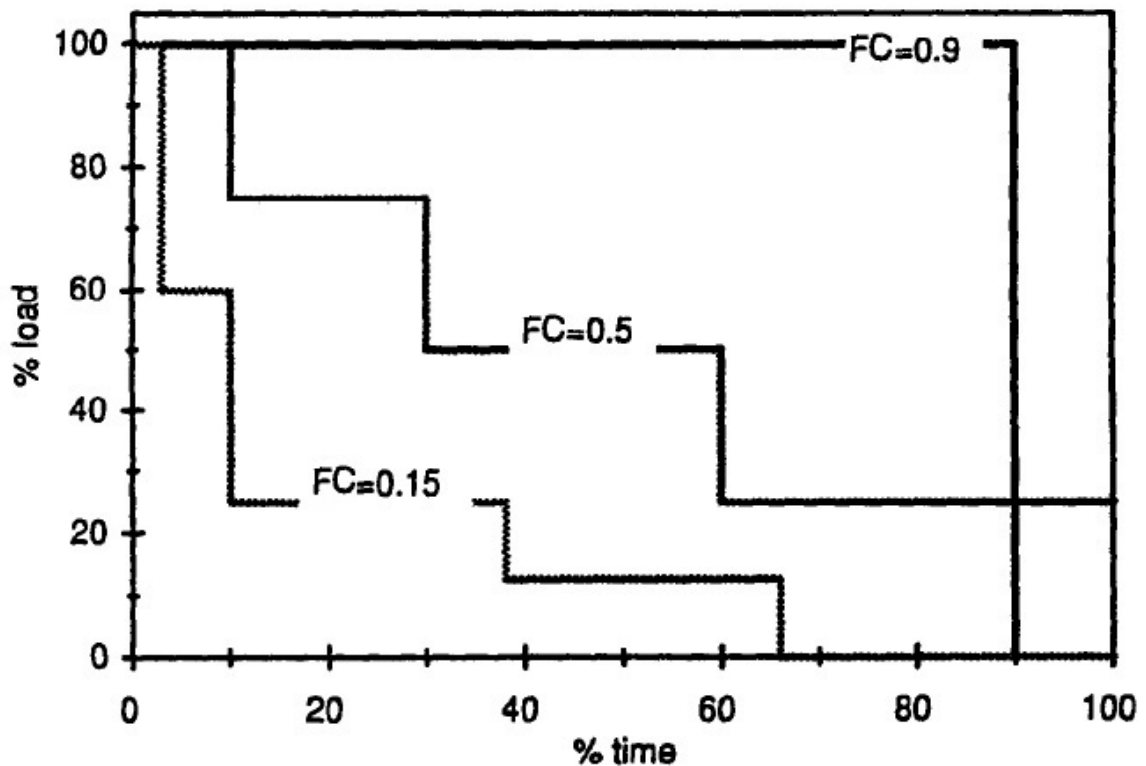


Figura 6.1: Factor de Carga - Comportamiento Variable

La economía o beneficio de las FC puede verse afectada por el factor de capacidad, en aplicaciones con un factor muy bajo, ya que el costo de capital será elevado debido a que la batería se utiliza sólo una parte del tiempo, pero la eficiencia general será alta ya que la mayor parte del tiempo el combustible opera a carga parcial.

El costo anual del combustible (CAC) es:

$$CAC = C_h \cdot PAE \cdot \eta \quad (6.8)$$

Donde:

C_h = Costo del Hidrógeno [\$/kWh].

η = Eficiencia media anual de la FC.

La eficiencia de la FC está representada por la **Ecuación 5.10** que es directamente proporcional a la potencia de la celda. Por otra parte, el potencial real es una función del nivel de potencia que varía según el perfil de carga (constante o variable). Así, la eficiencia media anual se puede calcular a partir de:

$$\eta = \frac{1}{1,482} \sum_j [V(\xi_j) \cdot \tau_j] \quad (6.9)$$

Donde:

$V(\xi)$ = Potencial de la célula a cualquier nivel de potencia dado (ξ).

$\xi = \frac{P}{P_{nom}}$, donde P_{nom} = potencia nominal.

τ = Fracción del tiempo que opera a nivel de potencia $\frac{P}{P_{fc}}$

Revisadas las principales ecuaciones que modelan el costo de una Fuel Cells, es posible comprender que las principales variables que afectan directamente al costo son: desempeño de la FC, costo de la FC (manufactura) y costo del combustible (hidrógeno).

A continuación se presentan diferentes escenarios de acuerdo a cómo varían cada una de las variables que afectan el costo de la electricidad generada por una FC.

6.1.2. Escenarios de Costos - Escenario Base

Para el caso base se realizan las siguientes suposiciones:

1. Potencial nominal de salida: 10 [kW]
2. Desempeño: 3.6 [kW/m²] a 0.6 [V/célula]
3. Costo por célula: U\$ 500
4. Costo por batería (conjunto de células): U\$ 100.000
5. Costo hidrógeno: 20 [U\$/GJ]

Las suposiciones anteriores, corresponde al caso de una PEMFC de última generación. Se han desarrollado baterías (con hasta 70 células por batería) con una gran área activa (780 cm²). El desempeño de 0.6 $\left[\frac{mA}{cm^2}\right]$ y 0.6 [V/célula] se ha logrado operaciones H_2 /aire a 300 [kPa] y 65 [°C] (Barbir and Gomez, 1997). El costo supuesto para la batería, se acerca bastante al costo real de manufactura; incluso tomando en cuenta la reducción que se produce entre un prototipo elaborado y una manufactura a gran escala.

Los resultados en los costos de electricidad, se muestran en la **Figura 6.2** los costos más altos, entre U\$ 0.45 y U\$ 0.60 por kWh, corresponde a un perfil de carga variable (FC = 0.15). Los costos para un perfil de carga constante (FC = 0.9) o moderado (FC = 0.5) oscilan entre U\$ 0.24 y U\$ 0.30 por kWh; esto indica que un potencial o voltaje nominal óptimo de operación constante es 0.7 [V/célula], no obstante para operaciones variables el voltaje óptimo es ~ 0.5 [V/célula].

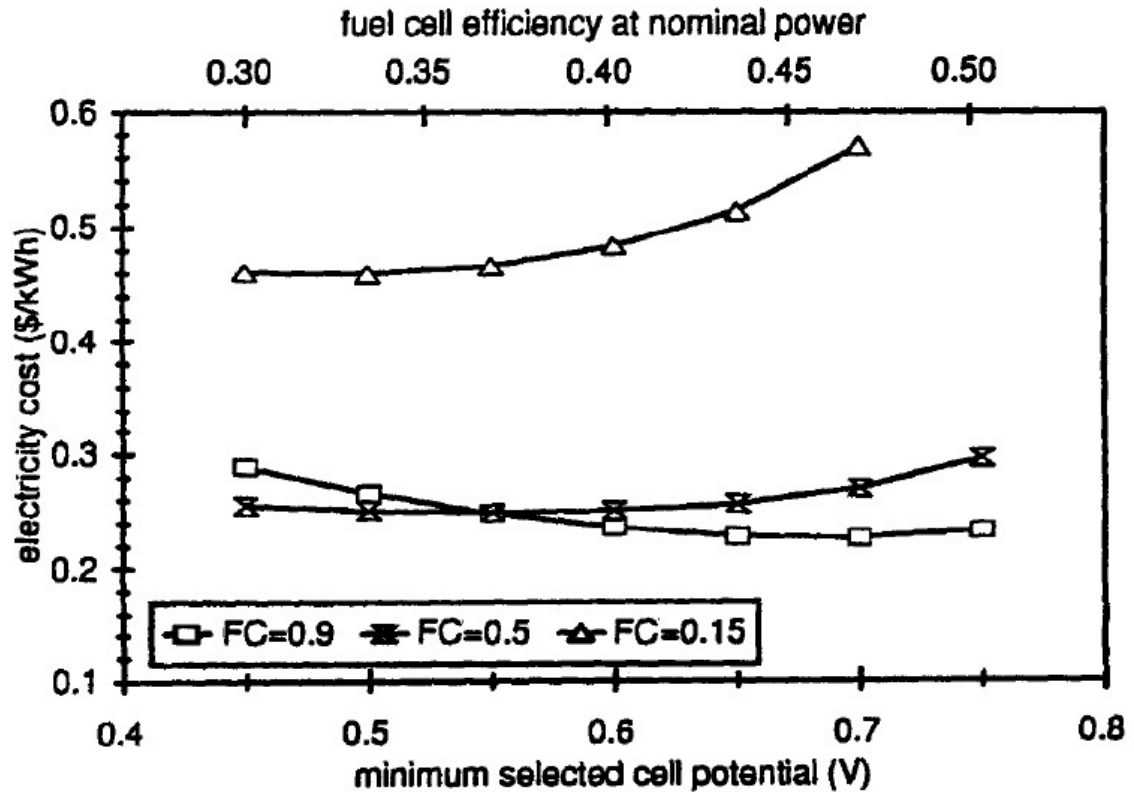


Figura 6.2: Costo para FC - Escenario Base

En operaciones de carga constante, el costo del combustible es un factor predominante esto permite incorporar un par de células extras a la batería, esto compensa el costo de la operación ya que se obtiene un potencial más alto, logrando una mayor eficiencia y por lo tanto un ahorro en combustible.

6.1.3. Escenarios de Costos - Reducción del costo producción

Análisis recientes de los costos de producción de Fuel Cells indican que el costo en manufactura puede reducirse en 10 veces, si se aplican las técnicas de producción masiva en el proceso de elaboración de una FC (incluyendo manufactura de membranas y electrodos). Esto podría resultar en un costo cercano a los U\$ 50 por célula más U\$ 150 por batería.

Esta es una estimación mucho más conservativa que la realizada por Allison Gate Turbine Division's, cuyas conclusiones estiman un costo cercano a 30 [U\$/kW] en celdas de combustibles requeridas para aplicaciones de transporte (Patil, 1992). Los costos en los tres regímenes de operación se muestran en la **Figura 6.3**, varían entre los U\$ 0.15 y U\$ 0.24 por kWh. La variación más alta en el costo de electricidad se producen en operaciones de carga fija; y al igual que en el escenario base el voltaje nominal óptimo alcanza los 0.75 [V/célula]

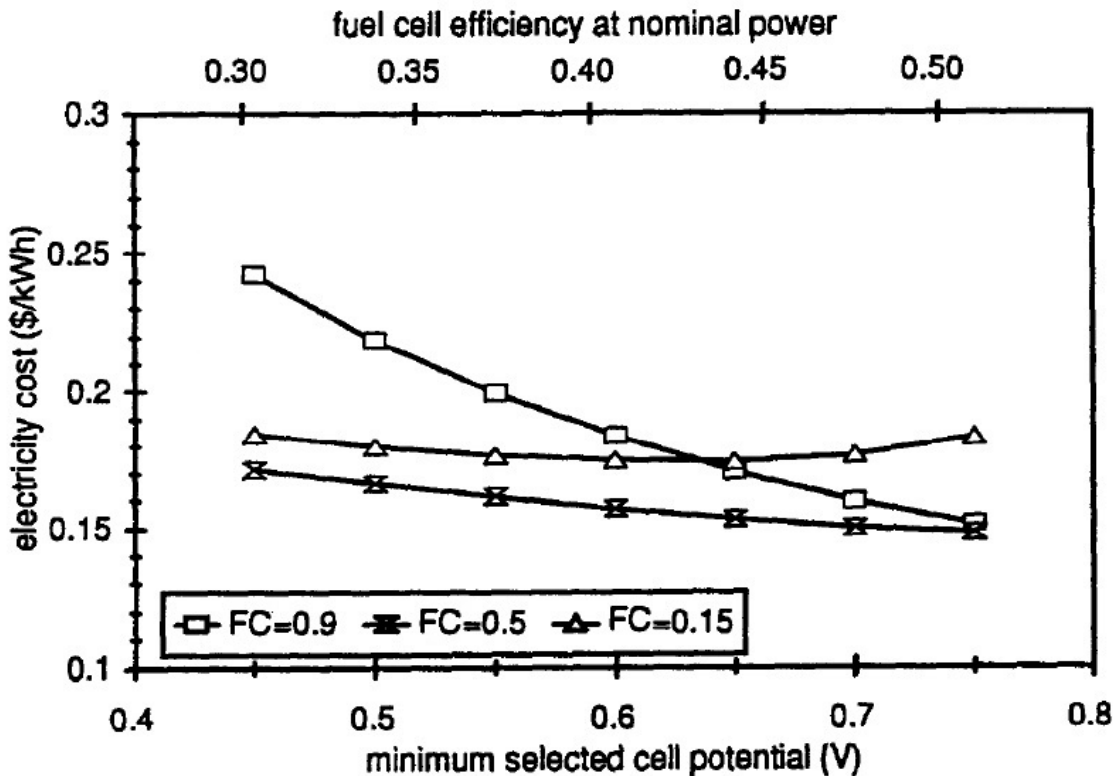


Figura 6.3: Costo para FC - Escenario Reducción costo producción

6.1.4. Escenarios de Costos - Reducción costo del Hidrógeno

Los altos costos y la limitada disponibilidad de hidrógeno son los principales obstáculos para la comercialización de la Fuel Cells. Algunos desarrolladores están tratando de superar estos obstáculos incluyendo un reformador de combustible (normalmente gas natural o metanol) en el sistema de celdas.

Por otra parte, el costo de las plantas individuales de hidrógeno (250 [kW] ó 300 [kgH₂/día]) es inevitablemente más alto que el costo de producción de energía proveniente de grandes plantas (~ 200 toneladas de H₂ por día). El costo de producción en estas plantas alcanza apenas los 10 [U\$/GJ] (Steinberg and Cheng, 1989). El Departamento de Energía de Estados Unidos, tiene como objetivo de largo plazo reducir estos costos y apuntar a una producción masiva tal como se da hoy en energía renovables (solar, eólica, etc) (Elam et al., 2003).

La reducción en el costo del hidrógeno, disminuirá considerablemente el costo de la electricidad a bajos voltajes nominales (logrando altas eficiencias) como se muestra en la Figura 6.4, los costos calculados para perfiles de carga estable varían entre los US\$ 0.15 - US\$ 0.17 por kWh, y US\$ 0.17 - US\$ 0.23 por kWh para cargas moderadamente variables; y entre US\$ 0.40 - US\$ 0.60 por kWh para cargas altamente variables. En ambos perfiles de carga variables, la reducción de costos en el hidrógeno resulta en un mínimo óptimo de potencial nominal para las células (<0.5 V/célula), mientras que el costo de la electricidad en operación de carga constante resulta casi invariable al potencial nominal de celda seleccionado.

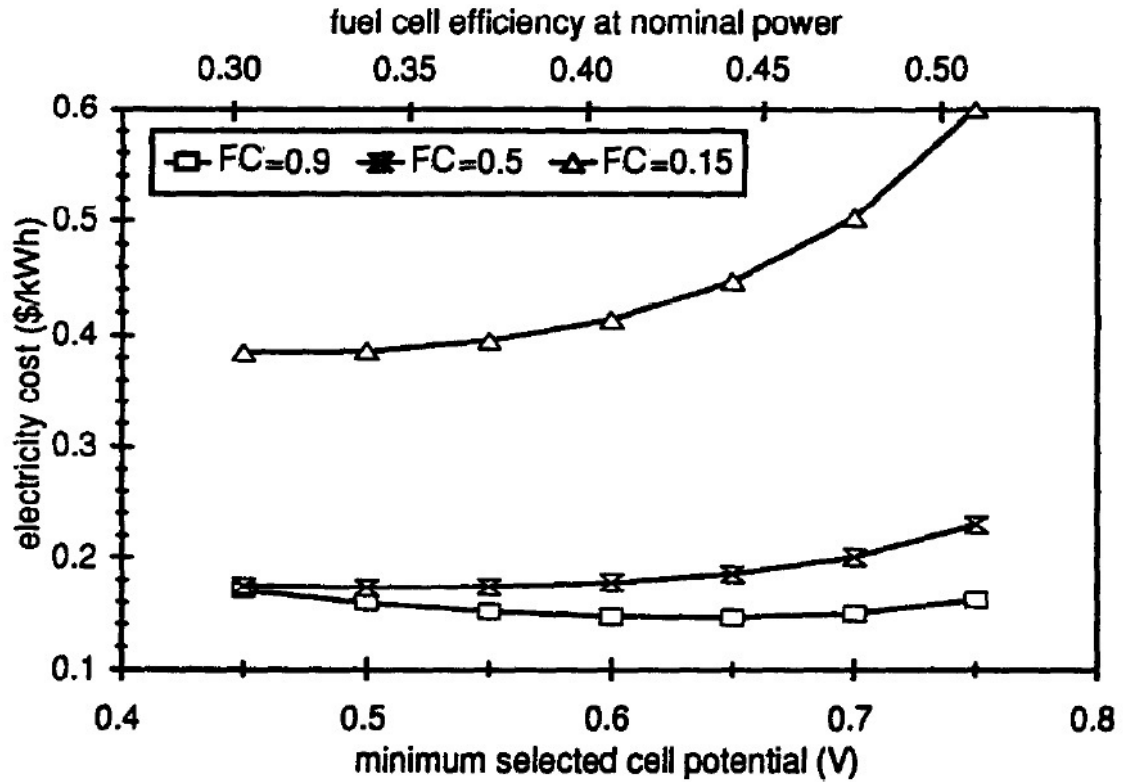


Figura 6.4: Costo para FC - Escenario Reducción costo hidrógeno

La eficiencia de una FC está ciertamente determinada por su economía en producción. Para la mayoría de las aplicaciones, y en particular para operaciones con requerimientos constantes, una FC no debería ser utilizada a su máxima potencia, i.e. ~ 0.5 [V/célula], donde la eficiencia es la más baja $\sim 33\%$. Los costos más bajos de electricidad resultan a los potenciales nominales más altos, correspondiendo también a las eficiencias más altas.

Cuando se seleccionan los potenciales nominales de célula más altos, el costo adicional por célula es compensado por ahorros en combustible. A medida que el costo de la FC (en \$/célula) disminuye, el potencial nominal óptimo de la célula se vuelve más alto tal como se muestra en la Figura 6.5.

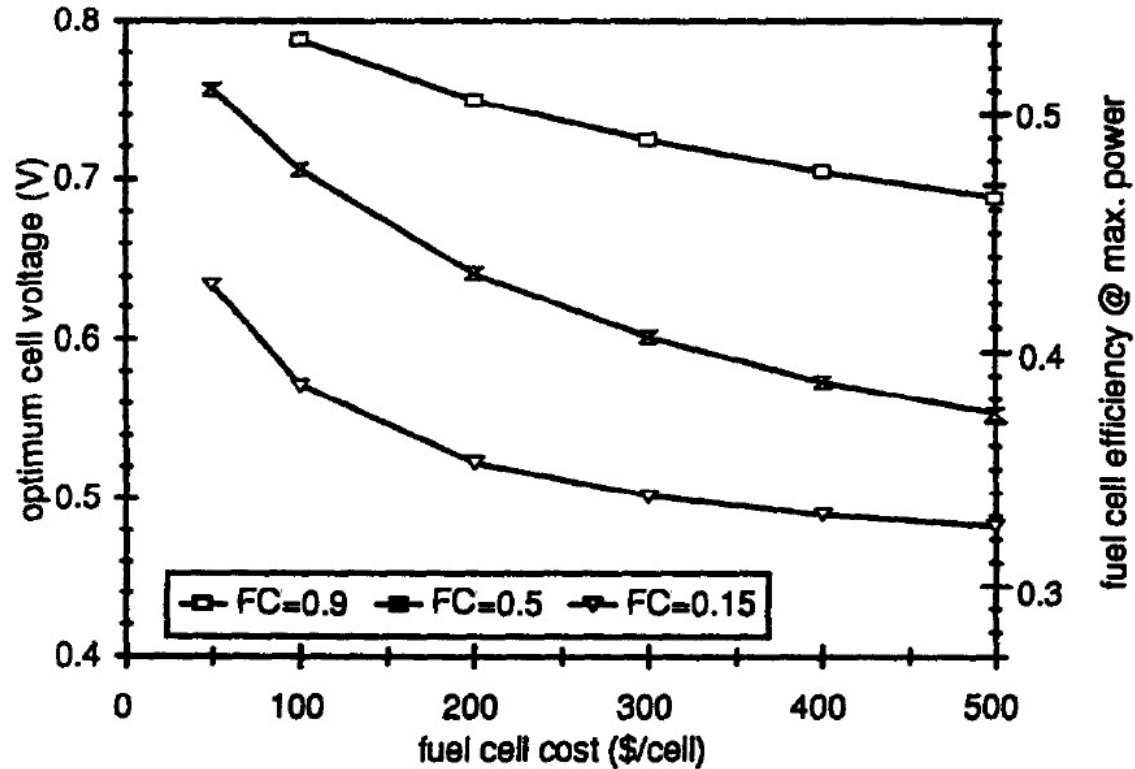


Figura 6.5: Voltaje óptimo a la potencial nominal y eficiencia correspondiente en función del costo de la Fuel Cell

Los costos obtenidos, en el mejor de los casos (si se considera una doble mejora tanto en el rendimiento de la Fuel Cells y sus costos de producción, junto con la reducción en el hidrógeno) es posible que sean competitivos en el futuro con los costos de electricidad que producen las centrales de poder convencionales (APU).

6.2. Análisis de Emisiones para las Fuel Cells

Es un hecho conocido que sólo unos pocos países controlan el 81 % de todas las reservas mundiales de petróleo crudo, otros seis países tienen el 70 % de todas las reservas de gas natural y finalmente ocho países tienen el 89 % de las reservas de carbón. La energía es fundamental para lograr los objetivos económicos, sociales y ambientales relacionados con el desarrollo sostenible de cualquier nación. No obstante, para lograr tal desarrollo el tipo de energía producida y la forma en que se utiliza debe cambiar; de lo contrario el daño medio ambiental se acelerará, los problemas sociales aumentarán y el crecimiento económico se verá comprometido.

Debido a que las Fuel Cells, como dispositivos electroquímicos, convierten combustibles como el hidrógeno en electricidad sin necesidad de realizar un proceso de combustión, virtualmente no emiten contaminantes y por lo tanto se convierten en una llave para la puerta de la sustentabilidad y prosperidad durante las próximas décadas. Si bien el siglo XIX fue conocido como la *edad del motor a vapor* y el siglo XX fue visto como la *era del motor a combustión interna*; hoy todo apunta a que el siglo XXI será la edad de las Fuel Cells ya que parecen ser una de las soluciones más eficientes y eficaces a los problemas ambientales que hoy se enfrentan (calentamiento global, contaminación, lluvia ácida, destrucción de la capa de ozono, deforestación, etc). La producción mundial de petróleo se reducirá en los próximos 20-40 años y la dependencia de energía en base a combustibles fósiles llegará a sus límites, como muestra la **Figura 6.6** (Herbert et al., 2007), el desarrollo de nuevas tecnologías de generación de energía se hace cada vez más importante.

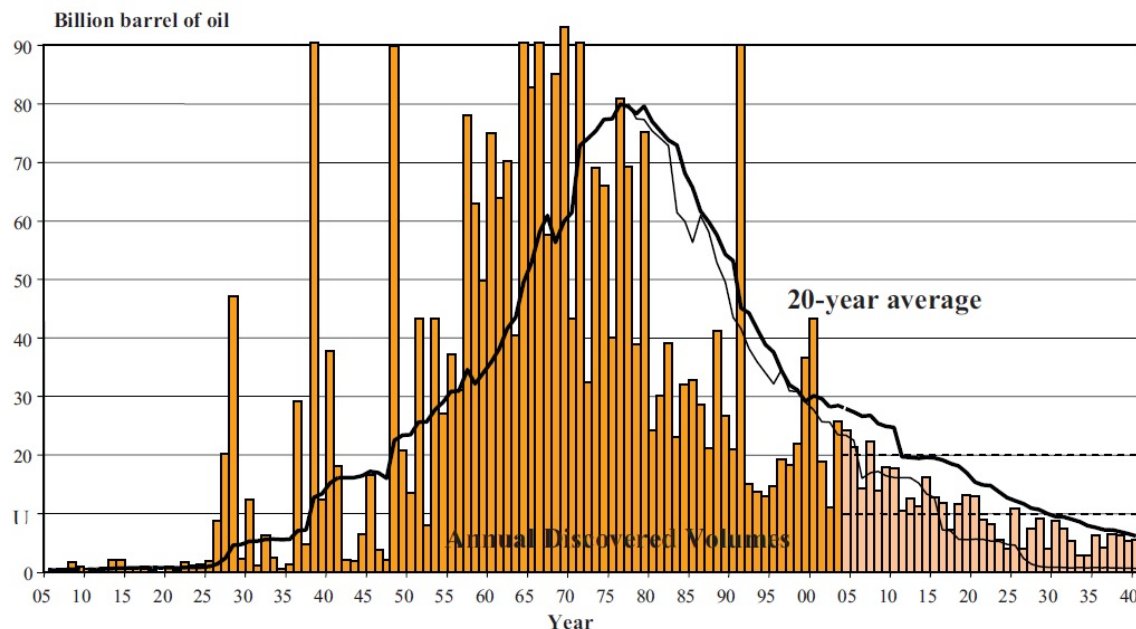


Figura 6.6: Proyección demanda versus volumen de yacimientos a descubrir (1905-2040)

6.2.1. Aviación Comercial y su impacto medioambiental

Desde los inicios de la aviación comercial en 1920, ésta ha experimentado un crecimiento exponencial; hoy se ha convertido en una parte fundamental en el transporte mundial de pasajeros y carga. En los próximos 20 años se espera que el tráfico global de pasajeros aumente en promedio un 5,3 % anual (Rogers et al., 2002). Además del crecimiento en el tráfico aéreo, la disminución de los recursos fósiles preocupa a la industria que necesita una alternativa viable y sustentable en el futuro como energía para los aviones.

En los últimos años se ha discutido sobre los efectos ambientales que producen las emisiones de la aviación civil, existe una preocupación creciente y evidencia que respalda el impacto que tendrá el aumento de tráfico aéreo en la calidad del aire local y global. Si bien las preocupaciones sobre la calidad del aire local surgen del impacto en la salud humana debido a especies gaseosas o partículas en suspensión, las preocupaciones globales se relacionan con los impactos potenciales de las emisiones en el cambio climático.

Las emisiones de cualquier turbina, a condición de que se quema un combustible convencional el cual contiene carbono e hidrógeno, comprenden productos primarios tales como: dióxido de carbono CO_2 y vapor de agua H_2O ; y productos secundarios: óxido de nitrógeno NO_x , hidrocarburos, monóxido de carbono CO , óxidos de azufre SO_x (si el combustible contiene azufre) y partículas. En general, NO_x , CO e hidrocarburos son los principales responsables para problemas locales de calidad del aire, mientras que CO_2 , H_2O , NO_x y SO_x son los componentes que más generan perturbaciones climáticas globales.

Las emisiones de CO_2 y H_2O son productos inevitables del proceso de combustión, y sus cantidades son directamente proporcionales al consumo de combustible. Para modificar cualquiera de estos, es necesario cambiar el consumo de combustible o su composición. El consumo puede reducirse mejorando la eficiencia global del motor y/o reduciendo el peso del avión, otra opción es mejorar la eficiencia aerodinámica de la aeronave.

Tanto las emisiones de CO_2 y H_2O contribuyen al calentamiento global a través del efecto invernadero. El dióxido de carbono es un gas de larga duración en la atmósfera ~100 años o más. Una mayor concentración de CO_2 altera el equilibrio radiativo de la Tierra, aunque las emisiones actuales de CO_2 en las aeronaves comerciales son alrededor del 2 % del total mundial, se espera que el futuro esta fracción aumente considera-

blemente alcanzando un 5-7 % (Rogers et al., 2002).

El vapor de agua puede causar un impacto radiativo directo en el sistema climático, y en parte efectos indirectos por la formación de nubes. Sin embargo, el estudio de aviones convencionales realizado por IPCC (Penner, 1999) y G.A Morris (Morris et al., 2003) sugieren que el impacto directo de las emisiones de vapor de agua en la aviación subsónica sobre el balance radiativo son insignificantes. No obstante si pueden modificar a las *nubes cirrus*⁶ (responsables de atrapar el calor, pero también reflejar la luz del sol) de la siguiente forma (Sausen et al., 2005):

1. Si la atmósfera está suficientemente saturada de hielo, las estelas dejadas por la aeronave pueden crecer y convertirse en otras cirrus mayores.
2. Partículas en suspensión (como el hollín) y precursores de partículas volátiles (por ejemplo, óxidos de azufre) pueden transformarse en núcleos de condensación formando cirrus posteriores a la emisión.
3. Los aerosoles pueden modificar adicionalmente las propiedades microfísicas de las nubes cirrus: tamaño, número de partículas y forma.

De los puntos anteriores es posible concluir que a pesar de que el vapor de agua y su impacto en el balance radiativo es menor; si juega un rol importante en el impacto climático local del transporte aéreo.

La mayoría de los óxidos de nitrógeno formados durante la combustión están en forma de *NO* sin embargo, posteriormente el *NO* se oxida a *NO₂*. Los procesos de formación de *NO* en la combustión son complejos y generalmente comprenden diferentes mecanismos: *NO* térmico, *NO* temprano o inmediato, *NO* combustible y óxido nitroso *NO₂* (Lefebvre, 1998). Con excepción de los sistemas de combustión pobre en combustible, el *NO* total, se produce a partir del nitrógeno y el oxígeno presente en el aire en las regiones de alta temperatura de la llama y en los gases de salida. La influencia de las emisiones de *NO_x* en el clima es indirecta a través de su impacto químico sobre la concentración atmosférica de ozono y metano: a altitudes inferiores a 15 [km], las emisiones de *NO_x* provocan un aumento en el ozono troposférico contribuyendo al efecto invernadero. Aumenta también la concentración atmosférica de *OH*, lo que disminuye la presencia y duración del metano *CH₄* y *CO* (Isaksen et al., 2001).

Todo el azufre del combustible se oxida transformándose principalmente en dióxido de azufre (*SO₂*). Los óxidos de azufre son tóxicos y corrosivos, y conducen a la formación de ácido sulfúrico en la atmósfera. La estrategia para solucionar este problema apunta a eliminar el azufre del combustible y que no participe en la combustión.

Por otra parte, la materia particulada es un término genérico para varias partículas con composición química variable y de diferentes tamaños que pueden originarse por fuentes naturales o artificiales. Respecto de las partículas de la aviación, éstas pueden dividirse en dos tipos diferentes: hollín y partículas volátiles (Rogers et al., 2002); estas últimas se forman a partir del ácido sulfúrico condensado y posiblemente de especies orgánicas. El hollín consiste principalmente de carbono (96 %), junto con una mezcla de hidrógeno, oxígeno y otros elementos; se forma en zonas ricas en combustible dentro de la cámara de combustión del motor/APU es propenso a producirse en regiones de alta presión, para reducir las emisiones de hollín se debe prestar atención al diseño de los inyectores junto con la búsqueda para mejorar el proceso de mezcla combustible-aire.

Habiendo entendido las principales fuentes contaminantes y sus efectos, es posible entender la contribución de la aviación comercial en el cambio climático. La mejor estimación del impacto de la aviación subsónica en términos radiativos fue realizada en 1999, el resultado fue: 0,05 [*W/m²*] ó 3,5 % del total potencia radiativa (Penner, 1999). Esta evaluación combina los efectos de los cambios en las concentraciones de: dióxido de carbono, ozono, metano, vapor de agua y aerosoles.

⁶Tipo de nube que se compone de cristales de hielo, se encuentran a una temperatura de -40°C y se forman a alturas cercanas a los 8-12 km

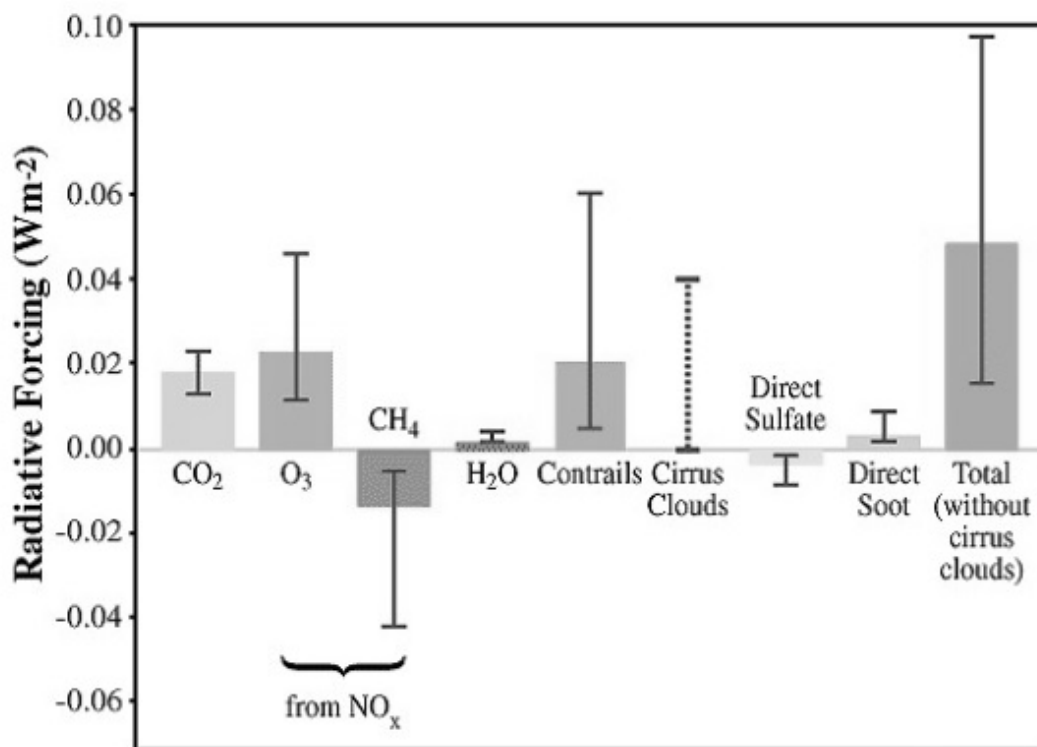


Figura 6.7: Estimaciones de potencia radiativa promedio global de aeronaves subsónicas en 1999

La **Figura 6.7** muestra las contribuciones de la potencia radiativa debido a las diferentes emisiones, las barras indican la mejor estimación, mientras que la línea asociada con cada barra indica el rango de incertidumbre. Al momento de la publicación del artículo en 1991, fue posible afirmar que la probabilidad de que el valor verdadero estuviera dentro del rango de incertidumbre era del 67 %; no obstante lo anterior la magnitud del impacto climático de la aviación comercial aún sigue siendo un estudio complejo, se espera que para 2050 la contribución del transporte aéreo aumente de un 3,4 % a un 14,7 % aunque de todas formas los números dependerán del desarrollo de las emisiones, el tipo de combustible utilizado y la tecnología en las aeronaves.

6.2.2. Fuel Cells y su impacto medioambiental

Tanto la eficiencia como la conciencia por el medio ambiente son hoy el principal motivo por el cual la comunidad científica ha renovado su interés por el desarrollo en las Fuel Cells como sistema de generación de energía, en particular con la cogeneración de calor y electricidad. El impacto ambiental por el uso de una FC depende directamente de la fuente de combustible (Hidrógeno) que es utilizado; el uso de hidrógeno puro prácticamente no generará emisiones a excepción de agua y calor. Sin embargo, aún se están generando soluciones debido a la complejidad que tiene en su transporte y almacenamiento.

La alta eficiencia de las FC provoca que se consuma menos combustible para producir una cantidad determinada de electricidad, lo que corresponde a una menor emisión de dióxido de carbono CO_2 , principal responsable del efecto invernadero y el calentamiento global. Cuando el hidrógeno (como gas natural) se utiliza como combustible, las FC no generan emisiones netas de CO_2 ; se estima que la reducción en las emisiones de dióxido de carbono bajo el concepto de FC superen los 2 millones de kilogramos por año (Stambouli and Traversa, 2002).

Por otra parte, al omitir el proceso de combustión que se produce en los métodos tradicionales de generación de energía, se evita la generación de contaminantes. Las emisiones para sistemas de FC son muy

Tabla 6.1: Emisiones contaminantes por tipo de combustible.

Fuente de Energía	SO_x (g SO_x /kWh)	NO_x (g NO_x /kWh)	C en CO_2 (gC/kWh)	C en CO (gC/kWh)	Partículas
Carbón	3.4	1.8	322.8	40	0.00020
Petróleo	1.7	0.88	258.5	40	0.00015
Gas Natural	0.001	0.9	178	20	0.00002
Energía Nuclear	0.030	0.003	7.8	7.8	0.00005
Energía Solar	0.020	0.007	5.3	1.3	0
Fuel Cells	0	0	1.3	0.3	0

bajas con niveles casi nulos de NO_x , SO_x y otras partículas; por lo tanto ayudan a eliminar cerca de 20.000 [kg] de lluvia ácida y contaminantes al ambiente. En la **Tabla 6.1** se muestran los niveles de contaminantes emitidos por tipo de combustible (Stambouli and Traversa, 2002):

Cuando se combina un motor térmico (combustión interna) que usa calor residual, las FC son los dispositivos más limpios y eficientes disponibles para la generación de energía. Las FC pueden utilizar el calor residual de alta calidad para proporcionar refrigeración y aire acondicionado sin dañar el medio ambiente.

De acuerdo al estudio realizado por Fredrik Svensson (Svensson et al., 2004), se plantea un modelo que analiza el impacto ambiental para aviones que utilizan como combustible el hidrógeno, en particular para una APU. El estudio muestra que las pruebas experimentales realizadas determinan que la fracción molar de las emisiones de NO_x pueden reducirse en un 86 % en comparación con las cámaras de combustión convencionales alimentadas con keroseno en condiciones de potencia máxima (Dahl and Suttrop, 2001).

Bajo el modelo utilizado por Svensson, cada contaminante producido por la aviación tiene un impacto diferente sobre la atmósfera, dependiendo de la cantidad emitida, sus propiedades químicas y de absorción de la luz, junto con la altitud de descarga. Con el fin de permitir una evaluación simple del impacto global, en términos de calentamiento global y las emisiones descargadas. Se obtiene un modelo paramétrico simple siguiendo la metodología propuesta por (Klug, 2001) y (Klug et al., 1996). Este tratamiento simplificado evita la necesidad de ejecutar un sofisticado modelo climático; sino que trata de comprender la influencia de las numerosas interacciones químicas, físicas y dinámicas en un sentido paramétrico.

El modelo proporciona valores específicos de capa del potencial de calentamiento global (GWP - Global Warming Potential), que es una medida de la contribución de los contaminantes al efecto invernadero global en relación con el efecto del CO_2 . La aplicación del concepto GWP está dirigido hacia el efecto de una aeronave que emite H_2O y NO_x , como se muestra en la **Figura 6.8**: el vapor de agua provoca un impacto radiativo directo en el sistema climático, mientras que la influencia de las emisiones de NO_x es indirecta a través de su impacto químico sobre la concentración atmosférica de ozono y metano; a una altitud inferior de unos 15 [km], las emisiones de NO_x provocan un aumento del ozono troposférico superior, contribuyendo así al efecto invernadero, al mismo tiempo que aumenta la concentración atmosférica de OH , lo que disminuye la vida útil de CH_4 (y CO) (Isaksen et al., 2001).

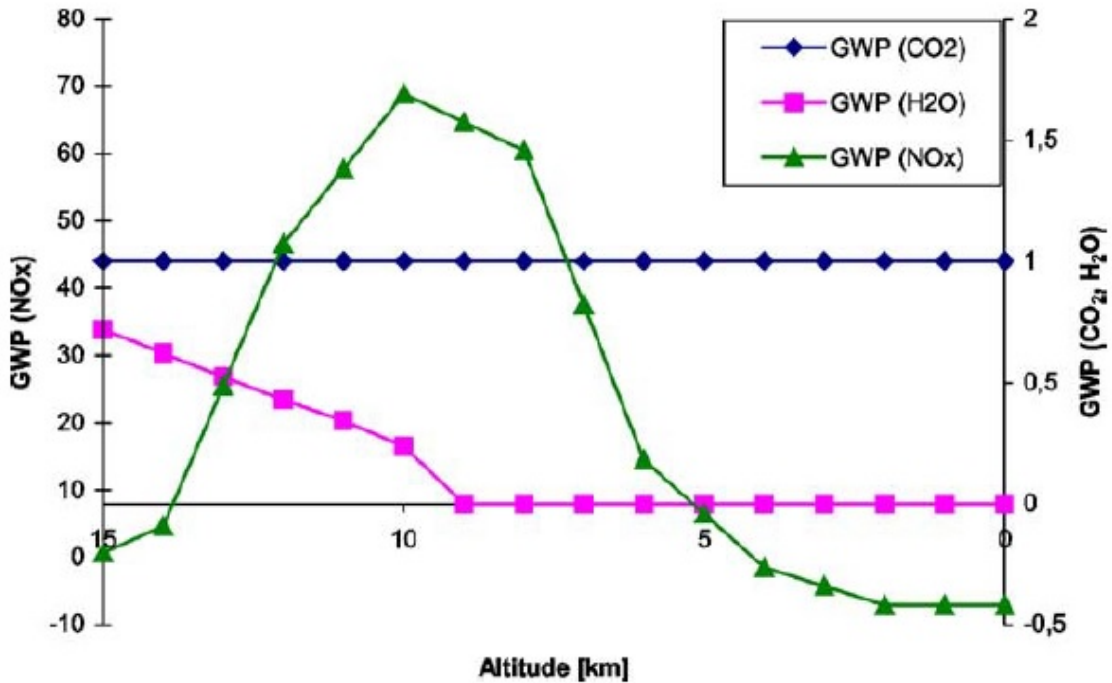


Figura 6.8: Número de GWP por kilogramo de contaminante en función de la altitud

Según la **Figura 6.8**, por kilogramo de contaminante, los NO_x tienen el mayor impacto en el calentamiento global. Para altitudes inferiores a 4 [km] tiene un efecto negativo de calentamiento global (enfriamiento de la tierra), ya medida que aumenta la altitud su impacto aumenta hasta unos 10 [km] de altitud, donde alcanza el máximo y luego comienza a disminuir. La razón de este comportamiento reside en las interacciones complejas entre factores como la vida útil de los NO_x , el ozono (O_3) y el metano en la atmósfera, la tasa de producción/destrucción de ozono y metano y la magnitud de los cambios de temperatura de la tierra debido a un cambio específico en la concentración de ozono o de metano a una cierta altitud.

El efecto de calentamiento global del H_2O de los aviones que cruzan en la troposfera es insignificante-mente pequeño comparado con el del CO_2 , por lo que se supone que es cero por debajo de 10 [km]. Sobre 10 [km] tiene un impacto pequeño, pero con una pendiente creciente, en el calentamiento global. Esto concuerda con las conclusiones extraídas en estudios realizados por (Morris et al., 2003), lo que sugiere que el impacto de las emisiones de vapor de agua de la aviación subsónica en el equilibrio radiativo es insignificante-mente pequeño.



7 | Dimensionamiento Técnico de una Fuel Cells

7.1. Integración de una SOFC en BOEING 787

La principal característica de una SOFC es el ahorro de combustible una vez instalada en el avión. La búsqueda de un equilibrio entre la eficiencia en combustible y el aumento del peso en la aeronave es el principal desafío. A medida que la SOFC se integra se consigue lo siguiente:

- La eficiencia del sistema SOFC resulta en una reducción en el consumo de combustible.
- Cambios asociados con la generación directa de $\pm 270\text{VDC}$ y en conversión para obtener 120VAC .
- Reducción del peso del convertidor de potencia.
- Eliminación del peso de APU

El punto de equilibrio, para el peso de una SOFC, se define como el resultado de la adición al peso del avión y el ahorro de combustible debido a la mayor eficiencia del sistema generador. El peso de equilibrio es principalmente una función de la eficiencia de SOFC, pero también variaría con la longitud del vuelo.

7.2. Requerimientos de energía para B-787

Para la operación en que las condiciones meteorológicas exigen una máxima potencia, la cantidad de energía extraída de los generadores del motor es relativamente constante en las partes principales del vuelo. En altitudes más bajas, se utiliza una mayor potencia para la protección del hielo y el sistema hidráulico, mientras que a mayor altitud se utiliza más potencia para el sistema de aire acondicionado y la presurización de la cabina. Los dos efectos compensan el resultado de una salida de potencia relativamente constante de los generadores del motor. Hay breves períodos en que la potencia cae notablemente. Por ejemplo, cuando el tren de aterrizaje está retraído, la protección contra el hielo se apaga brevemente, lo que da lugar a una caída en la carga del generador del motor. Sin embargo, estos períodos son breves y es poco probable que tengan un impacto notable en el consumo de combustible para la generación eléctrica. La variación en las cargas del generador del motor para las partes principales del vuelo se muestran en la **Figura 7.1**

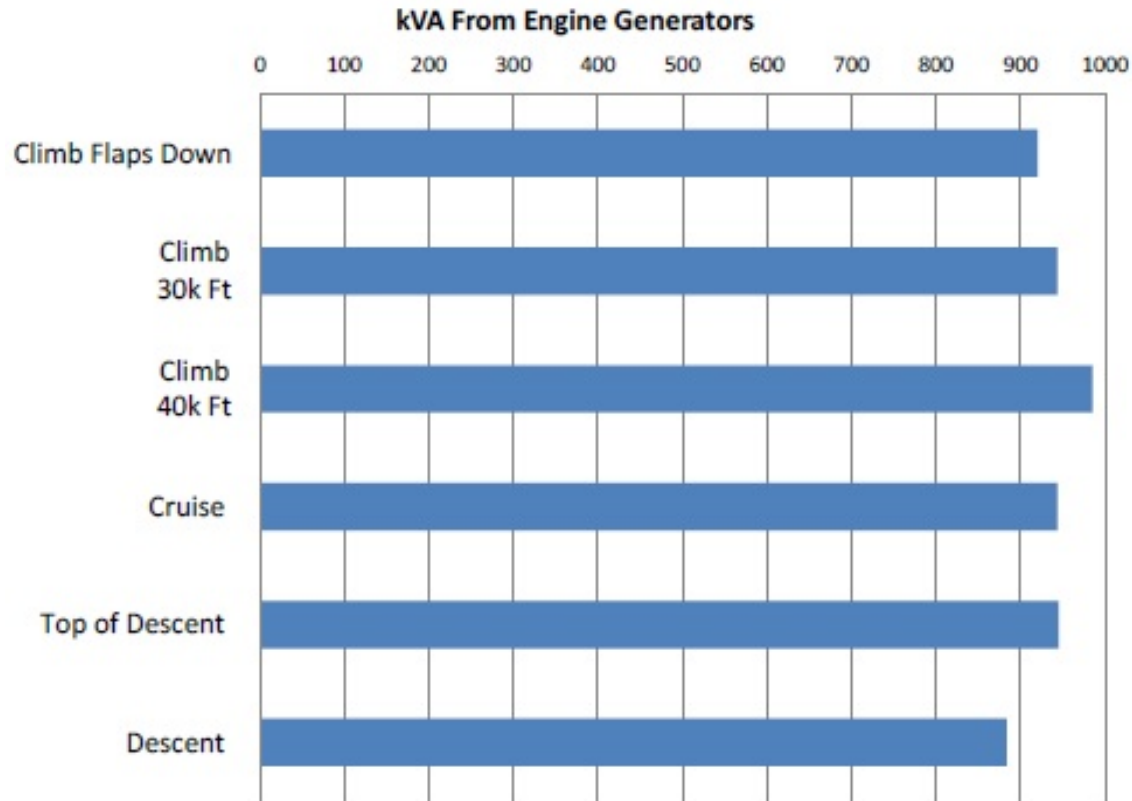


Figura 7.1: Consumo eléctrico B-787 en fases de vuelo

La generación eléctrica y las eficiencias de conversión del Boeing 787 son significativamente más altas que las aeronaves no MEA (More Electric Aircraft) más antiguas. Las mejoras en la eficiencia se deben principalmente al uso de un generador de frecuencia variable y avances en electrónica que permiten eficiencias de conversión de energía mucho más altas. Por ejemplo, comparando el Boeing 787 con el Boeing 777, el rendimiento medido en la salida de CA del generador es 53 % comparado con 34 % y en el bus $\pm 270\text{VDC}$ el rendimiento es del 51 % comparado con el 25 %. Esta mejora en la eficiencia aumenta efectivamente la barra para el rendimiento de los sistemas de FCs de combustible para mostrar el beneficio en la aeronave.

El Boeing 787 tiene generadores montados en el motor que producen una salida de 230VAC de frecuencia variable. Alrededor del 30 % de la potencia generada se utiliza directamente, pero para satisfacer las mayores cargas, la potencia de CA se convierte en $\pm 270\text{VDC}$ en una unidad rectificadora de autotransformador (ATRU) con una eficiencia del 97 %. La energía también se convierte a 115VAC 400Hz en un transformador eficiente del 98 % y a 28VDC en una unidad rectificadora del transformador de 80 % eficiente (TRU). El sistema eléctrico actualmente configurado para generadores de motores con cargas especificadas en condiciones de crucero se muestra en la **Figura 7.2**:

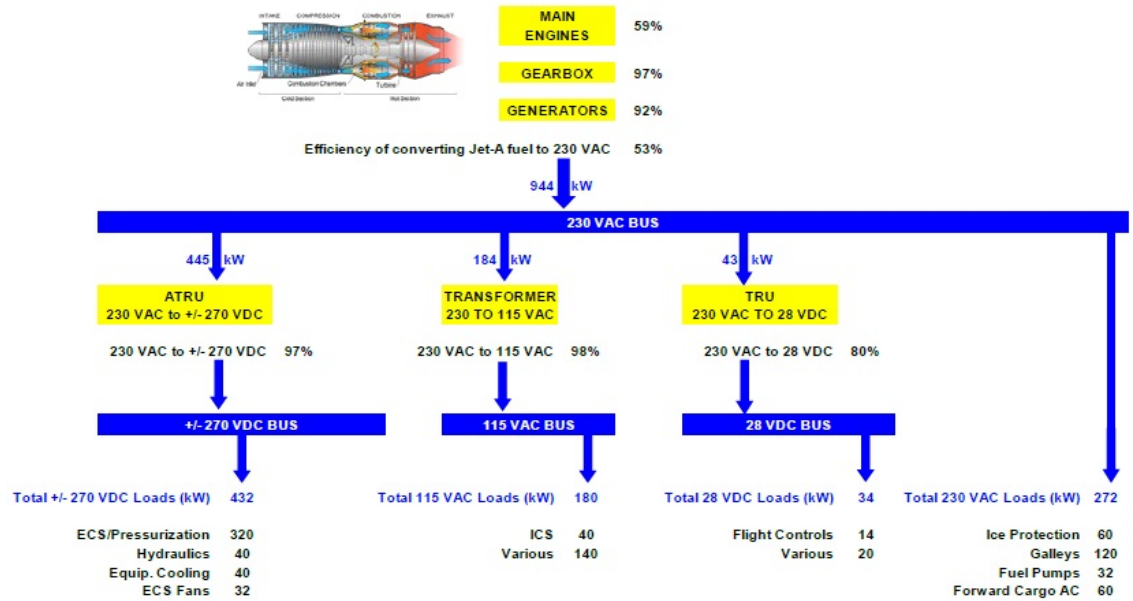


Figura 7.2: Consumo eléctrico B-787 en fase crucero

Para el sistema eléctrico SOFC, el sistema de distribución debe modificarse para que la SOFC produzca directamente $\pm 270\text{VDC}$. Utilizando convertidores de potencia DC/AC con un rendimiento del 80 % para suministrar energía a cargas de 115VAC y 28VDC. Debido a que el sistema SOFC asume un 80 % el sistema SOFC debe generar un poco más de potencia (972 [kW]) que el generador (944 [kW]); el sistema eléctrico basado en SOFC se muestra en la **Figura 7.3**:

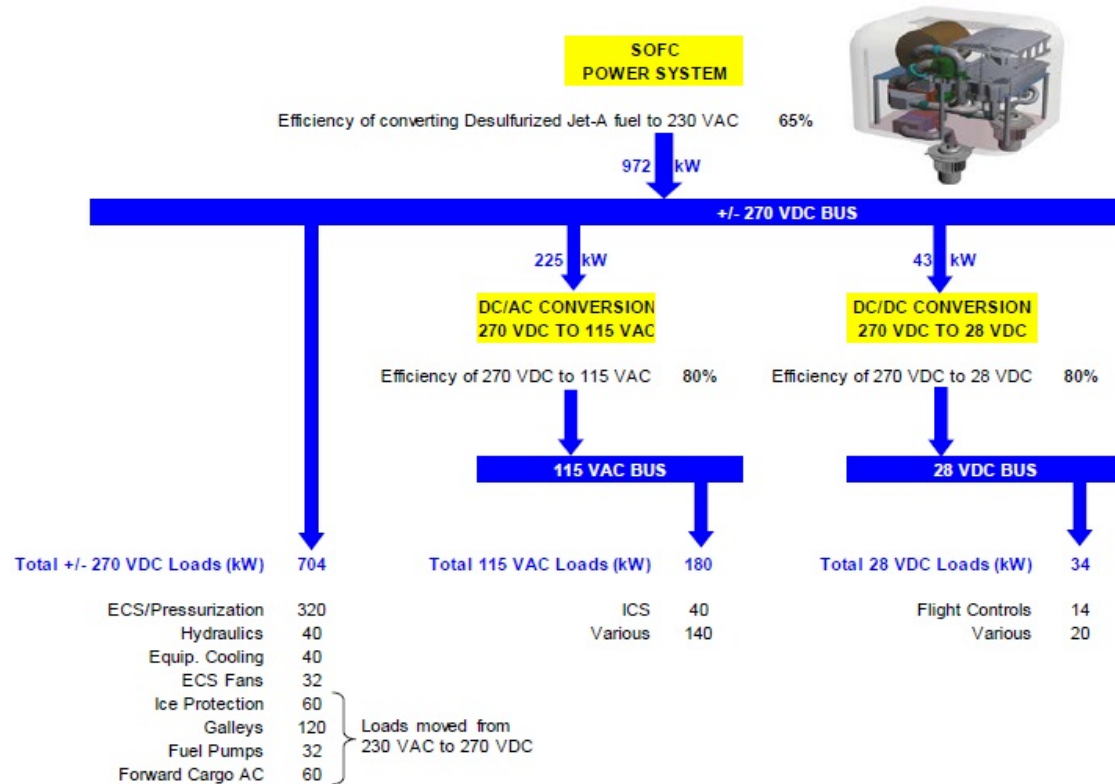


Figura 7.3: Sistema eléctrico B-787 reconfigurado con SOFC

El peso ahorrado en el equipo de conversión de energía (SOFC) se estima en 266 [kg] (Whyatt and Chick, 2012). Este ahorro se basa en los valores que muestra la **Tabla 7.1**. La mayoría de los factores de peso específicos (kg/kW) se basan en una comparación bastante estrecha con el equipo diseñado para las aeronaves. Sin embargo, no es posible encontrar una coincidencia cercana para el inversor $\pm 270\text{VDC} \rightarrow 135\text{VAC}$ 400Hz, por lo que se asume un valor de 1,0 [kg/kW].

Tabla 7.1: Pesos estimados para los equipos de conversión

Voltaje	Conversión	kg/kW (salida)
235VAC	$\pm 270\text{VDC}$	0.65
235VAC	135VAC - 400Hz	0.9
235VAC	28VDC	1
$\pm 270\text{VDC}$	135VAC 400Hz	1
$\pm 270\text{VDC}$	28VDC	1

Aunque las estimaciones de peso iniciales utilizadas para comparar las configuraciones del sistema se basan en un único sistema SOFC, se supone que el sistema de energía SOFC se dividiría en 3 unidades independientes para proporcionar redundancia. En esta configuración, se espera que la turbina APU ya no sea necesaria para la redundancia y podría ser eliminada, ahorrando ~260 [kg]. Se supone además, que la Turbina de Aire Ram (RAT) aún se mantiene presente para situaciones de emergencia. Los generadores de motor no pueden ser eliminados ya que son el back up de los arrancadores para los motores principales. No se intentó evaluar el ahorro de peso (si lo hubiera) que podría lograrse mediante el reemplazo de los 4 arrancadores / generadores (masa total ~ 363 [kg]) con arrancadores dedicados.

7.3. Configuración del Sistema SOFC

La magnitud del ahorro de combustible depende del diagrama de flujo del sistema SOFC. Las principales características del sistema incluyen la compresión/expansión del aire, la propia célula de combustible y el reformador de combustible.

7.3.1. Compresión de Aire

El sistema SOFC comprime el aire a la presión de funcionamiento en un compresor (80 % eficiente) y luego expande los gases de escape a través de una turbina (85 % eficiente) a la temperatura ambiente para recuperar energía mecánica. Para los flujos en los que se requiere más energía para la compresión se supone que un motor eléctrico proporciona la potencia adicional, que resta de la potencia generada. Para los diagramas de flujo en los que el exceso de potencia está disponible, se supone que la potencia del eje se convierte en ± 270 VDC con un 57,6 % de eficiencia basada en: $(96 \% \text{ gear box}) \cdot (80 \% \text{ transformación mecánica a eléctrica}) \cdot (75 \% \pm 270 \text{ VDC}) = 57,6 \%$. Esta hipótesis sitúa la eficiencia de la conversión mecánica en ± 270 VCC en un valor inferior al alcanzado por el generador del B-787 y ATRU⁷ que es 86,6 % (es decir, $97 \% \text{ de la gear box} \cdot 92 \% \text{ generador} \cdot 97 \% \text{ ATRU}$).

Bajo condiciones de vuelo normales, la aeronave comprime el aire del ambiente a la presión de la cabina y luego devuelve el aire a la temperatura ambiente sin intentar recuperar la energía. Aunque podría parecer natural utilizar este aire comprimido para evitar la compresión de aire en la SOFCPU se decidió no tomar este enfoque. Primero, se determinó que la SOFCPU debe operar en el caso de una descompresión de cabina. Por lo tanto, todavía se requiere un compresor capaz de usar aire ambiente. En segundo lugar, la cantidad de aire requerido excede la velocidad de compresión de aire para la cabina. Además, no todo el aire comprimido para la cabina sale en la válvula de salida. Algunas fugas a través de sellos de puerta u otros lugares y estas fugas tienden a aumentar con la edad de los aviones, por lo que es difícil confiar en una cantidad específica de aire de cabina disponible en una válvula de escape. Finalmente, y lo más importante, Boeing expresó una preocupación significativa por la modificación de la configuración de salida de aire. Cualquier cosa que pudiera potencialmente alterar el flujo controlado de aire desde la cabina podría causar daños a la aeronave. Por lo tanto, aunque se podría obtener una mayor eficiencia utilizando el aire de la cabina como entrada al compresor / expansor SOFCPU, esto no se hizo para este estudio.

7.3.2. Fuel Cell

La FC de combustible se basa en un nuevo conjunto de materiales que es capaz de tener una densidad de potencia 1,75 veces mayor que los materiales más comúnmente utilizados. Se consideró que el peso de la FC era de 62 [kg] para una FC de 100 células.

La densidad de potencia en la FC es una función de la composición del gas anódico, la utilización del combustible, el exceso de aire (que determina la concentración promedio de oxígeno del cátodo), la temperatura media de entrada y salida de la FC, la presión y tensión de funcionamiento. La eficacia de la conversión eléctrica de la FC es puramente una función del voltaje de la FC.

El principal supuesto utilizado es que la FC funciona con una temperatura de salida de 800°C y esta temperatura se alcanza mediante el ajuste de la velocidad del aire catódico suministrado para permitir un equilibrio térmico en estado estacionario con una salida de 800°C en la FC. El ánodo y el cátodo de la célula de combustible funcionan a la misma presión y la FC de combustible se hace funcionar dentro de un recipiente mantenido a la misma presión que la FC de combustible.

La **Figura 7.4** muestra el esquema de funcionamiento para una fuel cell instalada en B-787:

⁷ Auto Transformer Rectifier Unit

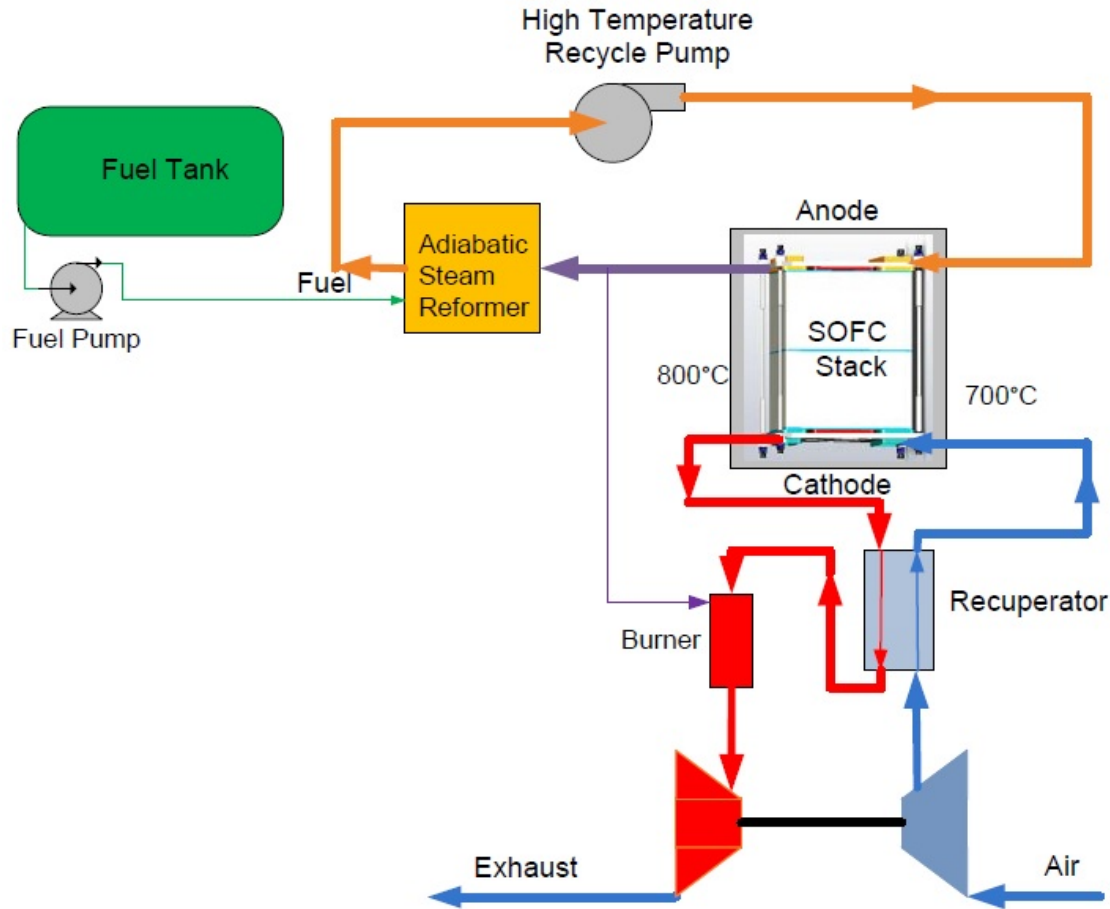


Figura 7.4: Configuración FC para B-787

Las FCs se estimaron en 62 [kg] por cada 100 células como se mencionó previamente. Las estimaciones preliminares de peso no toman en cuenta el aislamiento, las conexiones eléctricas, estructuras de soporte, instrumentos y los controles.

Las tendencias de los datos de eficiencia y peso consideradas por Whyatt y Chick ([Whyatt and Chick, 2012](#)) permiten concluir lo siguiente: A medida que se incrementa la presión de funcionamiento, el rendimiento disminuye debido a una reducción en la cantidad de potencia obtenida del compresor/expansor. Por otro lado, el impacto del peso disminuye con una mayor presión debido a una reducción en el peso de la FC. A presiones de 1,5 atmósferas o menos, el impacto del peso aumenta a medida que crece el voltaje debido al mayor tamaño de la FC. Sin embargo, a presiones más altas el peso disminuye a medida que aumenta el voltaje, alcanzando un mínimo a una tensión de célula que aumenta con la presión creciente. Esto ocurre porque a alta presión y baja tensión, el compresor debe ser accionado eléctricamente en lugar de producir potencia. Esto a su vez requiere que se produzca una potencia bruta mayor que requiera una FC más grande. El mínimo en la curva de impacto de peso se produce cerca del punto donde la potencia del expansor del compresor tiene un pequeño equilibrio positivo de tal manera que sólo se produce una pequeña cantidad de potencia, pero no se requiere entrada de potencia eléctrica.

A continuación la **Figura 7.5** muestra los resultados obtenidos por Whyatt y Chick, las líneas continuas representan la eficiencia del sistema mientras que las líneas discontinuas muestran el impacto en el peso de la aeronave al implementar la SOFC:

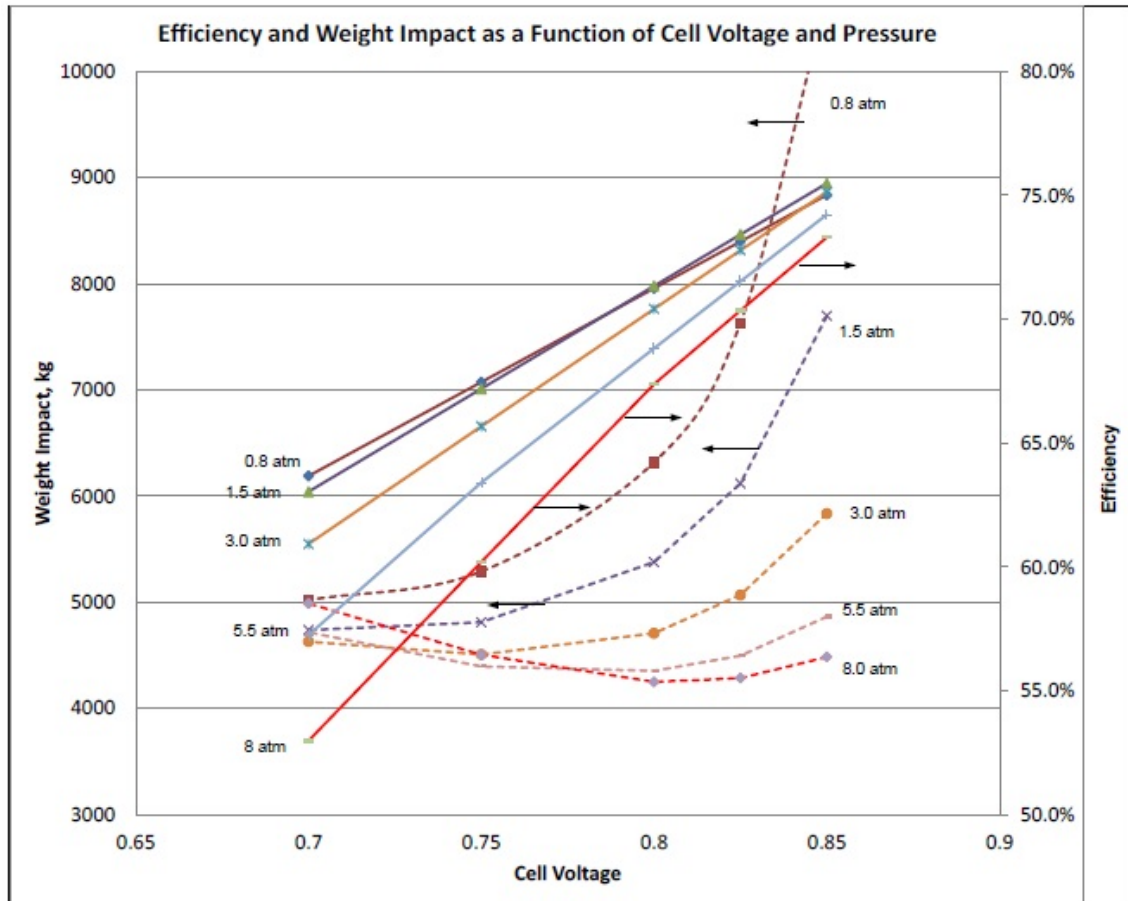


Figura 7.5: Eficiencia e impacto del peso como función del voltaje y de la presión de la FC

7.4. Diseño Conceptual FC a 8 [atm] y 0.825 [V/célula]

Los cálculos preliminares sugieren que las condiciones más próximas al logro del peso de equilibrio son de aproximadamente 8 [atm] y 0,825 [V] por célula. Esta sección mostrará un diseño preliminar con mayor detalle para mejorar la estimación del impacto de peso total y el rendimiento del sistema. Para confirmar la eliminación de la turbina/motor APU; la generación de energía SOFC se separa en tres sistemas independientes, cada uno contenido en su propio recipiente de presión con su propio compresor/expansor. Esto proporciona redundancia, lo que hace improbable que un solo fallo pueda resultar en una pérdida crítica de la capacidad de generación eléctrica. El esquema conceptual para el sistema se muestra en la **Figura 7.6:**

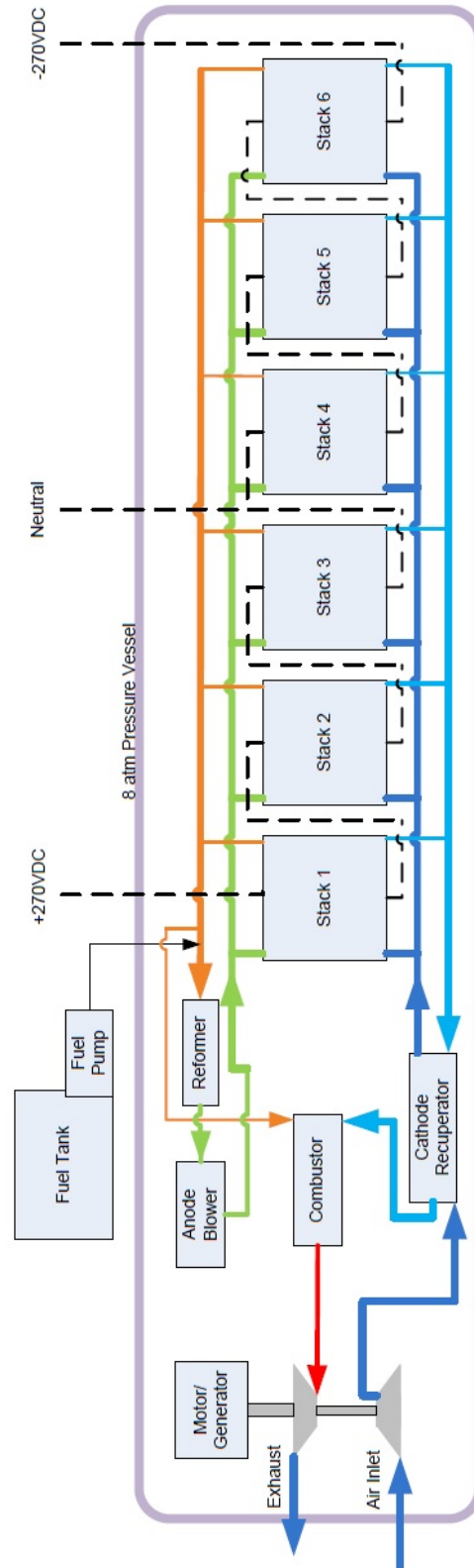


Figura 7.6: Diseño conceptual de SOFC

El diseño del sistema se completa sobre la base de una salida de corriente continua de 821 [kW]. Basándose en las correcciones a las entradas de eficiencia del sistema eléctrico del B-787, se espera que la potencia real necesite ser de aproximadamente 972 [kW]. En lugar de rediseñar el sistema para acomodar el nivel de potencia más alto, se trabaja bajo el supuesto de que la densidad de potencia del sistema de 821 [kW] es representativa y se escala linealmente para estimar la potencia del sistema de 972 [kW] (es decir, multiplicado por $972/821 = 1,18$). Los detalles del sistema se desglosan de la siguiente manera.

7.4.1. Batería SOFC

El diseño de la celda de combustible se basa en la batería Delphi Gen4 (Singhal, 2002) (Shaffer, 2005), aunque se han realizado varias modificaciones para adaptar la batería al diseño actual. Se estima que la densidad de potencia en el área activa de la célula es de: 0,76 [W/cm²] a 0,825 [V/ célula].

La batería está formada por:

- 109 células con el fin de proporcionar ~90 [V/pila] ($0,859 \cdot 109 = 93,6$ [V])
- En cada uno de 3 sistemas independientes, seis pilas se conectan en serie para proporcionar ± 270 VDC. Esto resulta en un total de $6 \cdot 109 = 654$ células en cada uno de los tres sistemas.
- Las conexiones a la pila se hacen desde el extremo del ánodo al cátodo; se utiliza este método en lugar de usar una placa colectora que conecta ambos flujos, para así disminuir el peso.
- El peso completo de la batería alcanza los 87,8 [kg] ($759,5$ [gr] $\cdot 109 = 87.785,5$ [gr]).
- La protección y aislamiento de la batería es un marco (tal como se muestra en la **Figura 7.7**) metálico que permite la sujeción de la batería al avión en forma segura y estable. Esto agrega un peso adicional al sistema (aprox. 13 [kg]) lo que en total alcanzaría unos 96 a 98 [kg] para la SOFC.

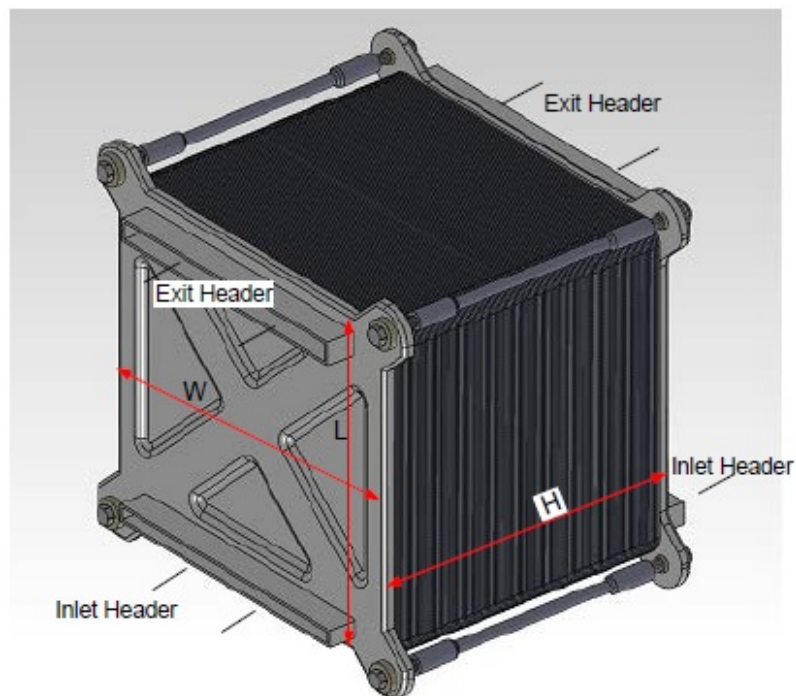


Figura 7.7: Soporte aislante y protector de SOFC

7.4.2. Compresor

Los motores principales de los aviones se enfrentan a un desafío, deben operar en un rango de altitudes y velocidades en donde varía la temperatura de entrada y las presiones de entrada/salida. El desafío difiere un poco para el compresor de la SOFC ya que, necesitará operar a una presión de salida casi constante sobre una gama más pequeña de flujos de aire. Mientras el motor puede no necesitar presión de salida constante, el compresor si necesita operar sobre una amplia gama de flujos de aire que van desde tasas altas para el despegue y la subida a las descensos hasta el ralentí. Los compresores axiales de los motores de aviones utilizan alguna combinación de válvulas de purga y paletas de estator variables que permiten el funcionamiento en un amplio rango de caudales de aire, así como en una amplia gama de condiciones de entrada de aire y presión de escape. Las válvulas de purga permiten que se libere aire de las etapas del compresor. Los estatores variables pivotan para alterar la cantidad de aire que es comprimido. Estas medidas son necesarias para evitar una situación de sobretensión en que la inversión del flujo en el compresor provoca un funcionamiento inestable. Pueden ser necesarias medidas similares para el compresor/expansor diseñado para la SOFC con el fin de proporcionar el caudal de aire deseado a una presión controlada constante mientras la aeronave opera a diferentes altitudes.

El control de velocidad del compresor/expansor de la SOFC se lleva a cabo utilizando un generador que convierte el exceso de energía en energía eléctrica, o bajo condiciones en las que se necesite más potencia del eje, convertir la energía eléctrica en potencia de eje. Si fuera necesario, es posible mejorar el control de presión colocando turbinas de compresión y expansión, el compresor se conecta entonces al expansor a través de un enlace eléctrico entre los generadores de motor permitiendo que los ejes de compresor y expansor funcionen a diferentes velocidades. Alternativamente, esto puede hacerse sólo con un compresor y un escalón expansor con el fin de minimizar las pérdidas de eficiencia asociadas con el enlace electrónico.

En el caso de que el compresor no pueda mantener 8 [atm] en la SOFC, existiría una opción para reducir el voltaje de la SOFC y aumentar así la potencia cuando la presión es baja. Sin embargo, esto es indeseable ya que reduciría la eficiencia de la SOFC e introduciría pérdidas adicionales debido a la necesidad de proporcionar una conversión DC/DC para restablecer la tensión de bus a ± 270 [V].

7.4.3. Cátodo Recuperador

El cátodo recuperador toma el aire de la salida del compresor y lo precalienta a 700 [°C] usando los gases de escape de 800 [°C]. Este enfoque de diseño permite que se produzca un intercambiador de calor altamente compacto con baja caída de presión, el diseño se beneficia de la presión de funcionamiento de 8 [atm] que reduce la caída de presión y permite que se utilicen alturas de canal más pequeñas resultando en un dispositivo más compacto con coeficientes de transferencia de calor más altos. Puesto que el intercambiador de calor se mantiene dentro de una envoltura presurizada y los dos lados del intercambiador de calor están a presiones similares, el intercambiador de calor no tiene que soportar altas presiones diferenciales.

7.4.4. Combustor

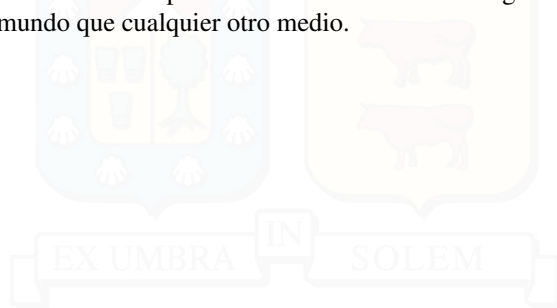
El tamaño del combustor se estima basándose en un flujo axial de 20 [m/s] y una relación de longitud a diámetro 2:1 que da como resultado una cámara de combustión que mide 9 pulgadas de largo por 4,5 pulgadas de diámetro interior. La velocidad axial se seleccionó por analogía con otros combustores. La reducción de la velocidad de llama es esperada debido a la calidad relativamente baja del combustible.

La incorporación de una SOFC al sistema de alimentación eléctrica de un avión, en el caso particular de esta investigación al B-787, resulta de gran importancia ya que este avión en la industria aeronáutica comercial ofrece oportunidades excepcionales a las aerolíneas de todo el mundo. La tecnología de este avión en cuanto a consumo de combustible y autonomía permite abrir nuevas rutas de forma rentable optimizando al mismo tiempo el rendimiento de la flota y la red de vuelos. Más aún cuando para los pasajeros constituye

una experiencia de vuelo única, con más confort y menos cansancio.

El B-787, es el primer avión comercial fabricado en un 50 % con materiales compuestos, más resistentes y ligeros que el aluminio. Estos materiales son los responsables del rendimiento incomparable del 787. Los materiales compuestos (plásticos reforzados con fibra de carbono) conforman las principales secciones del 787: fuselaje, cola y alas.

La incorporación teórica de una Fuel Cell en reemplazo de la APU en este avión, disminuyen aún más, el peso del avión como el consumo total de combustible. Los ahorros en mantenimiento y costo de transporte por pasajero son un incentivo adicional en promover el uso de esta tecnología en una industria que avanza y mueve más personas en el mundo que cualquier otro medio.





8 | Análisis Financiero

8.1. Contexto económico y financiero de una Aerolínea

El sector del transporte aéreo es un sector básico en la economía de cualquier país, para Chile representa el 1,6 % del PIB (CLP 1,4 billones) (Oxford, 2011). Al mismo tiempo, se debe entender que el transporte aéreo no se refiere únicamente a las aerolíneas comerciales (pasajeros y carga), sino a todas aquellas industrias vinculadas, como pueden ser: las de infraestructura aeroportuaria, mantenimiento de aeronaves, handling, servicios de abordaje, etc.

Dentro de las características específicas para este sector se encuentran:

- Entorno completamente globalizado, barreras de entradas no significativas.
- Elevada estructura de costos fijos, que justifican la utilización de técnicas de gestión que maximicen los ingresos totales por vuelo (factor de ocupación).
- Alto nivel de negociación por parte de los proveedores de servicios y bienes.
- Resultados económicos bajos, raramente se obtienen resultados positivos y en cualquier caso nunca en un valor suficientemente alto para compensar los costos de capital.

No obstante, a pesar de las dificultades estructurales, el sector del transporte aéreo sigue siendo un foco de atracción para inversionistas, aún cuando su rentabilidad esté, como se ha indicado, en cuestionamiento. La relevancia económica y social que puede llegar a ofrecer la gestión de una compañía aérea constituye, sin duda, un polo de atracción.

La industria del transporte aéreo comprende desde las grandes aerolíneas internacionales, hasta el más pequeño operador que sólo dispone de un avión que vuela ocasionalmente. El servicio que ofrecen las empresas de esta industria no es un producto final sino intermedio, forma parte de la cadena de producción de un objeto o producto más amplio, en el que intervienen otros eslabones, además del transporte aéreo. En este sentido, el transporte aéreo contribuye al desarrollo de otras industrias o actividades y con ello a la economía de los diferentes países en los que está presente.

Desde visitas de familiares y amigos hasta el embarque de productos de alto valor, 10 millones de pasajeros y 262.000 toneladas de carga se desplazaron hacia, desde y dentro de Chile. Más de 25.000 vuelos internacionales programados salen anualmente con destino a 35 aeropuertos en 25 países. A nivel nacional, más de 91.500 vuelos ofrecen más de 11 millones de asientos para pasajeros anualmente con destino a 16 aeropuertos.

El crecimiento económico tiene un sustancial impacto en el transporte aéreo, debido a su amplia influencia sobre la demanda de servicios de transporte. Durante periodos de crecimiento económico las empresas de todos los sectores crecen y se expanden, lo cual lleva a un incremento de los viajes de negocios. Al mismo tiempo, en un periodo de bonanza económica la renta familiar se incrementa lo cual lleva a un incremento del gasto destinado al ocio, entre el que se encuentran los viajes de placer. Cuando el crecimiento económico se ralentiza, todo lo expuesto cambia radicalmente. Las empresas no se expanden ni se invierte; por lo tanto, el

item de gastos en viajes se reduce de manera drástica con un efecto notable sobre las aerolíneas. Al mismo tiempo, si las empresas reducen su actividad, e incluso reducen su personal, la renta familiar disponible disminuye por lo que los gastos de ocio dejan de tener un papel primordial en la economía familiar, es decir, se deja de viajar.

La correlación entre crecimiento económico y transporte aéreo ha sido reconocida por analistas desde hace muchos años. Generalmente se acepta por regla que: por cada punto porcentual de crecimiento económico mundial, el tráfico aéreo mundial crece entre 2,5 y 3 puntos porcentuales. Uno de los factores que más afecta al crecimiento económico, la inflación, tiene una gran influencia sobre las compañías aéreas, especialmente sobre sus costos, cuyo control es esencial para conseguir o alcanzar una adecuada rentabilidad. Cuando los precios son estables, con una inflación controlada, los intereses bancarios tienden a la baja y esta circunstancia incentiva la inversión y la expansión económica. Por el contrario, con una inflación elevada los precios se incrementan rápidamente al mismo tiempo que los tipos de interés, afectando negativamente al crecimiento económico, lo cual opera en detrimento del transporte aéreo por partida doble, no sólo por la disminución de la demanda de tickets aéreos sino por el incremento de los tipos de interés de los créditos que necesita esta industria para la renovación de su cada vez más costoso activo, los aviones, y para enfrentar el gasto en consumo de combustible que es uno de los costos más importantes y que hace a las compañías de transporte aéreo especialmente sensibles a la evolución de esta variable.

Esta situación pone a las aerolíneas en una difícil posición: absorber el incremento de los costos, o transferirlo a los pasajeros, quizás en el peor momento posible, afectando aun más a la demanda. Si bien esta situación es común a la mayoría de los sectores, en este caso se acentúa por el importante peso que tienen los costos fijos en la estructura de costos de las empresas del sector aéreo. Bien es cierto que en los últimos años la situación de competencia ha generado que esta dinámica sea prácticamente una constante, independiente de la tasa de inflación existente.

Si bien ha habido una tendencia decreciente a lo largo de los años en el crecimiento de la industria, éste sigue siendo alto comparado con otras industrias. Una de las grandes contradicciones de esta industria es que a pesar de los altos crecimientos, los márgenes de rentabilidad incluso en años de bonanza, suelen ser reducidos. De acuerdo a lo anterior es importante mencionar que, a pesar de la caída en los costos que caracteriza a la industria del transporte aéreo (vinculado a la reducción de servicios a bordo y de comercialización, principalmente), la progresiva reducción de las tarifas (consecuencia de la liberalización y aparición de nuevos competidores) provoca que los beneficios obtenidos vayan también disminuyendo. Los métodos tradicionales de cálculo de rentabilidad son difíciles de aplicar al sector ya que las compañías aéreas utilizan diferentes políticas de depreciación y emplean una gran cantidad de activos en régimen de leasing entre otros.

8.2. Cadena de Valor en el Transporte Aéreo

La **Figura 8.1** la propuesta de cadena de valor para el sector del transporte aéreo, esto servirá como guía para entender sus segmentos y cómo influyen en su estructura de costos.

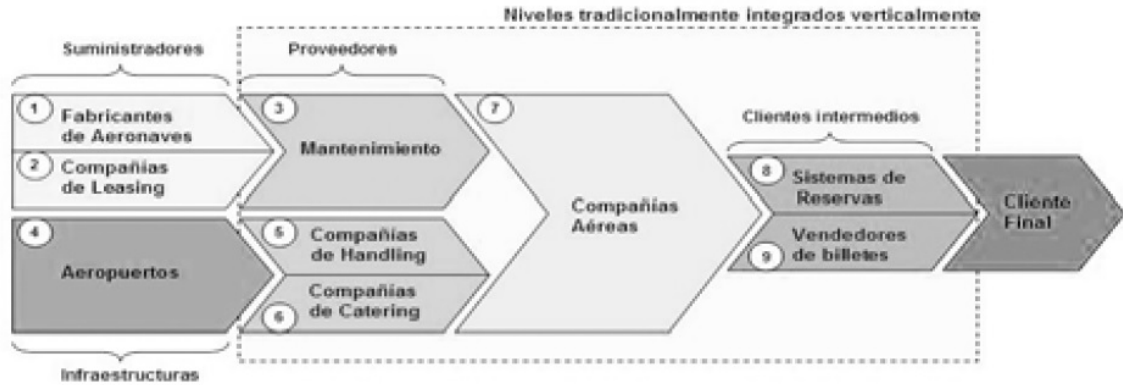


Figura 8.1: Cadena de Valor del transporte Aéreo

De la Figura anterior, el segmento a estudiar en cuanto a costos e inversión será el de *Mantenimiento*:

- **Mantenimiento:** Se trata de la actividad de revisión y puesta a punto de los aviones (y sus diversos componentes) para dotarlos de la máxima disponibilidad operativa, cumpliendo con todos los requerimientos técnicos reglamentarios, o sea, con la máxima confiabilidad y seguridad. Por tanto, los indicadores básicos son: la disponibilidad de la flota, la confiabilidad técnica y la puntualidad técnica (en los plazos de realización del mantenimiento).

Dentro de la actividad de mantenimiento, es posible distinguir el mantenimiento de línea y el programado (del avión entero, de motores, o de componentes):

- **Mantenimiento de línea:** No está programado previamente, se realiza mediante inspecciones rutinarias cuando el avión está en tránsito y no altera la actividad de éste, salvo que se detecten problemas, en cuyo caso puede suponer una demora, o incluso, cancelación del vuelo previsto. A su vez pueden también realizarse determinadas revisiones específicas como consecuencia de nuevas informaciones (básicamente procedente de las tripulaciones), por funcionamiento anómalo (o que plantee dudas) de un determinado equipo durante el vuelo.
- **Mantenimiento programado:** Son revisiones preventivas, organizadas en periodos más o menos extensos, según el tipo de avión, su antigüedad, y utilización:
 - Check A:** entre las 200 y 500 horas de vuelo, aproximadamente cada mes, el avión se detiene por 1 ó 2 días.
 - Check B:** entre las 700 y 1.800 horas de vuelo, en torno a cada cuatro meses, durando entre 3 y 4 días de detención.
 - Check C:** entre 2.500 y 4.000 horas de vuelo, realizadas cada año o año y medio, detención por dos semanas.
 - Check D:** también denominada *overhaul*: entre 15.000 y 30.000 horas de vuelo, cada 4 ó 5 años, inmovilizándose el avión 5 semanas como mínimo.

Así mismo, adicionalmente al número de horas afectará al momento de la revisión, el número de despegues efectuados; ya que no es lo mismo, para un avión doméstico, operar 15.000 horas, mediante 7.500 despegues de 2,5 horas de duración cada vuelo, que realizar 30.000 despegues con una duración media del vuelo de 0,5 horas.

Independientemente de los aviones, existe el mantenimiento de las partes rotables y reparables, que son componentes que se retiran de los aviones para su mantenimiento, sustituyéndolos por otros ya revisados. Estos componentes rotables, de los que los motores (y APU) son las piezas más representativas, tienen sus propios ciclos de mantenimiento.

La actividad de mantenimiento es una actividad propia de empresa industrial, utilizando alta tecnología, cuantiosas instalaciones y personal muy cualificado. La capacidad de competir en este negocio se basa en la

calidad del producto servicio, en el precio, en la inmovilización mínima del avión y el cumplimiento de las fechas comprometidas. Las inversiones necesarias son elevadas y la productividad de los recursos son claves para la rentabilidad.

Los factores que influirán en el costo de mantenimiento que debe enfrentar una compañía aérea son:

- Edad de la flota, a mayor edad mayor costo.
- Tamaño de la flota, a mayor tamaño de flota mayores sinergias, menores costos.
- Diversidad de tipos de avión, a mayor concentración de flotas menores costos.
- Utilización, a mayor utilización mayores costos.
- Plan de mantenimiento, optimización de la planificación de las operaciones de mantenimiento.
- Política de mantenimiento, procurando el mantenimiento necesario sin caer en una política de sobre-mantenimiento.
- Capacidad de mantenimiento, a mayor capacidad de mantenimiento propio, en principio, deberían producirse menores costos contratados.

8.3. Costos en las Compañías Aéreas

Los costos de una compañía de transporte aéreo se pueden clasificar de diversas formas, principalmente en función de cuatro objetivos: Toma de decisiones, Impacto Económico, Variabilidad y Operación.

1. Incidencia en la toma de decisiones

- *Costos evitable*: son aquellos costos en los que cabe un margen de actuación por parte de la compañía, como puede ser el no hacer algo (no realizar un vuelo), hacerlo en menor medida (reducir frecuencias sobre un destino) o hacerlo de forma diferente (operar un vuelo con un avión de menor capacidad), por ejemplo.
- *Costes hundidos*: aquellos que pueden no ser tomados en consideración, puesto que no se ven afectados por la decisión a tomar. Ejemplo de ello son los costos de marketing, costos de puesta en marcha de una ruta, etc.

2. Impacto económico

- *Costos diferenciales*: aquellos costos que en el futuro se verán afectados como consecuencia de la toma de una decisión. Por ejemplo, modificar el servicio a bordo.
- *Costos de oportunidad*: Costos que se producen por dedicar recursos (avión/tripulación) a una ruta actividad y no a otra. Son de difícil identificación, a nivel general, de forma que se deben analizar en cada uno de los casos.

3. Variabilidad de Costos

- *Costos fijos*: Son aquellos que no varían ante cambios en el nivel de actividad de la compañía. Uno de los temas principales, es definir el horizonte temporal de los mismos ya que en el medio plazo la mayoría de los costos se convierten en semifijos, sufriendo un incremento como consecuencia del aumento de actividad, aunque el mismo no sea de forma proporcional ni lineal. A su vez los costos fijos podrían clasificarse en:
 - *Costes fijos estructurales*, como son el arriendo o la amortización de la flota, de los edificios de oficinas, etc. No permiten la toma de decisiones a corto plazo para su gestión, ya que normalmente suelen estar acompañados de contratos a medio y/o largo plazo, de difícil resolución anticipada.

- *Costes fijos discretos*, que no experimentan una variabilidad con la actividad de la compañía, pero permiten algún margen de acción por parte de los administradores de la compañía. Ejemplos de estos, suelen ser publicidad, formación, determinados servicios internos de la compañía, etc.
- *Costos variables*: aquellos costes que varían con el volumen de actividad de la compañía, ya sea por cambios en la oferta, en la demanda, o por combinación de ambas. Ejemplo de los mismos serían: el combustible, las ayudas a la navegación, parte del mantenimiento vinculado a horas bloque de operación, etc.

Las compañías normalmente soportan una elevada estructura de costos fijos (aproximadamente el 60 % de los costos totales, corresponden a costos fijos). Por lo cual, se debe entender que el apalancamiento operativo y la capacidad de aprovechar la estructura de costos a medida que crece se convierte en un factor determinante.

4. Costos Operacionales

- *Costos no operacionales*: no vinculados directamente con la actividad de transporte aéreo; como son los costos financieros, excepcionales, etc.
- *Costos operacionales*: vinculados directa o indirectamente con la actividad de transporte aéreo.
- *Costos directos*: que pueden considerarse como tales en función de corresponder a costos directamente vinculados al avión y/o al pasajero (cuando hace referencia al negocio principal, transporte de pasajeros, aunque también aplicable a los otros negocios de las compañías aéreas).
- *Costes indirectos*: en caso de que no sean imputables directamente al avión y/o al pasajero.

Entendiendo la descripción y clasificación de los principales costos en la aviación comercial, se ahondará cómo estos han cambiado y afectado a la industria en los últimos años. Tomando como modelo para el estudio el mercado norteamericano, las estadísticas muestran que los costos unitarios por asiento vendido han disminuido en torno al 4 % pasando de 11,5 a 11 [centavos/milla⁸] ([Stalnaker et al., 2016](#)).

La **Figura 8.2** muestra la variación que ha tenido en el último año el *CASM* (*Cost per Available Seat Mile*), esta unidad de medida permite comparar la eficiencia de varias aerolíneas. Se obtiene al dividir los costos operacionales por el número de asientos disponibles (flota) que cuenta una línea aérea.

⁸ 1 milla equivale a 1,6 kilómetros

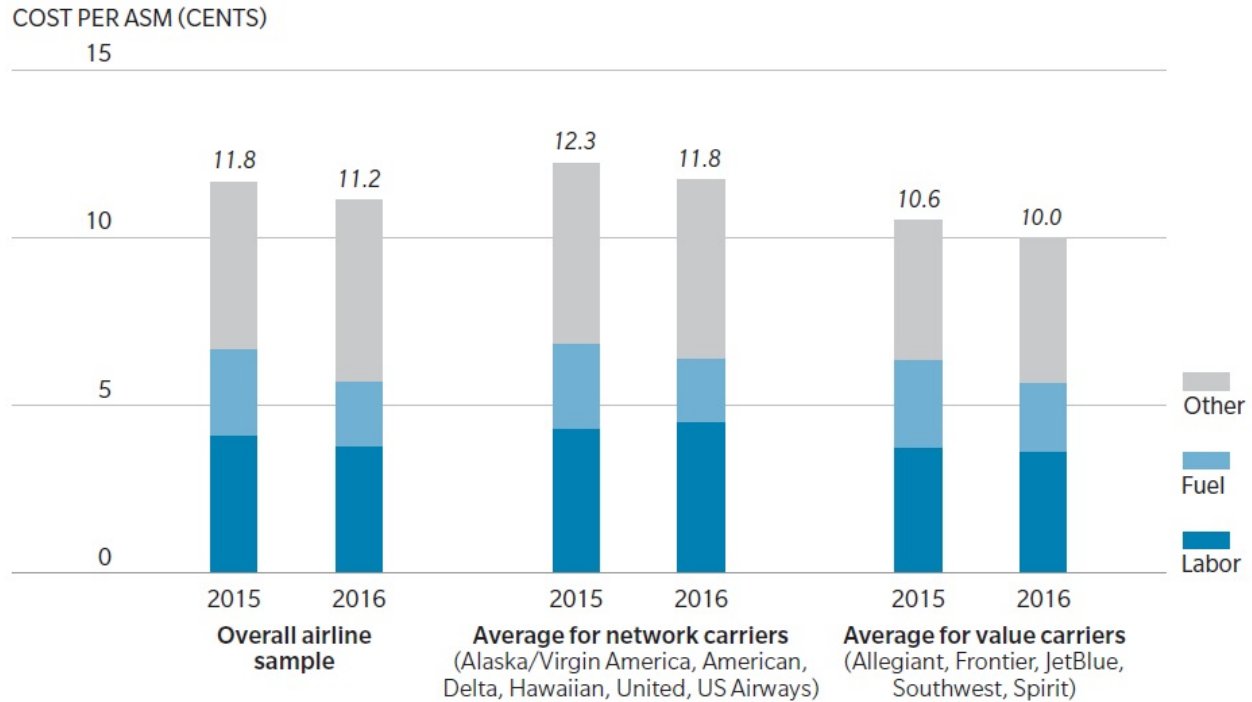


Figura 8.2: Variación 2015-2016 CASM

La caída en los precios del combustible ha impulsado esta disminución en los costos, en promedio el petróleo ha disminuido entre un 15-18 % durante los últimos dos años representando para la estructura de costos de una aerolínea el 17,5-21 % de sus costos fijos totales. El combustible representa la segunda mayor categoría de costos para las aerolíneas en el mundo.

Por otra parte, la mano de obra en la aviación es la categoría más costosa para las grandes aerolíneas. Representa el 35 % del costo unitario, este costo ha tenido un aumento sostenido en el tiempo, sólo en el período 2015-2016 aumentó un 5,4 %. Las aerolíneas network (o de conexión de red, es decir, aquellas que realizan conexiones internacionales) han mostrado una tendencia a disminuir sus costos en mantenimiento, el último periodo anota una baja del 3,4 % mientras que por otra parte el costo por propiedad (adquisición de aeronaves) aumentó un 2,4 %; para estos operadores el mantenimiento representa el 10 % del costo total. La tendencia en el último tiempo en toda la industria ha sido renovar periódicamente sus aviones, lo que lleva a grandes ahorros en combustible (ya que los aviones nuevos, son más eficientes) y en mantenimiento.

La **Figura 8.3** muestra la distribución de costos en los principales segmentos: Mano de Obra, Combustible, Mantenimiento, Propiedad y Otros tanto para operadores Network y Low Cost (o Value Carriers).

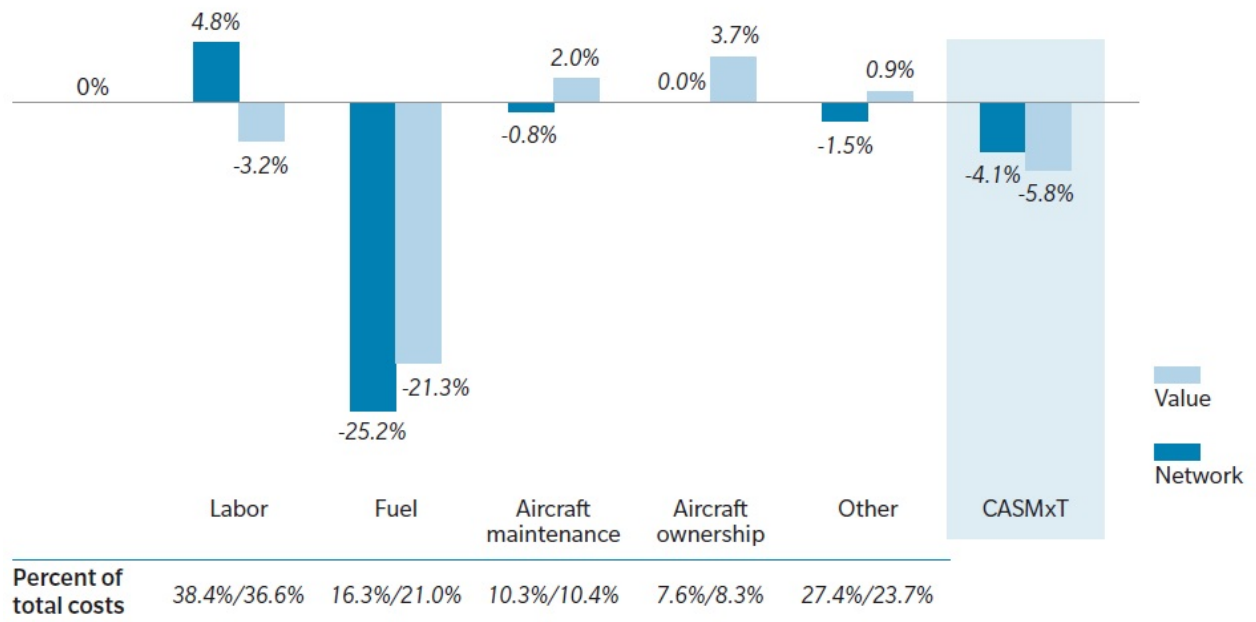


Figura 8.3: Distribución de costos para Operadores Network y Low Cost

El factor combustible para la aviación, es un tema que corresponde revisar, su precio ha disminuido en el último tiempo y se ha mantenido bajo. De acuerdo al Departamento de Transporte de Estados Unidos, las aerolíneas estadounidenses pagaron 1,53 dólares por galón de combustible para aviones durante el segundo trimestre de 2016, un 24,5 % por debajo de lo que pagaron 12 meses antes.

En los últimos 24 meses, las aerolíneas estadounidenses se han beneficiado de los menores precios del combustible. Antes de septiembre de 2014, el costo del combustible se mantuvo prácticamente estable durante un período de 15 meses. Si bien sigue siendo alto basado en los últimos estándares históricos, y más alto que hoy, las líneas aéreas disfrutaron de costos de combustible relativamente estables. Aún así, los ejecutivos de aerolíneas ciertamente prefieren los niveles actuales sobre un precio alto pero estable.

Desde el período de estabilidad relativa en 2013 y 2014, los programas de cobertura de combustible han sido menos favorables para las aerolíneas. Los precios spot de los combustibles han promediado casi un 16 % por debajo de lo que las compañías estadounidenses han reportado pagar. El precio medio del combustible del sistema ha superado sistemáticamente los precios desde 2009.

La **Figura 8.4** muestra la evolución del precio del galón de combustible.

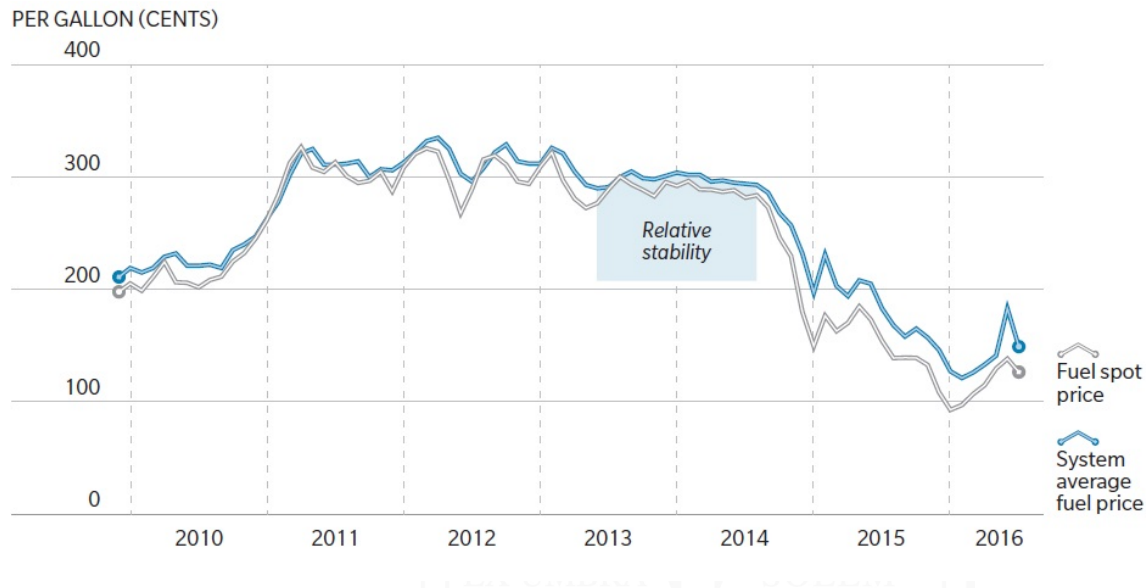


Figura 8.4: Evolución costo combustible 2010-2016

8.4. Resultados Operacionales y Beneficios en la Aviación

Luego de revisar los principales costos, su composición y cuánto gasto representan para una aerolínea; corresponde entender cómo obtienen beneficios, las principales estrategias que utilizan para maximizar ganancias dentro de un mercado altamente competitivo y altamente sensible a cambios en la economía.

De acuerdo a (Stalnaker et al., 2016) el segundo trimestre de 2016 marca el decimotercer trimestre consecutivo de rentabilidad para las aerolíneas. Esta rentabilidad limitada pero sostenida es en gran parte el resultado de:

- Fuerte crecimiento del *yield* de pasajeros desde 2009 a 2014.
- Aumento de los ingresos por la generación de *ancillary revenues*.
- Reducción del costo de jet fuel entre 2014-2016.
- Profunda preocupación en la estructura de costos, buscando la reducción de gastos innecesarios.

Se entiende por *Yield* es un indicador que busca evaluar cuánto logra la aerolínea facturar por cada kilómetro que vuela un pasajero:

$$Yield = \frac{\$}{Distancia}$$

Por otra parte el *ancillary revenue* o ingreso complementario, son aquellos beneficios que no vienen directamente por la venta de tickets aéreos sino son aquellos pagos que hace el cliente por servicios adicionales como equipaje extra, alimento o servicios extras.

No obstante lo anterior, varios factores amenazan hoy la sostenibilidad de los márgenes de beneficio. El descenso del *yield* de los pasajeros, especialmente en las regiones de América Latina y el Pacífico, han erosionado las ganancias positivas antes de 2014. Los precios spot del combustible han comenzado a subir desde que alcanzaron mínimos recientes a principios de 2016. La rentabilidad a largo plazo dependerá de la capacidad de la industria para volver al crecimiento positivo de los ingresos unitarios y mantener una disciplina enfocada en el control de costos.

Las **Figuras 8.5-8.6** muestran la evolución que han tenido los resultados operacionales de acuerdo al tipo de operador (Network o Low Cost). Dos años que se deben destacar son el 2001: luego del ataque a las torres gemelas la industria vivió un periodo crítico por el impacto que tuvieron los eventos del 11 Septiembre. Luego comienza una lenta pero sostenible recuperación hasta el año 2009 donde se desata la crisis subprime y nuevamente la industria cae en rentabilidades apenas sostenibles, alguna aerolíneas desaparecieron en este periodo, otras en su mayoría se reinventan y desarrollan nuevas técnicas que permiten tenerlas hoy con márgenes estables y crecientes.

Por otra parte, la **Figura 8.6** describe la proporción de márgenes que se obtiene por tipo de negocio en donde opera la aerolínea (Internacional o Doméstico). En las grandes líneas aéreas destaca el negocio doméstico como aquel sector donde se obtienen los mayores márgenes operacionales, no obstante, los pasajeros que viajan a destinos internacionales son aquellos que más dinero dejan a las compañías.

Caso similar ocurren con los operadores Low Cost (Value Carriers) su principal objetivo es consolidarse dentro del mercado local para luego expandir nuevas rutas hacia el extranjero (con limitaciones propias de su modelo de negocio), pero buscando quitar participación de mercados a los operadores tradicionales.

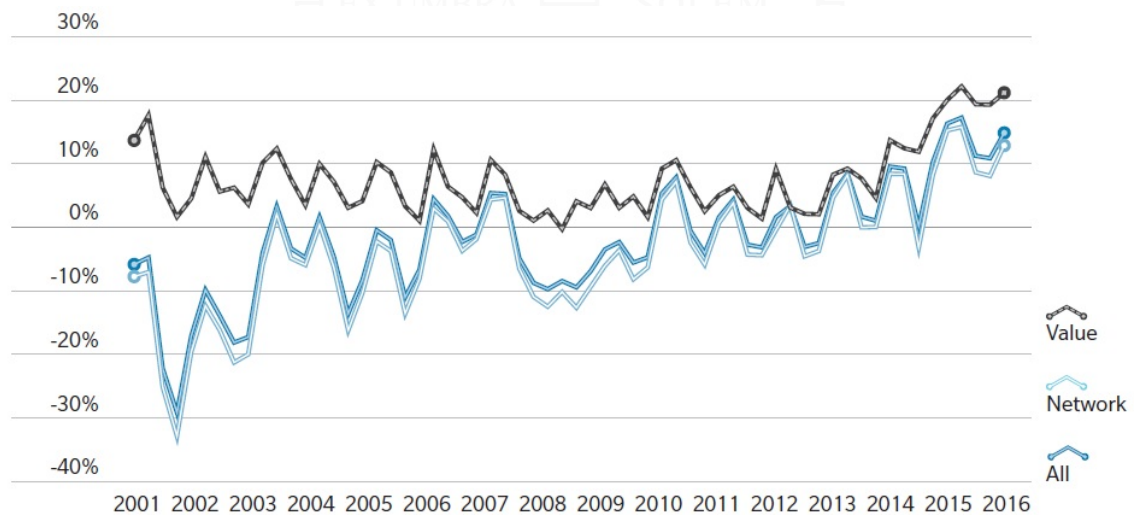
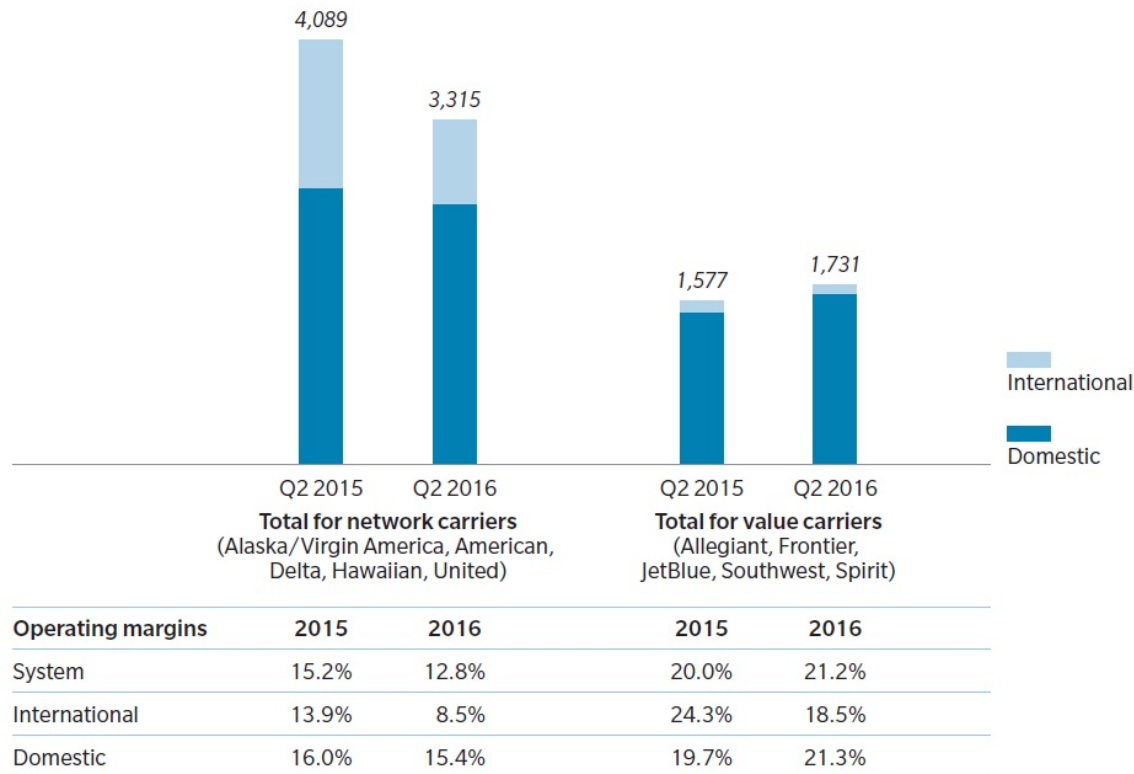


Figura 8.5: Margen operacional histórico operadores Network y Low Cost

MILLIONS (DOLLARS)

**Figura 8.6:** Margen operacional de acuerdo al tipo de operación doméstica/internacional

En líneas generales, la rentabilidad por ASM (beneficio en centavos por asiento milla) cayó en 0,3 centavos llegando a 1,9 centavos durante el segundo trimestre 2016. En todo el sistema, los ingresos por unidad cayeron 0,8 centavos por ASM para las aerolíneas. El costo unitario cayó a una tasa más lenta, 0,5 centavos por ASM. Los ahorros en costos de combustible 0,7 centavos fueron parcialmente compensados por aumentos en el costo de mano de obra (hasta 0,1 centavo) y otros costos. Lo anterior lleva a las aerolíneas a tener ganancias entre los 200-400 millones de dólares.

La **Figura 8.7** muestra las ganancias (por asiento/milla) obtenidas de acuerdo a los principales costos que enfrentan los operadores aéreos:

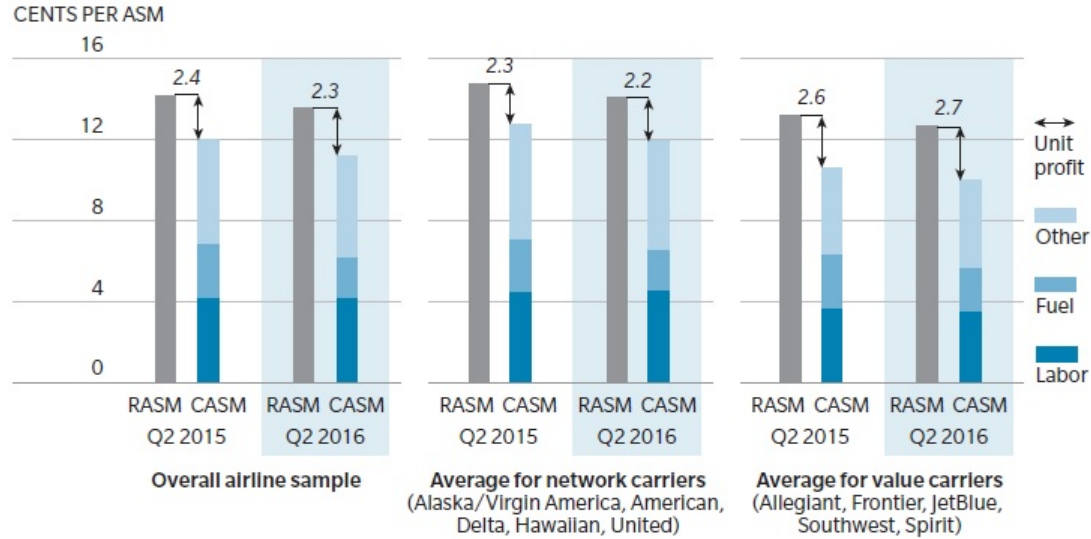


Figura 8.7: Comparación RASM y CASM

Al comparar el RASM (*Revenue per Available Seat per Mile*)⁹ y CASM (*Cost per Available Seat per Mile*)¹⁰ de los últimos dos años tanto para operadores Network y LCC; los márgenes operacionales no difieren más que en 0,1 punto porcentual. Esto muestra que la gestión de costos en la industria es el principal driver que condiciona el éxito o fracaso financiero de una aerolínea sin importar el tipo de operación que realice. El costo del capital humano y el combustible alcanza aproximadamente el 60 %, sin embargo como se muestra en la **Figura 8.7** 40 % restante (other cost) se asocia directamente a costos por mantenimiento o compras de materiales asociadas al mismo.

Es importante notar que el margen de 2,3-2,4 % sólo considera beneficios directos por la venta de pasajes, y no los ancillary revenues que también representan ingresos considerables para la operación, pero que están fuera de alcance de esta investigación.

Los operadores Network han sido consistentemente rentables en los últimos seis trimestres en los mercados nacionales. El *load factor*¹¹ actual de las compañías de red ha superado el *factor de carga de equilibrio*¹² (break-even load factor) con una diferencia actual de más de 13 puntos.

Las **Figuras 8.8 y 8.9** resumen las tendencias de beneficios pérdidas que han tenido operadores Networks en sus rutas domésticas. El factor de equilibrio (break-even load factor) de las compañías de red alcanzó un 73,3 % durante el segundo trimestre de 2016, ligeramente superior al del segundo trimestre de 2015 (72,8 %). Como se observa en la sección de ingresos, los factores de carga reales (load factor) se han aplanado recientemente después de registrar una tendencia creciente durante los últimos diez años.

⁹Unidad de medida que se utiliza para comparar la eficacia de varias líneas aéreas. Se obtiene dividiendo la utilidad operacional por millas de asiento disponibles (ASM). Generalmente, cuanto más alto sea el RASM, más rentable será la aerolínea

¹⁰Unidad de medida común utilizada para comparar la eficiencia de varias aerolíneas. Se obtiene dividiendo los costos operativos de una aerolínea por millas de asiento disponibles (ASM).

¹¹Generalmente se utiliza para evaluar la eficiencia con que un proveedor de transporte llena asientos y genera ingresos a partir de sus tarifas.

¹²Porcentaje de los asientos que la aerolínea tiene en servicio que debe vender a un rendimiento dado, o nivel de precios, para cubrir sus costos.

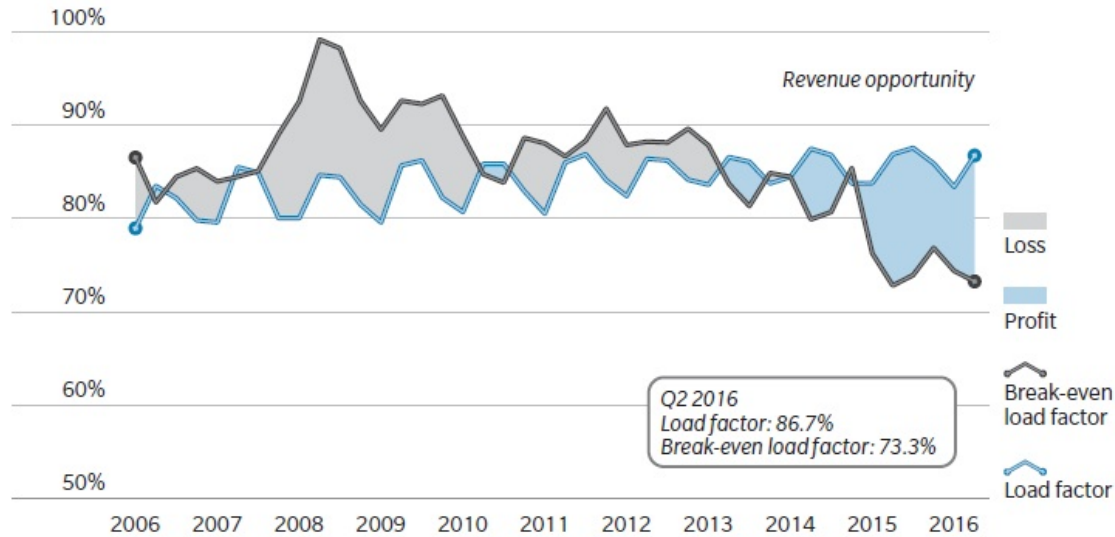


Figura 8.8: Operator Network doméstico - Load Factor y Break-even Load Factor

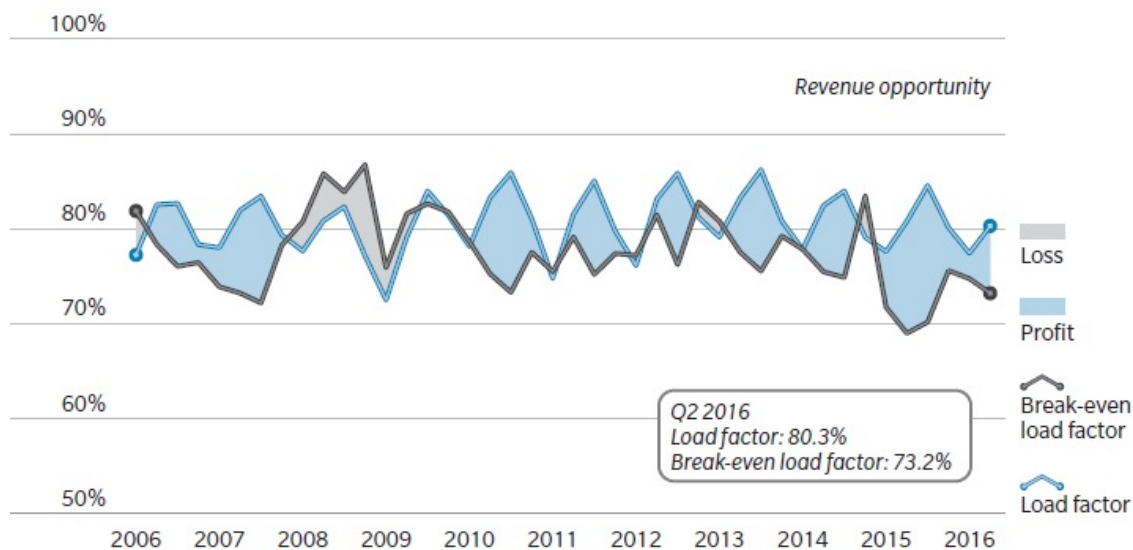


Figura 8.9: Operator Network internacional - Load Factor y Break-even Load Factor

Dado el reciente aplanamiento del factor de carga real, la continuación del éxito nacional de las compañías de red dependerá de su capacidad para mantener bajos factores de equilibrio con una combinación de costes controlados y tendencias positivas de ingresos (yield de pasajeros).

Con excepción de dos trimestres, las operaciones domésticas de las líneas aéreas Network han sido rentables desde el punto de vista operativo desde 2006. Los resultados del segundo trimestre de 2016 produjeron el mayor diferencial entre el factor de carga real y el punto de equilibrio (18,4 puntos) en los últimos diez años.

Se espera que las nuevas tecnologías ayuden aún más en este proceso de ahorro en costos, la inversión puede parecer elevada para los beneficios que hoy se esperan. No obstante, el futuro cambiará muchas cosas que hoy parecen inalterables los combustibles volverán a elevar sus precios, la competencia entre operadores será cada vez más fuerte, nuevos operadores iniciarán con políticas más agresivas para robar participación de

mercado.

8.5. Beneficios Económicos del Transporte Aéreo en Chile

El transporte aéreo hacia, desde y dentro de Chile crea tres distintos tipos de beneficios económicos. Típicamente, los estudios se enfocan hacia la contribución al PIB, al empleo y al ingreso tributario creado por el sector y su cadena de abastecimiento. Pero el valor económico creado por la industria es más que eso. Los principales beneficios se crean para los clientes, pasajeros o embarcadores que utilizan los servicios de transporte aéreo. Además, las conexiones generadas entre ciudades y mercados representan un importante activo de infraestructura que genera beneficios que posibilitan las inversiones extranjeras directas, los grupos (clusters) de negocios, las especializaciones y otros impactos de rebalse (spill-over impacts) sobre la capacidad productiva de la economía.

El sector aeronáutico contribuye:

- 748 mil millones (CLP), que son aportados directamente mediante la producción del sector aeronáutico (aerolíneas, aeropuertos y servicios en tierra).
- 375 mil millones (CLP), que son indirectamente aportados mediante la cadena de abastecimiento del sector aeronáutico.
- 305 mil millones (CLP), que son aportados mediante el gasto incurrido por los empleados del sector aeronáutico en su cadena de abastecimiento.
- Además de lo anterior, hay 1,3 billones (CLP) en beneficios *catalíticos* a través del turismo, lo que aumenta la contribución total a 2,7 billones (CLP); es decir, 3 % del PIB.

El sector aeronáutico sustenta 73.000 empleos en Chile:

- 24.000 empleos sustentados directamente por el sector aeronáutico.
- 27.000 empleos sustentados indirectamente mediante la cadena de abastecimiento del sector aeronáutico.
- 22.000 empleos sustentados a través del gasto incurrido por los empleados del sector aeronáutico y de su cadena de abastecimiento.
- Junto con lo anterior, 88.000 personas logran empleos a través del efecto catalítico (turismo) de la aviación.

La integración de Chile a la red mundial de transporte aéreo transforma las posibilidades que se abren a la economía chilena:

- Abrir mercados extranjeros para las exportaciones chilenas.
- Reducir el costo de transporte, particularmente sobre grandes distancias, facilitando el aumento de la competencia, porque los proveedores pueden atender un área más vasta y potencialmente reducir sus costos promedio mediante crecientes economías de escala.
- Aumentar la flexibilidad de la oferta de mano de obra, lo que a su vez debería mejorar la eficiencia en la asignación de los recursos y reducir la tasa natural de desempleo.
- Alentar a los negocios chilenos a invertir y especializarse en áreas que le sacan provecho a las fortalezas de la economía.
- Acelerar la adopción de nuevas prácticas comerciales, como por ejemplo la administración de inventarios bajo una filosofía JIT (just-in-time), que depende de la rápida y oportuna entrega de insumos esenciales.

- Aumentar la productividad y en consecuencia la capacidad de abastecimiento de largo plazo de la economía. Se estima que una mejoría de 10 % de la productividad en relación al PIB representa 57,6 billones (CLP) anuales de aumento del PIB de largo plazo a la economía chilena.

Entre las muchas razones por las que las personas y los negocios usan el transporte aéreo se cuentan que las personas confían en él para sus vacaciones y para visitar familiares y amigos; por otra parte, los negocios usan el transporte aéreo para reunirse con clientes y para la entrega rápida y confiable de correo y bienes a menudo a grandes distancias. Por esta razón, la red de transporte aéreo ha sido llamada la Red Mundial Real.

8.5.1. La Conectividad y el Crecimiento económico a Largo plazo

La **Figura 8.10** da una idea de cuán extensa es la red de transporte aéreo en Chile. De esta red, el 2010 había 36 rutas que conectaban a Chile con las aglomeraciones urbanas alrededor del mundo. En promedio (de *Aviación Civil, 2017*), hubo 4 vuelos de salida diarias por esas rutas. Un total de 8 de esas rutas conectaban a Chile con ciudades de más de 10 millones de habitantes, con 3,7 vuelos de salida diarios disponibles para pasajeros. Las frecuencias son mayores hacia los destinos económicamente más importantes. Por ejemplo, los pasajeros se beneficiaron de 7,5 vuelos de salida diarios desde Santiago al aeropuerto de Ezeiza en Buenos Aires, y de 3 vuelos diarios de Santiago al Aeropuerto Internacional de Miami, proporcionando un acceso de alta velocidad para propósitos tanto comerciales como de recreo a través del día.



Figura 8.10: Red de transporte aéreo en Chile

Estos enlaces representan la conectividad de las ciudades chilenas con las grandes ciudades y mercados del mundo. La conectividad refleja el rango, frecuencia o servicio, la importancia económica de los destinos y la cantidad de conexiones a destino disponibles a través de la red aeronáutica de cada país. Las mejoras en materia de conectividad conseguida en años recientes le ha significado beneficios a los usuarios de servicios de transporte aéreo al: reducir el tiempo de tránsito y aumentar la frecuencia de los servicios permitiendo tiempos de espera más breves y una mejor programación de los horarios de salida y llegada; y al mejorar la calidad de los servicios en términos de su confiabilidad, puntualidad y calidad de la experiencia de viaje.

Algunas de estas conexiones entre ciudades disponen de servicios de punto a punto, donde la densidad del flujo de pasajeros es suficiente como para lograr que las economías funcionen. Sin embargo, muchas de las conexiones entre ciudades que componen la conectividad de Chile con mercados extranjeros, sólo pueden ser atendidas mediante flujos agregados por las aerolíneas de una cantidad de puntos de origen a través de un aeropuerto eje (hub airport) de manera de generar un flujo de pasajeros suficientemente denso.

El beneficio clave de un aeropuerto hub es que puede sustentar una red más completa y amplia con una mayor frecuencia de servicio de la que sería posible con un puerto de punto a punto. Los pasajeros en tránsito (transfer passengers) hacen que las rutas directas hacia muchos destinos sean sustentables, un patrón que se encuentra en todos los aeropuertos internacionales hub más importantes. Los pasajeros en tránsito permiten que los residentes y empresas residentes puedan acceder a más destinos directos a frecuencias mayores y tarifas inferiores. Al aumentar la capacidad de vuelo de un aeropuerto hub (eje), se logra magnificar el impacto de su conectividad si se lo compara con aumentar la capacidad a un aeropuerto de punto a punto. Los aeropuertos hub ofrecen mejor servicios, más destinos y mayores frecuencias de las que podrían ser ofrecidas si ese mismo aeropuerto estuviese exclusivamente destinado a satisfacer la demanda local.

Las mejoras de conectividad han sido acompañadas por una continua disminución del costo de los servicios de transporte aéreo. El costo de los servicios de transporte aéreo, en términos reales, ha disminuido alrededor de 1 % anual durante los últimos 40 años, contribuyendo a la rápida expansión del volumen del comercio experimentado durante este período (Swan, 2007). El transporte aéreo también se ha ido haciendo cada vez más competitivo en relación con otras modalidades de transporte. Por ejemplo, se calcula que su costo relativo ha ido disminuyendo por cerca de 2,5 % anual desde los años 1990 (Hummels, 2007). A medida que su costo relativo ha ido disminuyendo, los embarques aéreos se han ido haciendo cada vez más importantes para el comercio internacional.

Las mejoras de conectividad contribuyen al rendimiento económico de la economía en general, al mejorar su nivel total de productividad. Este aumento de la productividad en compañías más allá del sector aeronáutico proviene de dos canales principales: a través del efecto de un aumento del acceso a los mercados extranjeros por parte de las empresas nacionales y del aumento de la competitividad en el mercado nacional; y a través de los movimientos de inversiones en capital y trabajadores entre países.

Una mejor conectividad le da a las empresas que operan en Chile, un mayor acceso a los mercados extranjeros, fomentando las exportaciones a la vez aumentando la competencia y las opciones en el mercado local de los productores que operan en el extranjero. De esta manera, una mejor conectividad incentiva a las empresas a especializarse en aquellas áreas en las que tienen ventajas comparativas. Ahí donde las empresas gozan de ventajas comparativas, el comercio internacional da la oportunidad de desarrollar economías de escala, presionando sus costos y precios a la baja y, en consecuencia, beneficiando a los consumidores nacionales en el proceso. La apertura de mercados nacionales a competidores extranjeros puede también ser un importante motor para reducir los costos unitarios de producción, sea forzando a las empresas nacionales a adoptar mejores prácticas productivas y métodos administrativos internacionales o bien fomentando la innovación. La competencia también puede beneficiar a los clientes nacionales reduciendo los costos comerciales (mark-up costs) que las empresas les recargan, especialmente aquellas empresas que han previamente disfrutado de algún tipo de refugio ante la competencia.

Un experimento teórico que considere el impacto en el comercio al eliminar la red de transporte aéreo, sugiere que el beneficio económico de la conectividad es sustancial. Más aún, la experiencia de los negocios en Europa durante los cierres del espacio aéreo inducidos por ceniza volcánica del 2010, al fallar las cadenas de abastecimiento JIT, entrega una imagen más concreta de cuán dependientes son las economías modernas de sus infraestructuras de transporte aéreo.

Una serie de estudios recientes han intentado cuantificar el impacto de largo plazo sobre el PIB de un país que resulta de mejoras en conectividad. Medir la conectividad no es algo simple, dado que los beneficios de la conectividad por el lado de la demanda provienen de la promoción del comercio internacional y de las inversiones internas (inward investment), cualquier impacto solo se irá manifestando gradualmente en el tiempo. Este prolongado ajuste torna muy desafiante poder desagregar la contribución aportada por una mejor conectividad sobre el crecimiento de largo plazo, de la contribución aportada por muchos otros factores que también afectan el rendimiento de una economía.

Este tema queda reflejado en la amplia gama de estimaciones a las que han llegado diversos estudios en el impacto de la conectividad sobre el crecimiento económico de largo plazo. Tres estudios realizados en el 2005 y 2006 hacen una estimación respecto del impacto que puede tener la conectividad sobre el nivel

de productividad de largo plazo (y sobre el PIB). Estos estudios sugieren que un 10 % de aumento en conectividad (relativa al PIB) aumentará el nivel de productividad de la economía por un poco menos que un 0,5 % en el largo plazo; aunque existe un buen grado de incertidumbre respecto de esta estimación promedio (BRITTON et al., 2005). Un estudio mucho más amplio realizado el 2006, basado en un análisis estadístico de la conectividad y productividad en varios países, derivó un estimado menor de 0,07 % para la elasticidad entre conectividad y la productividad de largo plazo (Vancouver, 2006). La **Figura 8.11** muestra lo referido del estudio:

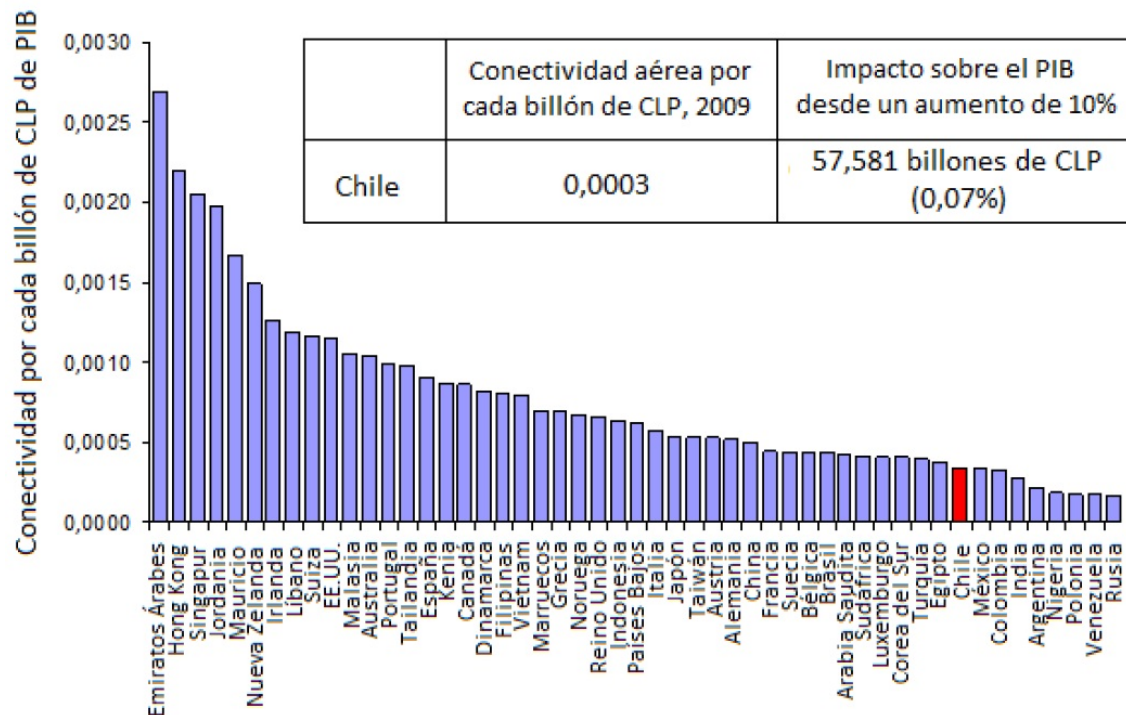


Figura 8.11: Conectividad aérea por país

8.5.2. El Sector Aeronáutico y la Huella Económica

Los recursos utilizados por el sector aeronáutico se miden por su *Valor Agregado Bruto* (VAB); el VAB se calcula como el producto creado por el sector menos el costo de los insumos comprados (medida de producción neta), o bien, como la suma de las utilidades y salarios (antes de impuestos) generados por la actividad económica del sector (medida de ingreso). Ambas metodologías son equivalentes. Al utilizar cualquiera de ellas y agregar el VAB de todas las empresas en la economía, se obtiene una estimación de la producción global de la economía (PIB)¹³. A lo anterior se denomina la contribución directa del sector al PIB del país.

A partir de esta contribución directa se calcula la *Huella Económica* agregándole el producto (y empleos) sustentado por otros dos canales, a los que es posible referirse como participaciones indirectas y participaciones inducidas. La contribución directa mide los recursos utilizados por el sector aeronáutico al consumir bienes y servicios producidos nacionalmente por otras empresas, por ejemplo, los recursos utilizados a través de su cadena de abastecimiento. El VAB generado a través de los canales directos e indirectos sustenta empleos tanto en el sector aeronáutico como a lo largo de su cadena de abastecimiento. A su vez, aquellos trabajadores

¹³Solo es cierto hasta una aproximación de que el VAB es igual a la suma de las utilidades y los salarios, o bien, de que la suma del VAB a lo largo de todas las empresas es igual al PIB. La diferencia en cada caso, sin embargo, es suficientemente pequeña como para que se proceda como si las igualdades se cumplieran.

cuyos empleos dependen de esta actividad gastan sus salarios en bienes y servicios. La participación inducida es el valor de los bienes y servicios adquiridos por esta fuerza de trabajo. Tomados en conjunto, estos tres canales marcan la Huella Económica del sector aeronáutico en términos de VAB y empleos.

El sector aeronáutico contribuye a la economía de otras dos maneras. Primero, a través de los impuestos sobre el VAB (teniendo presente que este último es igual a la suma de las utilidades y los salarios) el sector aeronáutico sostiene las finanzas públicas y los servicios públicos que dependen de ellas. Y, segundo, a través de sus inversiones y la utilización de tecnología avanzada, el sector aeronáutico genera más VAB por empleado que la economía en su totalidad, incrementando así el nivel general de productividad de la economía.

La manera cómo se construye la Huella del sector aeronáutico está también ilustrada en las **Figuras 8.12-8.13**. Los dos paneles superiores muestran las dos actividades que componen el sector aeronáutico; los servicios de transporte aéreo; y la infraestructura de tierra. El panel inferior representa sus cadenas de abastecimiento con bloques que incluyen los elementos más importantes comprados por cada actividad. El tercer panel desde arriba describe la contribución inducida que viene a través del gasto efectuado por los trabajadores tanto del sector aeronáutico como de su cadena de abastecimiento. El panel inferior, denominado Huella Económica, informa el VAB total, empleos y contribución tributaria. Estos totales son la suma de las cifras informadas en los paneles superiores.

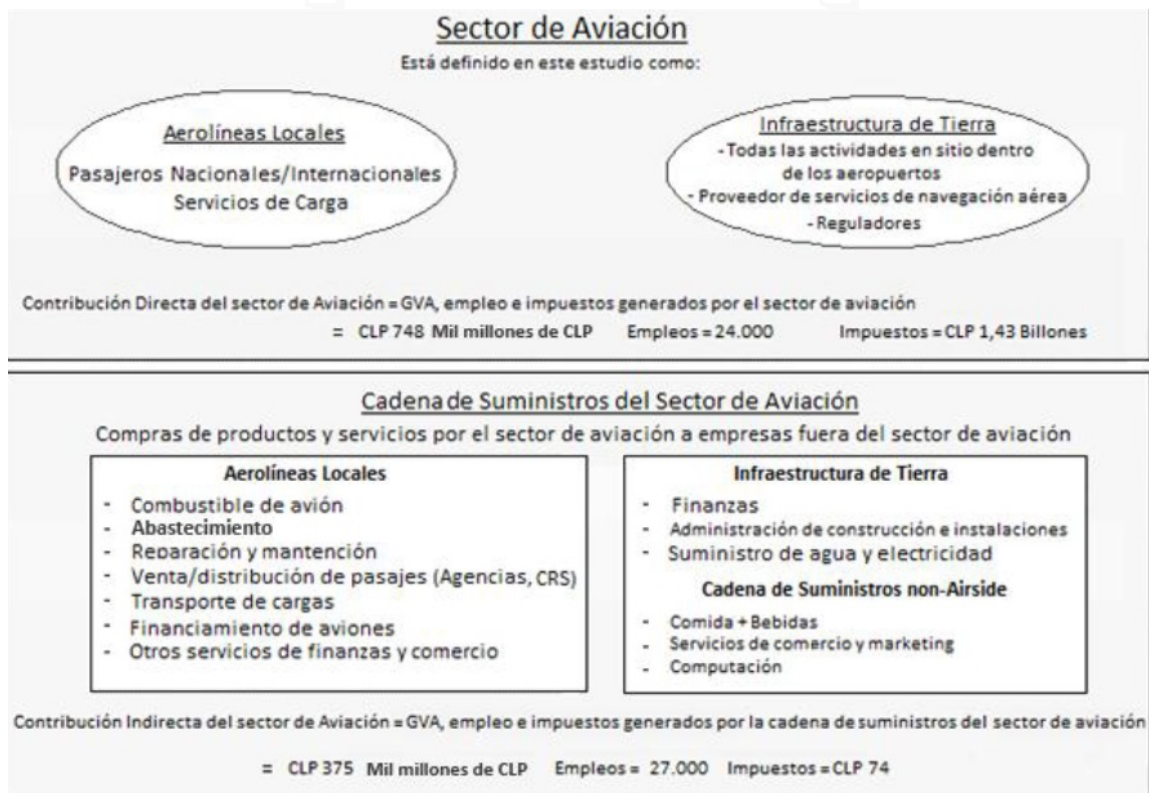
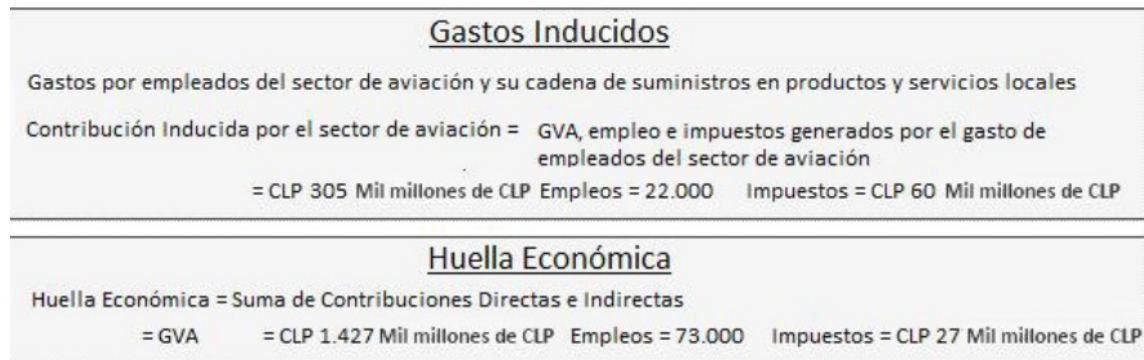


Figura 8.12: Huella económica del Sector de Aviación en Chile

El sector se compone de dos tipos de actividades distintas:

1. Las **aerolíneas**, que transportan pasajeros y carga.
2. La **infraestructura de tierra**, que incluye los establecimientos aeroportuarios, los servicios proporcionados a los pasajeros en dichos establecimientos, tales como el manejo de equipaje, la emisión de boletos y los servicios minoristas y de alimentación, junto con servicios esenciales proporcionados fuera de estos establecimientos, tales como la navegación y regulación aérea.

**Figura 8.13:** Huella económica del Sector de Aviación en Chile

El sector aeronáutico sostiene el PIB y el empleo en Chile a través de cuatro canales claramente diferenciados. Estos canales son:

1. El **directo**: que es el producto y el empleo de las empresas del sector aeronáutico.
2. El **indirecto**: que es el producto y el empleo sostenido a través de la cadena de abastecimiento del sector aeronáutico basado en Chile.
3. El **inducido**: que es el producto y el empleo sostenido por el consumo de aquellos directa o indirectamente empleados en el sector aeronáutico.
4. El **catalítico**: que está constituido por los beneficios de rebalse (spillover) asociados con el sector aeronáutico. Algunos de estos incluyen aquellas actividades sostenidas por el consumo de los visitantes extranjeros que viajan a Chile por vía aérea, y el nivel de comercio directamente habilitado por el transporte de mercancías.

8.5.2.1. Aerolíneas

Las aerolíneas inscritas en Chile transportan 8 millones de pasajeros y 156.000 toneladas de carga anual desde, hacia y dentro de Chile. Entre las muchas razones por las que las personas y los negocios utilizan el transporte aéreo están que las personas confían en él para sus vacaciones y para visitar familiares y amistades; mientras que los negocios utilizan el transporte aéreo para reunirse con clientes y para un despacho confiable y rápido de correo y bienes a menudo a grandes distancias. Las regiones hacia y desde las que los viajeros vuelan ilustran el alcance mundial de esta red, **Figura 8.14**.

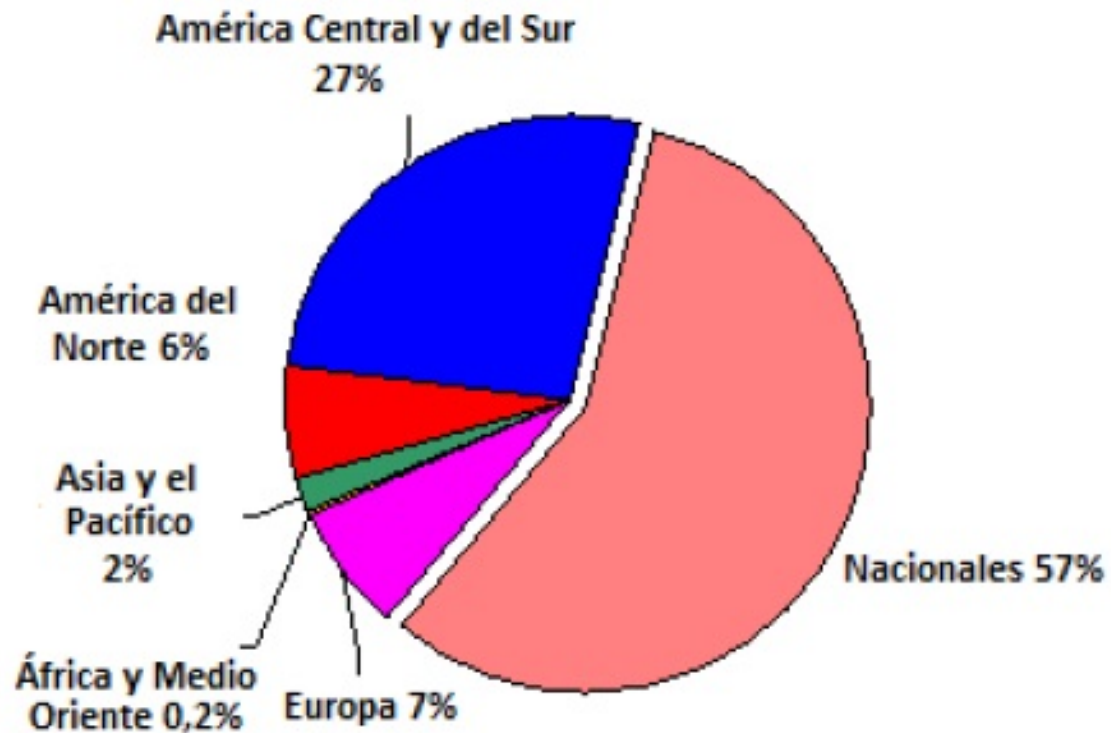


Figura 8.14: Distribución regional de los vuelos de pasajeros programados originados en Chile.

Las aerolíneas inscritas en Chile emplean directamente 10.000 personas localmente, y sostienen a través de sus cadenas de abastecimiento otros 22.000 empleos. Ejemplos de estas cadenas de abastecimiento incluyen aquellos que se encuentran en el sector de distribución y que entregan combustible para la aviación; al igual que los empleos del sector de alimentación (catering sector) que preparan las comidas que se sirven a bordo de las aerolíneas. Otros 15.000 empleos son sustentados a través del gasto doméstico incurrido por aquellas personas empleadas por las aerolíneas y por sus respectivas cadenas de abastecimiento.

Estas aerolíneas contribuyen directamente cerca de 613 mil millones (CLP) a la economía (PIB). El sector contribuye indirectamente otros 296 mil millones (CLP) a través de la producción que sustenta aguas debajo de su propia cadena de abastecimiento. Otros 208 mil millones (CLP) provienen del gasto de los empleados de las aerolíneas y de sus respectivas cadenas de abastecimiento ver **Figura 8.15**.

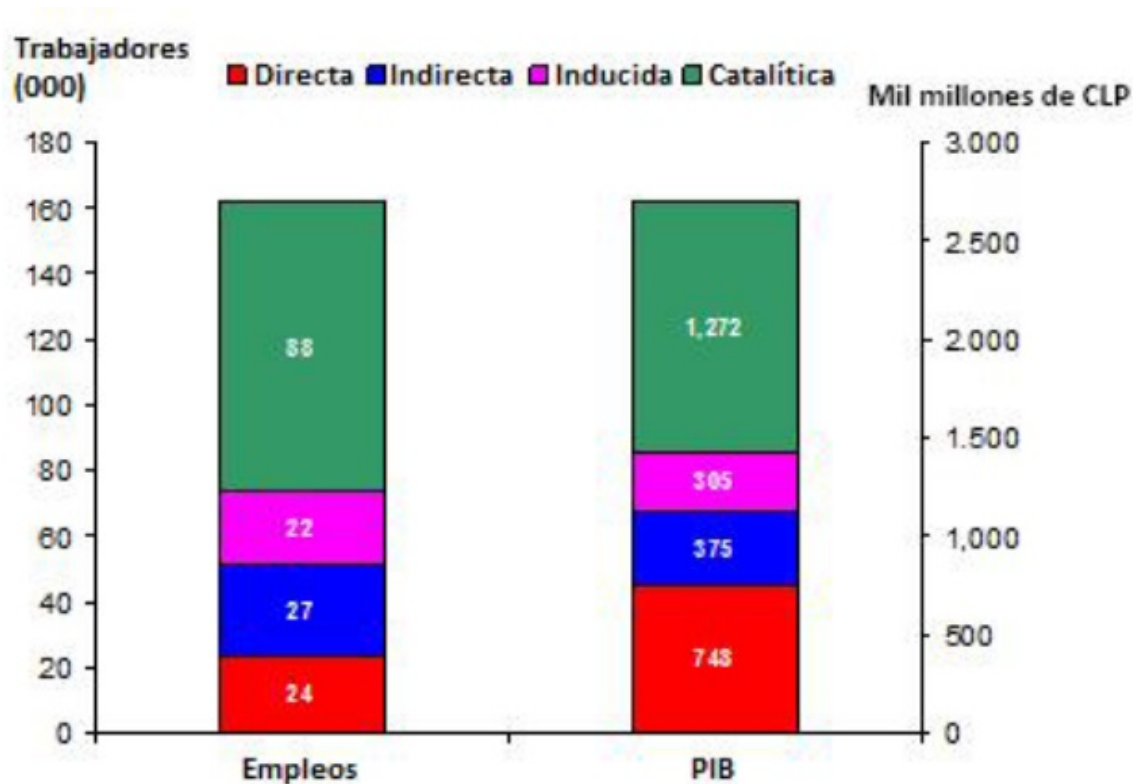


Figura 8.15: Producto y empleos chilenos sostenidos por el sector aeronáutico

8.5.2.2. Aeropuertos y Servicios de Tierra

Las aerolíneas necesitan infraestructura de tierra para operar. Esta infraestructura incluye los establecimientos en los aeropuertos que atienden directamente a los pasajeros, tales como el manejo de equipaje, emisión de boletos, y locales de ventas minoristas y de alimentación. Menos visibles son servicios esenciales que algunas veces se proporcionan fuera de estos establecimientos, tales como la navegación y regulación aérea, al igual que las actividades locales de los consolidadores de carga. Los cinco mayores aeropuertos en Chile: Aeropuerto Internacional Arturo Merino Benítez, Aeropuerto Cerro Moreno, Aeropuerto El Tepual, Aeropuerto Diego Aracena y el Aeropuerto Internacional Carlos Ibáñez Del Campo; manejan casi 12 millones de pasajeros al año (**Figura 8.16**). En total, más de 15 millones de pasajeros llegan y salen de aeropuertos chilenos cada año¹⁴. Se manejan más de 262.000 toneladas de carga anualmente.

¹⁴Esta cifra es equivalente a los 10 millones de pasajeros utilizada en otra parte de este informe porque la cifra mayor también incluye aquellos pasajeros que llegan a los aeropuertos en vuelos locales, lo que en la práctica hace que éstos últimos se cuenten dos veces, al contrario de lo que ocurre con los pasajeros de vuelos internacionales con orígenes o destinos fuera de Chile.

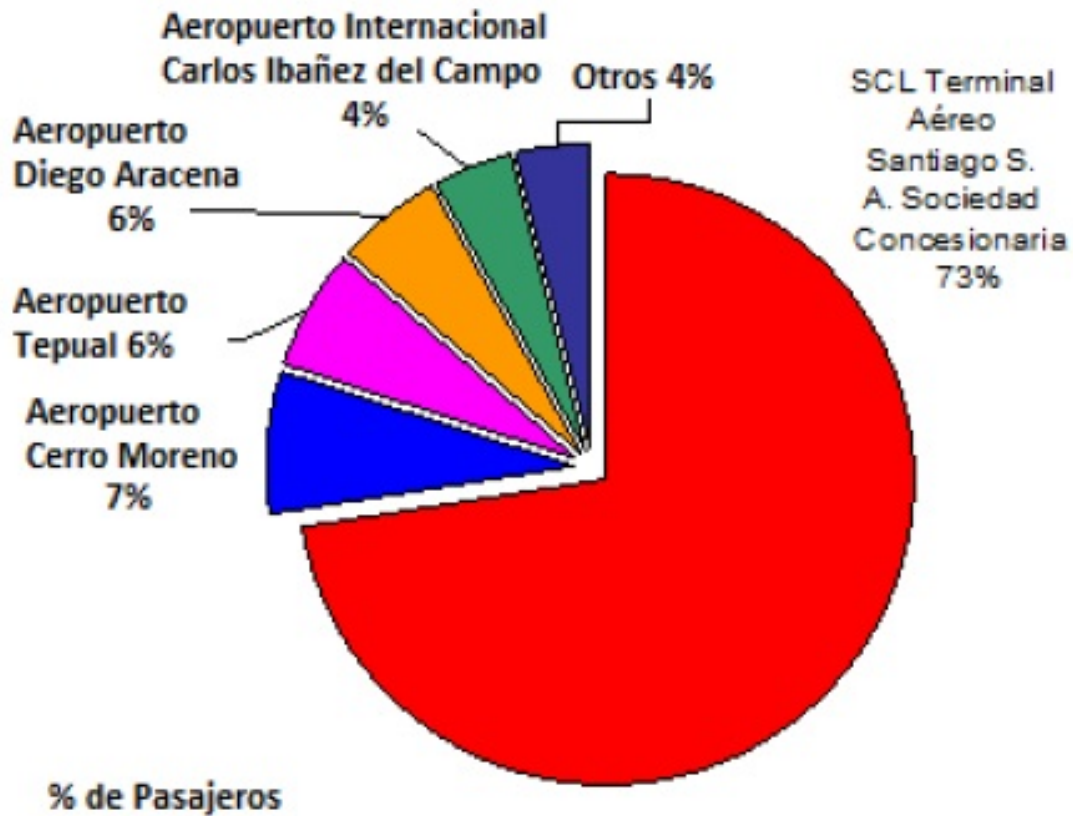


Figura 8.16: Distribución regional de los viajes de pasajeros chilenos

Los servicios aeronáuticos de tierra emplean 13.000 personas y sostienen, a través de su cadena de abastecimiento, otros 6.000 empleos. Estos empleos sostenidos indirectamente incluyen, por ejemplo, los obreros de la construcción que construyen o mantienen las dependencias aeroportuarias. Otros 7.000 empleos adicionales son sostenidos por el consumo de aquellas personas empleadas por la infraestructura de tierra de la industria aeronáutica y su cadena de abastecimiento. La infraestructura de tierra contribuye directamente 135 mil millones de pesos a la economía (PIB). Contribuye indirectamente otros 79 mil millones a través del producto que sostiene aguas debajo de su cadena de abastecimiento. Otros 97 mil millones de pesos provienen del consumo de aquellas personas que trabajan en los establecimientos de tierra y sus respectivas cadenas de abastecimiento.

El Aeropuerto Internacional Arturo Merino Benítez es el principal aeropuerto eje (hub) de Chile. En su calidad de aeropuerto hub para los efectos del tráfico de pasajeros internacionales, el Aeropuerto Internacional AMB está en posición de ofrecer a sus residentes y empresas locales un mejor acceso a más destinos, con una mayor frecuencia y tarifas más económicas; los beneficios de semejante red mejoran la conectividad del país, lo que a su vez puede alimentar los niveles generales de productividad de la economía y del PIB.

8.5.2.3. Inversiones y Productividad

Aparte de los efectos transformadores sobre la economía, en general, los servicios de transporte aéreo (las aerolíneas, los aeropuertos y los servicios complementarios, tales como el control del tráfico aéreo) constituyen un sector intensivo en capital que invierte fuertemente en sistemas de aeronaves y otra tecnología

de punta.

Tabla 8.1: Inversiones del sector aeronáutico

	Inversión como % de valor de producción
Servicios de Transporte Aéreo	CLP 43,5
Economía chilena	CLP 21,5

Tabla 8.2: Productividad laboral del sector aeronáutico

	Productividad (millón de VAB por empleado)
Servicios de Transporte Aéreo	CLP 50,8
Economía chilena	CLP 13,7

La **Tabla 8.1** informa respecto de la intensidad de inversión del sector aeronáutico, medida por su inversión en proporción al VAB. Las inversiones en servicios de transporte aéreo equivalen a 43,5 %, más del doble que el promedio de la economía. La **Tabla 8.2** entrega información de la productividad del sector aeronáutico comparado con el resto de la economía. Medido según el VAB por empleado, la productividad de los servicios de transporte aeronáutico (las aerolíneas y la infraestructura de tierra con exclusión de los servicios minoristas y de alimentación en los aeropuertos) se estima en 50,8 millones. Lo anterior es alrededor de 3,7 veces mayor que el promedio de productividad de la economía en su totalidad (13,7 millones de pesos). Este elevado nivel de productividad implica que si los recursos actualmente empleados en el sector aeronáutico fueren reasignados a otro sector de la economía, entonces, esto iría acompañado de una disminución del producto e ingreso general. Por ejemplo, si la productividad en el sector aeronáutico fuere igual a la productividad promedio de la economía en general, entonces, el nivel del PIB de Chile sería alrededor de 0,5 % inferior a lo que es (cerca de 404 mil millones de pesos, en precios actuales).

8.5.2.4. Efectos catalíticos

El transporte aéreo está en el corazón de los negocios y del turismo mundial. Debido a su velocidad, conveniencia y accesibilidad financiera, el transporte aéreo ha expandido las posibilidades de viajar por el mundo a los turistas y viajeros de negocios por igual, permitiendo que una creciente cantidad de personas puedan experimentar geografías, climas, culturas y mercados diversos.

El turismo, tanto para propósitos comerciales como de recreación, hace un importante aporte a la economía, con visitantes extranjeros que gastan algo más de 1,3 billones de pesos en la economía chilena cada año [de Aviación Civil \(2017\)](#). Casi 36 % de estos visitantes llegan por vía aérea (**Figura 8.17**); sin embargo, dado que los pasajeros que llegan por vía aérea gastan en promedio más en cada viaje que aquellos que viajan por otros medios de transporte, se estima que aquellos visitantes que llegaron por vía aérea gastaron 1,1 billones de pesos el año 2009¹⁵.

La industria de viajes y turismo contribuyó 3 billones de pesos directamente a la economía (PIB), 3,7 billones indirectamente a través del producto que sostiene aguas abajo de su cadena de abastecimiento, y otros 1,7 billones a través de los efectos inducidos de gastos de los consumidores. Si consideramos solamente la contribución relacionada con el gasto de los visitantes extranjeros que llegaron por vía aérea en bienes y servicios producidos en Chile, el sector contribuyó 549 mil millones directamente a la economía chilena, 462 mil millones indirectamente, y otros 262 mil millones a través de efectos inducidos.

¹⁵ Este cálculo está basado en datos proporcionados por el Ministerio de Economía, Fomento y Turismo, que subdivide los ingresos por gastos de visitantes según el origen del visitante aplicando supuestos respecto de la probable modalidad de transporte utilizado por visitantes provenientes de distintos puntos de origen.

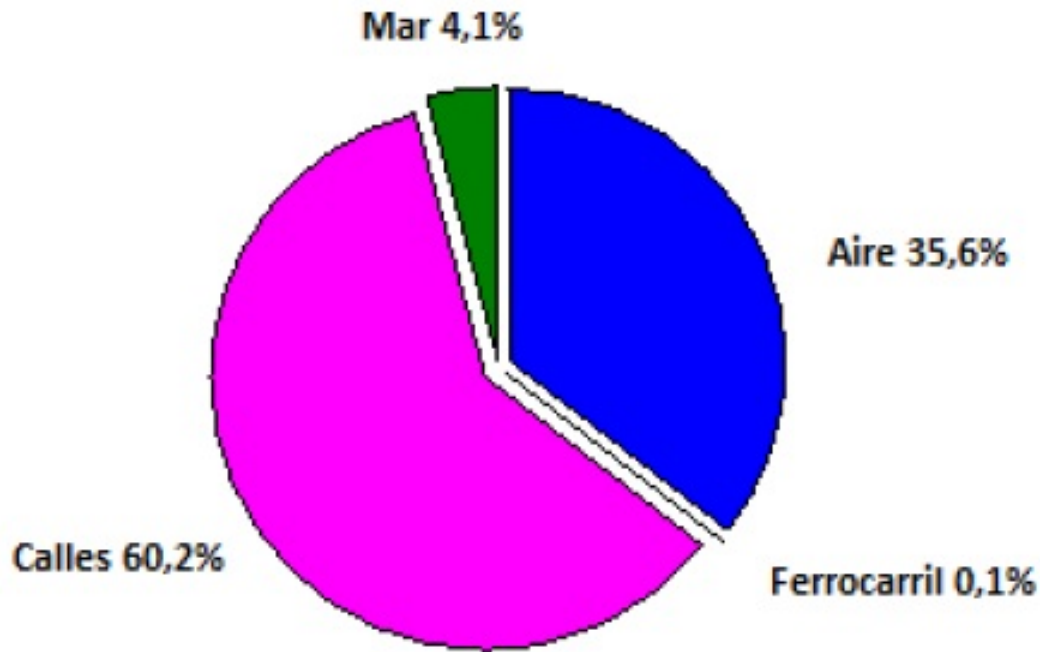


Figura 8.17: DLlegadas de visitantes extranjeros, según modo de transporte – año 2009

8.6. Evaluación económica Fuel Cell y APU

8.6.1. Análisis de Costos

Luego de revisar los principales parámetros económicos que definen la industria aérea, junto con sus actividades relacionandas corresponde evaluar ecómicamente el rendimiento del proyecto Fuel Cells respecto de una APU convencional.

Para este caso se utiliza el software RETScreen, el cual permite modelar y evaluar económicamente, en primer lugar, la aplicación de una Fuel Cell bajo los siguientes supuestos:

1. **Tecnología utilizada:** Celda Electroquímica
2. **Disponibilidad:** 95 % (ó 8322 horas), este supuesto se fundamenta en cuanto a cualquier falla que pueda presentar en su etapa de rodaje (inicio de la vida del componente).
3. **Capacidad de generación eléctrica:** 1000 [kW], para el modelo utilizado, B-787, la capacidad eléctrica requerida alcanza los 972 [kW].
4. **Fabricante:** Fuel Cell Technologies.
5. **Modelo:** Modular SOFC.

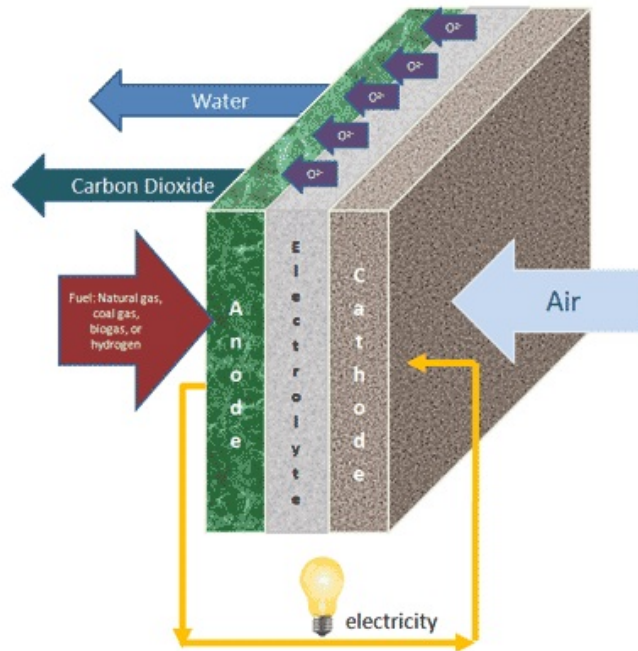


Figura 8.18: Modelo de FC utilizado para evaluación vía RETScreen

A continuación la **Tabla 8.3** muestra los principales costos del proyecto:

Tabla 8.3: Costos iniciales proyecto

Costos iniciales	Unidad	Cantidad	Costo Unitario	Monto
<i>Estudio de Factibilidad</i>	costo	1	\$ 20.000.000	\$ 20.000.000
<i>Desarrollo</i>	costo	0	-	-
<i>Ingeniería</i>	costo	1	\$ 50.000.000	\$ 50.000.000
<i>Celda Electroquímica</i>	kW	1000	\$67.600	\$67.600.000
<i>Línea de transmisión</i>	km	210	\$95.000	\$19.500.000
<i>Repuestos</i>	%	3 %	\$80.000.000	\$2.400.000
<i>Entrenamiento y puesta en servicio</i>	p-d	1	\$33.800.000	\$33.800.000
<i>Combustible Ahorrado</i>	crédito	1	\$100.000.000	(\$100.000.000)
<i>Contingencias</i>	%	5 %	\$93.750.000	\$4.687.500
Costos Iniciales Totales				\$ 98.437.500

Al tratarse de un nuevo proyecto, propuesto para ir en reemplazo de un componente mayor del avión se debe considerar el correspondiente estudio de factibilidad a distintos niveles de la compañía aérea, ya sean: ingeniería, motores, aeronavegabilidad, certificación, mantenimiento, entre otros.

Se considera el costo de desarrollo del proyecto, como aquel costo en que se requieran más recursos de otras áreas involucradas en la operación de mantenimiento u operación; de esta forma no se considera el mejoramiento de la tecnología hoy disponible para ser utilizada. Así entonces, la FC Modular en el mercado se asume como un activo más que se incorpora al pool de motores disponibles en la compañía. La ingeniería del proyecto, corresponde a la aplicación misma de la Fuel Cell en la aeronave, es decir, la modificación técnica y estructural que se debe realizar en un avión para soportar y utilizar este nuevo componente.

Considerando el sistema propio de la Fuel Cell, el costo de generar 1 [kW] para uso eléctrico se estima en aproximadamente CLP 67.600, esto considera, la utilización de hidrógeno como combustible (su almacenamiento al interior de la aeronave), transporte y pérdidas generadas; al utilizar un conjunto de celdas individuales (200 celdas) que forman la Fuel Cell completa que entrega los 1.000 [kW] necesarios para la operación y servicio. Las líneas de transmisión corresponden a la nueva configuración eléctrica que requiere la aeronave para operar con un componente distinto, y que puede ubicarse en distintos lugares del avión sin la necesidad de alojar en la parte posterior del mismo.

Finalmente, se toma en cuenta el costo de los repuestos necesarios para la operación diaria y su utilización en caso de falla del componente. El entrenamiento y puesta en servicio que involucra tanto a personal de mantenimiento y mecánicos, en adición a los diferentes cursos teóricos-prácticos que deben realizar para conocer en profundidad el funcionamiento y detección de potenciales fallas.

8.6.2. Análisis de Emisiones

Correponde ahora analizar el efecto en las emisiones que produce la incorporación de esta nueva tecnología. La **Tabla 8.4 - 8.5** resumen las toneladas de CO_2 que se dejan de emitir al medio ambiente debido al cambio de tecnología:

Tabla 8.4: Analisis de Emisiones

Tipo de Combustible	Mezcla de Combustible [%]	Consumo de Combustible [MWh]	Factor emisión de GEI [tCO_2 /MWh]	Emisiones GEI [tCO_2]
Hidrógeno	100 %	71.939	0,007	481,6

Tabla 8.5: Toneladas de CO_2 no emitidas al medio ambiente

Proyecto de Generación Eléctrica	Caso base emisiones de GEI [tCO_2]	Caso propuesto emisiones GEI [tCO_2]	Reducción anual bruta de emisiones GEI [tCO_2]
APU vs Fuel Cells	2.680,6	2.065	615,6
Reducción de emisiones GEI anual neta		2.065 tCO_2 es equivalente a 4.080 barr. de petróleo crudo no consumidos	

Es sencillo comprobar que la comparación entre el caso base de una APU normal (motor a combustión interna), y la incorporación de una nueva tecnología sustentada por el uso de Hidrógeno, disminuye considerablemente las toneladas de CO_2 emitidas al medio ambiente y con ello la contribución al efecto invernadero. Las 2.660 toneladas de CO_2 emitidas en el caso base disminuyen en un 77 % al migrar a una celda de combustible que utilice hidrógeno. En términos más simples de comprender, la reducción lograda es comparable a 4.082 barriles de petróleo crudo no consumidos ó 378 autos y camiones livianos no utilizados.

Lo anterior, verifica una vez más y con un sustento económico, la potencial ventaja de reemplazar la unidad

de poder auxiliar tradicional por una Fuel Cell. Es conveniente recordar una vez más, que la reacción electroquímica ocurrida al interior de las celdas obtiene como único producto H_2O y calor, capaz de ser re-utilizado en otras funciones al interior de la aeronave tales como: suministro para bebidas calientes, comida, baños, etc.

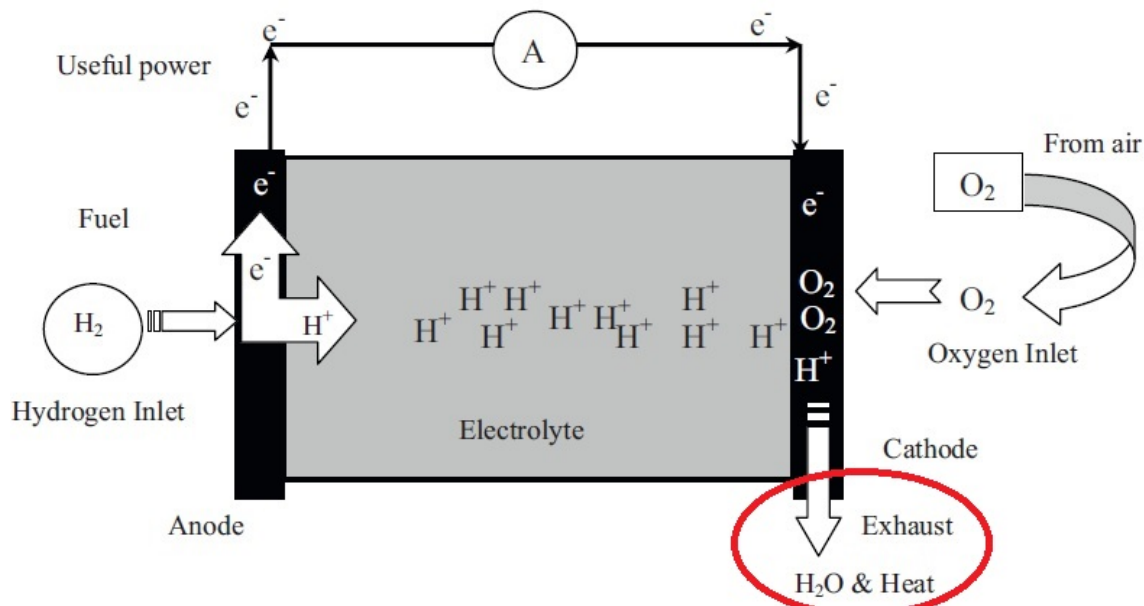


Figura 8.19: Reacción al interior de FC y productos

8.6.3. Análisis Financiero

Las **Tablas 8.6-8.7-8.8** muestran: los parámetros financieros considerados en el proyecto, resumen de costos/ahorros del proyecto y los flujos de caja anuales.

Tabla 8.6: Parámetros Financieros

Parámetros Financieros	
Tasa escalamiento de combustibles	3 %
Tasa de inflación	3 %
Tasa de descuento	10 %
Tiempo de vida del proyecto	10 años

Los parámetros financieros considerados tienen el siguiente fundamento:

- **Tasa escalamiento combustibles:** de acuerdo a los precios históricos que ha tenido, tanto el hidrógeno como el petróleo en sus forma refinada, el promedio de alza en sus precios corresponde a un 3 %.
- **Tasa de inflación:** considerando las políticas monetarias de nuestro país, y el desarrollo económico que ha tenido en los últimos años, es correcto considerar una tasa del 3 %.
- **Tasa de descuento:** utilizada para evaluar el proyecto, permite, en términos simples determinar el valor actual de un capital futuro. Dado que es un proyecto cuya base es un cambio de tecnología, la literatura propone varias técnicas financieras a la hora de escoger una tasa adecuada; no obstante, todas coinciden en que para la evaluación de este tipo de proyectos la tasa normalmente puede considerarse entre un rango del 10 % y 15 % de acuerdo al tipo de perfil-riesgo que tenga el inversionista. Para el presenta caso, se utilizará una tasa igual al 10 % anual.

- **Tiempo de vida del proyecto:** el tiempo de vida del proyecto tiene un fundamento económico ligado al costo que tiene el mantenimiento de un avión antiguo, ya que entre más edad tenga un avión más costosa es su reparación y más tiempo debe permanecer en tierra para asegurar su aeronavegabilidad. Dado que normalmente las aerolíneas renuevan su flota cada 10 años, es correcto asumir tal periodo de tiempo como la duración del proyecto Fuel Cell.

La **Tabla 8.7**, muestra un resumen de los principales costos en que incurre el proyecto; considera:

- **Estudio de Factibilidad:** corresponde al estudio que determina en un criterio más amplio la conveniencia del proyecto y sus principales condiciones para que sea exitoso. Así, las áreas que se ven involucradas: Mantenimiento de línea, Motores, Centro de control operaciones (CCO), Ingeniería, Talleres, entre otras; han de revisar el impacto que causa (y las ventajas al mismo tiempo) reemplazar la unidad de poder auxiliar. Se estima un estudio más técnico que no consuma más que recursos humanos e investigación.
- **Ingeniería:** esta etapa es más compleja, ya que determina qué, cuánto y cómo es utilizada esta nueva tecnología (Fuel Cells) se completa en forma detallada el modelo a invertir y que será instalado en los aviones de la flota. Se utiliza (o modifica) una aeronave como modelo para estudiar la operación y comportamiento bajo condiciones de vuelo.
- **Sistema eléctrico de potencia:** considera el costo de todas las celdas de combustibles individuales requeridas para cumplir con los requerimientos y necesidad eléctrica a bordo de la aeronave, junto con las modificaciones de cableado interno que deben realizarse para soportar en donde sea requerido la instalación de estas nuevas celdas o baterías (en su conjunto).
- **Balance de Sistema y misceláneos:** considerando la entrada en operación de las Fuel Cells, el balance de sistema considera un 3 % de presupuesto para repuestos, además del entrenamiento del personal (mecánicos y técnicos) que consiste normalmente en cursos teóricos y prácticos que ayudan a comprender el modo de funcionamiento y detección de fallas.
- **Operación y Mantenimiento:** en esta parte de los costos sólo se considera el efecto de ahorro en cuanto al mantenimiento programado anual que requiere la Fuel Cell. De acuerdo a lo revisado en capítulos anteriores, el componente crítico de la celda de combustible es su membrana electrolítica (permite el flujo del combustible y la reacción misma para transformar el hidrógeno y el oxígeno en electricidad útil); esta membrana se ha estimado que requerirá un mantenimiento (posible reemplazo) a partir de 20.000 horas de utilización (haciendo un simil en cuanto al uso del APU tradicional, 20.000 horas son equivalentes a 8-9 años de operación).
- **Costo Combustible:** este costo considera el almacenamiento de los tanques de hidrógeno requeridos para abastecer la Fuel Cell, su mantenimiento periódico y el propio costo que hoy tiene en el mercado.

Tabla 8.7: Resumen de Costos/Ahorros del Proyecto

Resumen de Costos/Ahorros del Proyecto	
<i>Costos Iniciales</i>	
<i>Estudio de Factibilidad</i>	\$20.000.000
<i>Ingeniería</i>	\$50.000.000
<i>Sistema eléctrico de potencia</i>	\$87.550.000
<i>Balance del sistema y misc.</i>	\$-59.112.500
Costos Iniciales Totales	\$ 98.437.500
<i>Costos anuales/pagos de deuda</i>	
Operación y Mantenimiento	\$-30.000.000
Costo de combustible	\$10.141.884
Costos Anuales Totales	\$ -19.858.116

Finalmente la **Tabla 8.8** muestra la evolución que tendrán los flujos del dinero en el tiempo. Bajo los parámetros definidos al inicio, se estima que al quinto año de operación del proyecto se iniciará la recuperación

del capital invertido. Si bien al final de la vida del proyecto se habrán acumulado 136 millones, compensa al menos la inversión realizada al inicio y los costos que se generan durante la operación del proyecto son menores a los de mantener la situación actual, ya que anualmente se generarán ahorros cercanos a los 20 millones. En la **Figura 8.20** se muestra gráficamente la evolución en el tiempo de los flujos de caja acumulados.

Tabla 8.8: Flujo de Caja anual del proyecto

Flujo de Caja Anuales			
Año	Antes impuestos [\$]	Después impuestos [\$]	Acumulado [\$]
0	-98.437.500	-98.437.500	-98.437.500
1	20.453.859	20.453.859	-77.983.641
2	21.067.475	21.067.475	-56.916.166
3	21.699.499	21.699.499	-35.216.666
4	22.350.484	22.350.484	-12.866.182
5	23.020.999	23.020.999	10.154.817
6	23.711.629	23.711.629	33.866.446
7	24.422.978	24.422.978	58.289.424
8	25.155.667	25.155.667	83.445.091
9	25.910.337	25.910.337	109.355.428
10	26.687.647	26.687.647	136.043.075

Gráfico de flujo de caja acumulado

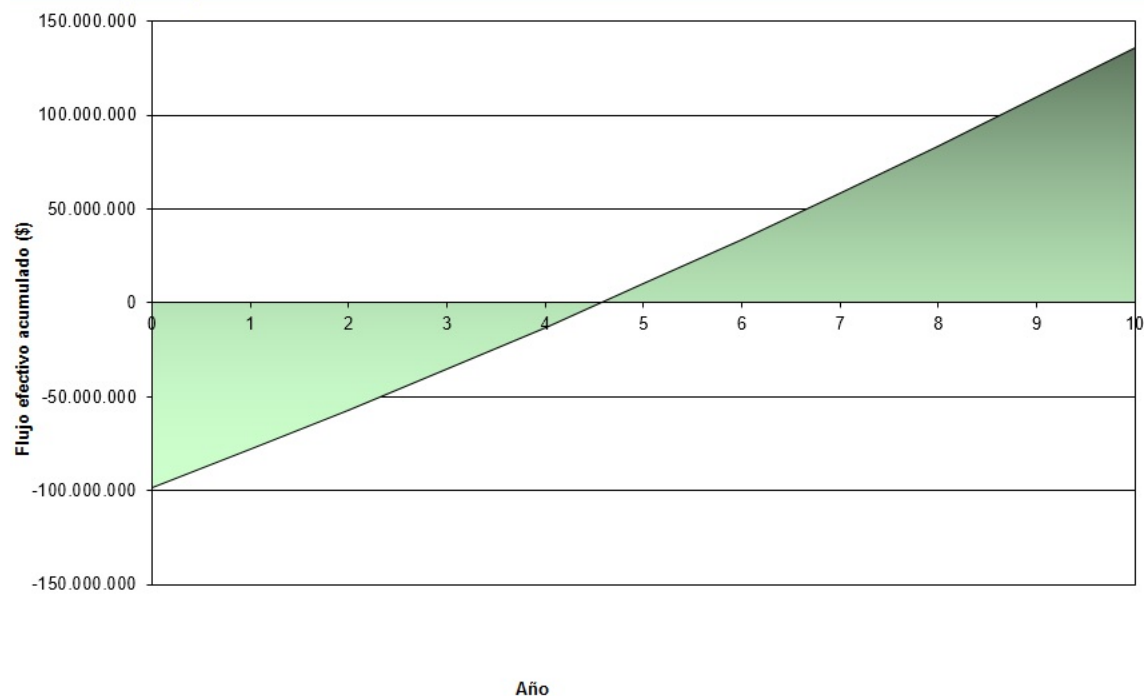


Figura 8.20: Gráfico evolución flujo caja acumulado proyecto Fuel Cells

Finalmente se debe analizar los parámetros obtenidos que afectan directamente la variabilidad financiera del proyecto, la **Tabla 8.9** resume los principales indicadores:

Tabla 8.9: Variabilidad Financiera del proyecto

Variabilidad Financiera	
<i>TIR antes de impuestos - capital</i>	18,8 %
<i>Pago simple de retorno del capital</i>	5 años
<i>Valor Presente Neto</i>	\$42.361.625
<i>Ahorros anuales en el ciclo de vida</i>	\$6.894.159

La Tasa Interna de Retorno (TIR) obtenido, alcanza el 18,8 %, es importante recordar que esta tasa es un indicador relevante a la hora de comprobar la rentabilidad de un proyecto de inversión. Entrega una medida relativa del rendimiento, dado que la tasa de descuento es menor a la TIR obtenida bajo los criterios financieros, el proyecto se puede considerar como rentable en el periodo considerado para el análisis.

Por otra parte, el retorno del capital se inicia al quinto año, como ya se había revisado en párrafos anteriores. El VAN del proyecto resulta positivo, lo cual nuevamente muestra la conveniencia de llevar a cabo la inversión en esta nueva tecnología, entendiendo que el VAN es resultado de el beneficio neto actualizado (durante el horizonte de evaluación) menos la inversión realizada al inicio de la vida del proyecto, se puede concluir (con el resultado obtenido) que: se cumple con la tasa de descuento propuesta para la evaluación (10 %) y al mismo tiempo se genera una ganancia o beneficio adicional por la ejecución.

8.6.4. Análisis de Sensibilidad

Se realiza el análisis considerando como variable de sensibilización la TIR del proyecto y estableciendo dos matrices en las cuales se varían los parámetros *Costos Iniciales* con *Costo combustible del caso propuesto*, en la primera de ellas, y *Costos iniciales* con *Costos Operación y Mantenimiento* en la segunda. Los resultados de lo anterior se presentan a continuación:

Tabla 8.10: Sensibilización TIR con Costo Combustible y Costos Iniciales

Variación costos Combustible / Iniciales	-10 %	-5 %	0 %	5 %	10 %
-10 %	23.2 %	22.5 %	21.8 %	21.0 %	20.3 %
-5 %	21.6 %	20.9 %	20.2 %	19.5 %	18.8 %
0 %	20.2 %	19.5 %	18.8 %	18.1 %	17.4 %
5 %	18.8 %	18.1 %	17.5 %	16.8 %	16.1 %
10 %	17.6 %	16.9 %	16.3 %	15.6 %	14.9 %

Tabla 8.11: Sensibilización TIR con Costo Operación/Mantenimiento y Costos Iniciales

Variación costos Oper. y Manten./Iniciales	-10 %	-5 %	0 %	5 %	10 %
-10 %	17.2 %	19.5 %	21.8 %	23.9 %	26.0 %
-5 %	15.8 %	18.0 %	20.2 %	22.3 %	24.3 %
0 %	14.5 %	16.7 %	18.8 %	20.8 %	22.8 %
5 %	13.4 %	15.4 %	17.5 %	19.4 %	21.4 %
10 %	12.3 %	14.3 %	16.3 %	18.2 %	20.0 %

Se aprecia de la **Tabla 8.10** que la rentabilidad del proyecto es altamente sensible ante variaciones en el nivel de inversión inicial, lo anterior se aprecia claramente en un escenario sin variación en el parámetro de

costo combustibles en el cual la TIR varía en rangos que van desde el 16.3 % (+ 10.0 % de inversión inicial) hasta el 21.8 % (- 10.0 % de inversión inicial). Ahora bien, dentro de la inversión inicial claramente el factor crítico corresponde al costo de las celdas de combustible, las cuales representan un 88 % del total, por lo anterior, gran parte de los esfuerzos de gestión del proyecto deben enfocarse en optimizar la planificación y ejecución de las actividades relacionadas a lo anterior (áreas involucradas) y definir controles exhaustivos para evitar variaciones no deseadas. Considerando que la tasa de descuento del proyecto es del 10 %, cualquier variación significativa en la partida celdas de combustible podría significar que el proyecto quede bajo la tasa de descuento establecida.

Por otra parte, se aprecia que la TIR del proyecto de igual forma que con los costos de combustible se presenta muy sensible ante variaciones en el costo de operación/mantenimiento, sin embargo aquí entra un factor no considerado hasta el momento que es la negociación de un contrato de mantenimiento con el fabricante y proveedor de las Fuel Cells. Este simple hecho puede variar considerablemente los costos, es complejo de considerar en el análisis ya que dependerá directamente del equipo de contratos obtener el mejor beneficio para la aerolínea. No obstante, a pesar de ser un costo que ejerce influencia en la TIR puede ser manejado de una forma más acotada y no susceptible a factores macro económicos.

8.6.5. Análisis de Riesgo

El análisis de riesgo se realiza utilizando una simulación de MonteCarlo que incluye 500 posibles combinaciones de variables de entrada que resultan en 500 valores de TIR probables. La idea central en este punto radica en identificar aquellos parámetros que generan mayor impacto en el indicador y tomar las medidas necesarias para reducir la incertidumbre asociada al mismo.

Para la aplicación del modelo se consideraron como parámetros *Costos iniciales*, *Operación y mantenimiento* y *Costo combustible - caso propuesto*. Se considera un rango de variación de $\pm 5\%$ y se establece un nivel de riesgo del 5 %, este último dato se utiliza para establecer un intervalo de confianza dentro del cual se espera que el indicador financiero, en este caso la TIR, varíe; el nivel de riesgo, representa la probabilidad de que el indicador financiero caiga fuera de este intervalo de confianza. Al aplicar el análisis descrito se ha obtenido un intervalo de confianza que va desde un 16.7 % hasta un 20.8 %. Gráficamente la distribución de la TIR de acuerdo a un histograma de frecuencias queda representada de la siguiente forma:

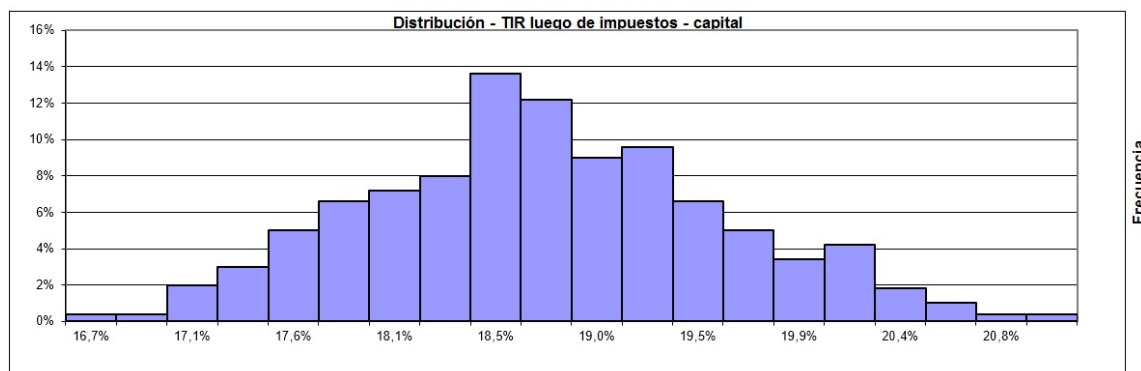


Figura 8.21: Histograma de frecuencias TIR

Por otra parte se presenta un gráfico de impacto (**Figura 8.22**), a través de esta herramienta es posible apreciar la contribución relativa de la incertidumbre de cada parámetro clave a la variabilidad del indicador financiero seleccionado, en este caso la TIR. El eje X no tiene unidades, sino que entrega una indicación relativa de la fuerza de la contribución de cada parámetro, es decir contra más larga la barra, mayor será el impacto del parámetro de entrada en la variabilidad de la TIR. Los parámetros son clasificados automáticamente por su nivel de impacto y su posición en el eje Y está dada por el peso de su contribución. Las variables

seleccionadas por el modelo son las mismas seleccionadas previamente para el análisis de sensibilidad. Finalmente cabe destacar que la dirección de la barra indica la relación entre el parámetro y el indicador financiero, existe una relación positiva entre un parámetro y la variable cuando un aumento en el valor de ese parámetro significa un aumento en el valor del indicador financiero.

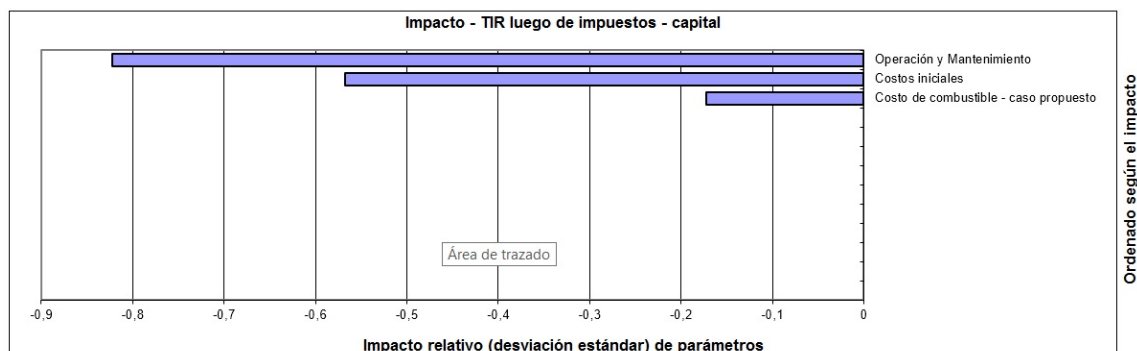


Figura 8.22: Gráfico de Impacto

8.7. Evaluación económica APU

Debido a que las actuales APUs en servicio no se reemplazan por nuevas unidades, la evaluación a considerar en esta sección es el presupuesto de mantenimiento que se considera año a año; junto con la comparación (costos) de la cantidad de unidades que se reparan programada y no programadamente, esta información será útil para comparar los potenciales ahorros ya identificados con las Fuel Cells.

Tabla 8.12: Presupuesto y Gasto efectivo anual, reparaciones APU

Año	Presupuesto	Gasto Anual
2015	\$375.000.000	\$425.000.000
2016	\$525.000.000	\$500.000.000
2017	\$612.000.000	\$487.500.000

Tabla 8.13: Cantidad de remociones Programadas y No Programadas APU

Año	Remociones Presupuesto	Remociones Programadas	Remociones No Programadas
2015	30	1	33
2016	42	19	21
2017	49	26	13

La **Tabla 8.12** representa el presupuesto considerado anualmente para reparaciones de APU debido a: mantenimiento programado o falla no prevista. Como se puede notar, el presupuesto considera entre 30 y 50 remociones por año esto es equivalente a 380 - 610 millones; no obstante el gasto efectivo puede ser mayor o menor, no existe una causa justificable, es relativo al comportamiento del elemento mecánico y las condiciones de operación (junto con los factores humanos que intervienen).

De igual forma, independiente de cuánto sea el presupuesto y gasto efectivo los números avalan la posibilidad de iniciar un cambio tecnológico y considerar a las Fuel Cells como una alternativa válida y sustentable en el tiempo que proporcione las mismas funciones que hoy entrega una APU. Así mismo, la

capacidad de generación eléctrica y neumática requerida para soportar la operación de cualquier aernave comercial.



9 | Conclusiones

Una pregunta fue planteada al inicio: ¿Son las Fuel Cells la puerta a un nuevo futuro en la aviación comercial?. Al finalizar la investigación realizada en este trabajo, ha sido posible comprender que si es posible dado el alcance que tendrán en un futuro próximo, tanto por las eficiencias energéticas que presentan como por los beneficios que producen no sólo desde una perspectiva económica o de confiabilidad en el mantenimiento sino también por su capacidad de mejorar el medio ambiente, reduciendo al mínimo emisiones nocivas en la atmósfera que generan directamente efectos en el calentamiento global del planeta.

El desarrollo tecnológico que ha tenido el Hidrógeno (como fuente de combustible) desde el siglo XIX hasta nuestros días, permite seguir construyendo los pilares que sostendrán la producción futura de energía limpia y renovable. Ya es un hecho que las fuentes de petróleo disminuirán durante los próximos 20 años, y al 2050 se deberá contar con fuentes alternativas para abastecer la demanda mundial. En particular la aviación comercial la cual ha crecido de la mano con el desarrollo del petróleo como fuente principal de combustible deberá evolucionar y buscar apoyo en el Hidrógeno como fuente de energía. La tendencia tecnológica de los aviones es y serán diseños más eléctricos (MEA, More Electric Aircraft) cuya demanda energética interna requerida para soportar los comandos de vuelo, servicios de comida y entretenimiento a bordo superarán la capacidad que tienen los motores principales y el APU. Los grandes fabricantes de aeronaves ya lo saben, y están desarrollando proyectos y modelos que sean capaces de incorporar esta nueva tecnología, ya se han probado baterías de Hidrógeno en pequeños aviones prototipos que han cruzado distancias en ciudades de Europa.

Se ha demostrado que el beneficio de las Fuel Cells apunta a tres conceptos importantes:

1. Ser una alternativa válida en la generación/producción de energía eléctrica a partir de una reacción electro-química que utiliza Hidrógeno y Oxígeno, y cuyo único producto de la reacción es agua (vapor de agua), lo cual transforma por completo la concepción que hoy se tiene al respecto de todos los motores a combustión interna utilizados en la industria aérea (y del transporte de pasajeros en general) como fuente de generación para energía al interior de una aeronave comercial.
2. La eficiencia que logran las Fuel Cells en cuanto al uso de recursos energéticos (Hidrógeno como combustible), lo que permite generar una eficiencia en el ciclo sobre un 40 %, disminución en el peso de la batería (peso total ~100-110 [kg], en el conjunto de Fuel Cells) mitad del peso que hoy tiene una APU normal, y finalmente la ventaja de ubicar en lugares dónde sea necesario de acuerdo a la demanda energética paquetes o conjuntos de FC, reduciendo así las pérdidas por transporte a lo largo del avión (hoy la APU se ubica en la cola del avión, por lo cual las pérdidas asociadas al transporte son significativas) que mejoran la eficiencia y hacen que se requiera más energía para cumplir con las necesidades propias de la aeronave.
3. El desarrollo que se ha generado entorno al H_2 es la evidencia más clara de que el mundo busca una nueva forma de abastecer su demanda energética presente y futura, los países en donde hoy ya se aplican y utilizan las Fuel Cells (ya sea en industrias de manufactura o transporte) han de ser los pilares para continuar con este crecimiento y fomentar su utilización en los más variados campos de la energía.

La tendencia de la industria aérea comercial, seguirá apuntando a la reducción de sus costos y maximización en la eficiencia de sus operaciones. Esto lo entienden los principales fabricantes de aeronaves, motores y APU (y en general de todo componente mayor de un avión) por lo que lentamente se irá rompiendo la inercia

de reemplazar componentes pesados y que requieren un mantenimiento constante y programado en el tiempo (a la vez altamente costoso) por nuevas tecnologías más limpias, independientes y eficientes, capaces de entregar y satisfacer de mejor forma y con menos impacto al medio los requerimientos que hoy demandan en cada vuelo los pasajeros de una aerolínea.

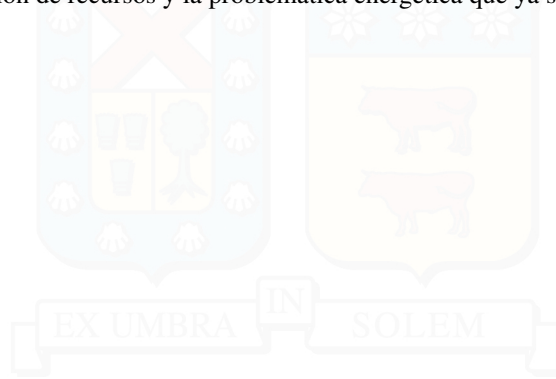
Buscar la mejor opción entre las Fuel Cells existentes no es una tarea sencilla, se deben cumplir con los estándares de seguridad y certificación que hoy exige la autoridad aeronáutica respectiva (sea en Estados Unidos o Europa); no obstante, la teoría de las Fuel Cells indica a las SOFC (Solid Oxide Fuel Cells) como aquella celda de combustible que mejor se adapta y ayuda a cumplir con los requerimientos de operación y de demanda energética a bordo de un avión comercial. De esta forma el dimensionamiento, tanto en peso como eficiencia, de una SOFC para abastecer a un Boeing 787 sigue lo ya estudiado por Whyatt y Chick (Whyatt and Chick, 2012) de lo cual es posible concluir lo siguiente: A medida que se incrementa la presión de funcionamiento, el rendimiento disminuye debido a una reducción en la cantidad de potencia obtenida del compresor/expansor. Por otro lado, el impacto del peso disminuye con una mayor presión debido a una reducción en el peso de la Fuel Cell. A presiones de 1,5 atmósferas o menos, el impacto del peso aumenta a medida que crece el voltaje debido al mayor tamaño de la Fuel Cell. Sin embargo, a presiones más altas el peso disminuye a medida que aumenta el voltaje, alcanzando un mínimo a una tensión de célula que aumenta con la presión creciente. Esto ocurre porque a alta presión y baja tensión, el compresor debe ser accionado eléctricamente en lugar de producir potencia. Esto a su vez requiere que se produzca una potencia bruta mayor que requiera una Fuel Cell más grande. El mínimo en la curva de impacto de peso se produce cerca del punto donde la potencia del expansor del compresor tiene un pequeño equilibrio positivo de tal manera que sólo se produce una pequeña cantidad de potencia, pero no se requiere entrada de potencia eléctrica.

La evaluación económica realizada en la investigación, considera varios supuestos necesarios para analizar la conveniencia del cambio tecnológico: se utiliza una tasa de descuento igual a 10 % con un horizonte de evaluación de 10 años (tiempo normal en que se renueva una flota de aviones). Los resultados obtenidos, fueron consistentes en avalar la posibilidad de modificar el APU actual por celdas de combustible, la TIR obtenida por el proyecto alcanza un 18,8 % (mayor a la tasa de descuento), este resultado financieramente es una primera señal en que a largo plazo resulta positivo invertir en esta tecnología. Por otra parte, el VAN alcanzado bajo los costos establecidos para el proyecto resulta mayor que cero, de esta forma una vez más se obtiene otro parámetro financiero que afirma el potencial beneficio y ganancia de adoptar el uso de las Fuel Cells.

Entendiendo que es posible, o viable económicamente el proyecto, se sensibiliza la TIR de acuerdo a los principales costos del proyecto: Costos iniciales, Costo Combustible y Costo de Operación y Mantenimiento. Los resultados conseguidos en el análisis muestran la susceptibilidad en los beneficios y un punto de atención en cuanto a la ejecución del proyecto para evitar gastos excesivos o recursos mal utilizados que finalmente merman la recuperación del capital en el tiempo proyectado (4 años). Finalmente se estima que los ahorros anuales alcanzarán cerca de los 20 millones anuales, costo equivalente que representa una reparación de APU tradicional.

Sin duda, los beneficios de las Fuel Cells para la aviación comercial son evidentes y están tecnológicamente en línea con el futuro que se espera para la aeronáutica mundial: aviones cada vez más eléctricos, silenciosos y menos contaminantes, con mayor alcance y más seguros para todos los pasajeros. Sin embargo, se debe entender que aún hay un largo camino que recorrer, las barreras comerciales, técnicas y operacionales son grandes; aún el petróleo y los motores tradicionales (a combustión interna) tienen el dominio total de toda la industria, es posible que pase una década antes de ver aeronaves comerciales que incorporen Fuel Cells en sus sistemas, pero el desarrollo de esta tecnología no se detendrá. El marco teórico para continuar con el estudio de las células de combustible es vasto y existen todos los medios para explorar nuevas opciones de cómo utilizar el Hidrógeno y obtener los mejores resultados en la utilización y transformación de energía eléctrica. Hoy los costos, pueden no retribuir la inversión requerida para implementar a una escala mayor (flota completa de aviones) el uso de las Fuel Cells en el transporte aéreo, pero como se ha revisado en capítulos de esta investigación tanto el diseño y peso requerido son teóricamente aceptables para los grandes aviones que predominan en la aviación mundial.

Nuestro país, aún con una aviación en pleno desarrollo puede convertirse en un buen candidato a probar esta nueva tecnología, tal como lo hacen otros países, en aviones prototipos y lograr así un crecimiento que perdió hace más de 30 años. ENAER (Empresa Nacional Aeronáutica) actualmente sólo se dedica a la manufactura de los aviones T-35 Pillán modelos con que se entrenan los pilotos de la FACH, sin embargo no se dedica a la investigación y desarrollo de nuevas tecnologías. Involucrar a los actores de la aviación nacional (Operadores y Autoridades Aeronáuticas) puede ser el punto de partida para llevar un paso adelante tanto la investigación nacional como progreso en materia de aviación; todos los esfuerzos y políticas deben dirigirse hacia la optimización de recursos y la problemática energética que ya se está enfrentando.





Bibliografía

- Abdel-Fadil, R., Eid, A., and Abdel-Salam, M. (2013). Electrical distribution power systems of modern civil aircrafts. In *2nd International Conference on Energy Systems and Technologies*, pages 201–210. 4.6
- Agnolucci, P. and McDowall, W. (2007). Technological change in niches: auxiliary power units and the hydrogen economy. *Technological Forecasting and Social Change*, 74(8):1394–1410. 2.1
- Arata, A. (2009). *Ingeniería y gestión de la confiabilidad operacional en plantas industriales. Aplicación de la Plataforma R-MES*. RIL editores. 4.6.4
- Bacon, F. (1969). Fuel cells, past, present and future. *Electrochimica Acta*, 14(7):569–585. 5.1.2
- Baker, B. S. and Maru, H. C. (1997). Carbonate fuel cells—a decade of progress. In *191st Meeting of the Electrochemical Society, Fourth International Symposium on Carbonate Fuel Cell Technology, Montreal, Canada*, pages 14–27. 5.3.5
- Ballard (2017). Ballard power system, inc. <http://ballard.com/fuel-cell-solutions/fuel-cell-power-products/motive-modules>. 5.3.1
- Baratto, F., Diwekar, U. M., and Manca, D. (2005). Impacts assessment and trade-offs of fuel cell-based auxiliary power units: Part i: system performance and cost modeling. *Journal of power sources*, 139(1):205–213. 4.3
- Barbir, F. and Gomez, T. (1997). Efficiency and economics of proton exchange membrane (pem) fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 22(10-11):1027–1037. 6.1.1, 6.1.1, 6.1.2
- Barton, S. A. C., Murach, B. L., Fuller, T. F., and West, A. C. (1998). A methanol sensor for portable direct methanol fuel cells. *Journal of the electrochemical society*, 145(11):3783–3788. 5.3.2
- Bennaceur, K., Clark, B., Orr Jr, F. M., Ramakrishnan, T., Roulet, C., and Stout, E. (2005). Hydrogen: a future energy carrier? *Gas*, 25(20.1):15–3. 1
- Bernardi, D. M. and Verbrugge, M. W. (1992). A mathematical model of the solid-polymer-electrolyte fuel cell. *Journal of the Electrochemical Society*, 139(9):2477–2491. 5.2.1
- Berry, G. D., Pasternak, A. D., Rambach, G. D., Smith, J. R., and Schock, R. N. (1996). Hydrogen as a future transportation fuel. *Energy*, 21(4):289–303. 1
- Bossel, U. (2000). The birth of the fuel cell. In *European Fuel Cell Forum: Oberrohrdorf*. 5.1.1
- BRITTON, E., COOPER, A., and TINSLEY, D. (2005). The economic catalytic effects of air transport in europe. *PROCEEDINGS OF ETC 2005, STRASBOURG, FRANCE 18-20 SEPTEMBER 2005*. 8.5.1
- Brodrick, C.-J., Lipman, T. E., Farshchi, M., Lutsey, N. P., Dwyer, H. A., Sperling, D., Gouse Iii, S. W., Harris, D. B., and King, F. G. (2002). Evaluation of fuel cell auxiliary power units for heavy-duty diesel trucks. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 7(4):303–315. 4.3, 6.1

- Brown, H. S., Vergragt, P., Green, K., and Berchicci, L. (2003). Learning for sustainability transition through bounded socio-technical experiments in personal mobility. *Technology Analysis & Strategic Management*, 15(3):291–315. 4.2
- Carrette, L., Friedrich, K., and Stimming, U. (2001). Fuel cells—fundamentals and applications. *Fuel cells*, 1(1):5–39. 5.3.2, 5.3.4
- Commission, E.-E. et al. (2003). Hydrogen energy and fuel cells—a vision of our future. *Final report of the High Level Group. EUR*, 20719. 2.1
- Dahl, G. and Suttrop, F. (2001). Combustion chamber and emissions, the micromix hydrogen combustor technology. *CRYOPLANE Project, Task Technical Report*, (4.4-5A). 6.2.2
- de Aviación Civil, J. (2017). Anuario de transporte aéreo 2016. <http://www.jac.gob.cl/el-anuario-de-transporte-aereo/>. 8.5.1, 8.5.2.4
- De Geeter, E., Mangan, M., Spaepen, S., Stinissen, W., and Vennekens, G. (1999). Alkaline fuel cells for road traction. *Journal of power sources*, 80(1):207–212. 5.3.3
- de Lucas Martínez, A. (2007). *Termotecnia básica para ingenieros químicos: procesos termodinámicos y máquinas*. Number 51. Univ de Castilla La Mancha. 5.3.1
- EIA (2017). Annual energy outlook 2017. <https://www.eia.gov/outlooks/aeo/>. 1, 2.1
- Elam, C. C., Padró, C. E. G., Sandrock, G., Luzzi, A., Lindblad, P., and Hagen, E. F. (2003). Realizing the hydrogen future: the international energy agency's efforts to advance hydrogen energy technologies. *International Journal of Hydrogen Energy*, 28(6):601–607. 6.1.4
- Elitzur, S., Rosenband, V., and Gany, A. (2017). On-board hydrogen production for auxiliary power in passenger aircraft. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(19):14003–14009. 4.4
- Elzen, B., Hoogma, R., and Kemp, R. (2003). Managing the transition to sustainable transport through strategic niche management. In *D Sperling, K Kurani, (a cura di), Transportation, Energy and Environmental Policy. Managing Transitions-VIII Biennial Asilomar Conference, Transportation Research Board of the National Academies, Washington DC*, pages 175–203. 4.2
- Fleming, G. and Ziegler, U. (2013). Environmental trends in aviation to 2050. *ICAO Environmental report 2013: aviation and climate change*, pages 22–27. 1
- Flightpath, A. (2011). 2050-europe's vision for aviation. *Advisory Council for Aeronautics Research in Europe*. 1
- Geels, F. W. (2002). Technological transitions as evolutionary reconfiguration processes: a multi-level perspective and a case-study. *Research policy*, 31(8):1257–1274. 4.1
- Gottesfeld, S. and Zawodzinski, T. A. (1997). Polymer electrolyte fuel cells. *Advances in electrochemical science and engineering*, 5:195–302. 5.3.1
- Herbert, G. J., Iniyar, S., Sreevalsan, E., and Rajapandian, S. (2007). A review of wind energy technologies. *Renewable and sustainable energy Reviews*, 11(6):1117–1145. 6.2
- Hummels, D. (2007). Transportation costs and international trade in the second era of globalization. *The Journal of Economic Perspectives*, 21(3):131–154. 8.5.1
- IATA (2016). Outlook for airline markets and industry performance. <https://www.iata.org/whatwedo/Documents/economics/Economic-Performance-of-the-Airline-Industry-mid-year-2016-forecast-slides.pdf>. 2.1

- Ihara, M., Yokoyama, C., Abudula, A., Kato, R., Komiyama, H., and Yamada, K. (1999). Effect of the steam-methane ratio on reactions occurring on ni/yttria-stabilized zirconia cermet anodes used in solid-oxide fuel cells. *Journal of the Electrochemical Society*, 146(7):2481–2487. 5.3.6
- Isaksen, I. S., Berntsen, T. K., and Wang, W.-C. (2001). Nox emissions from aircraft: Its impact on the global distribution of ch₄ and o₃ and on radiative forcing. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 12(1):63–78. 6.2.1, 6.2.2
- Klug, H. (2001). Global warming potential data for simplified sensitivity analysis and optimisation. Technical report, Task Technical Report 1.1-5, CRYOPLANE Project. 6.2.2
- Klug, H., Bakan, S., and Gayler, V. (1996). Cryoplane—quantitative comparison of contribution to anthropogenic greenhouse effect of liquid hydrogen aircraft versus conventional kerosene aircraft. *European Geophysical Society, XXI General Assembly, The Hague, The Netherlands*, page 22. 6.2.2
- Kordesch, K., Hacker, V., Gsellmann, J., Cifrain, M., Faleschini, G., Enzinger, P., Fankhauser, R., Ortner, M., Muhr, M., and Aronson, R. R. (2000). Alkaline fuel cells applications. *Journal of Power Sources*, 86(1):162–165. 5.3.3
- Lefebvre, A. H. (1998). *Gas turbine combustion*. CRC press. 6.2.1
- Lister, D., Penner, J. E., Griggs, D. J., Houghton, J., Albritton, D., Begin, J., Bekebrede, G., Crayston, J., Davidson, O., Derwent, R., et al. (1999). *Aviation and the Global Atmosphere-Summary for Policymakers*. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 5.1.1
- Lovins, A. and Kyle Datta, E. (2005). Winning the oil end game. rocky mountain institute, snowmass. 6.1
- Matera, F., Baglio, V., and Arico, A. (2011). *Design and testing of a passive DMFC planar system for portable applications*. PhD thesis, Università degli Studi di Catania. 5.3
- Mokyr, J. (1990). Punctuated equilibria and technological progress. *The American Economic Review*, 80(2):350–354. 4.2
- Morris, G. A., Rosenfield, J. E., Schoeberl, M. R., and Jackman, C. H. (2003). Potential impact of subsonic and supersonic aircraft exhaust on water vapor in the lower stratosphere assessed via a trajectory model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D3). 6.2.1, 6.2.2
- Olaiya, M. and Buchan, N. (1999). High power variable frequency generator for large civil aircraft. 4.6.1
- Oxford (2011). Beneficios económicos del transporte aéreo en Chile. <http://tinyurl.com/yd23appy>. 8.1
- Park, S., Craciun, R., Vohs, J. M., and Gorte, R. J. (1999). Direct oxidation of hydrocarbons in a solid oxide fuel cell: I. methane oxidation. *Journal of the Electrochemical Society*, 146(10):3603–3605. 5.3.6
- Patil, P. G. (1992). US department of energy fuel cell program for transportation applications. *Journal of power sources*, 37(1-2):171–179. 6.1.3
- Penner, J. E. (1999). *Aviation and the global atmosphere: a special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. 6.2.1, 6.2.1
- Pratt, J. W., Klebanoff, L. E., Munoz-Ramos, K., Akhil, A. A., Curgus, D. B., and Schenkman, B. L. (2013). Proton exchange membrane fuel cells for electrical power generation on-board commercial airplanes. *Applied energy*, 101:776–796. 1
- Renouard-Vallet, G., Saballus, M., Schmithals, G., Schirmer, J., Kallo, J., and Friedrich, K. A. (2010). Improving the environmental impact of civil aircraft by fuel cell technology: concepts and technological progress. *Energy & Environmental Science*, 3(10):1458–1468. 3, 5.1.1

- Rho, Y. W., Srinivasan, S., and Kho, Y. T. (1994). Mass transport phenomena in proton exchange membrane fuel cells using O_2/He , O_2/Ar , and O_2/N_2 mixtures ii. theoretical analysis. *Journal of the Electrochemical Society*, 141(8):2089–2096. 5.2.1
- Rogers, H., Lee, D., Raper, D., Foster, P. d. F., Wilson, C., and Newton, P. (2002). The impacts of aviation on the atmosphere. *The Aeronautical Journal*, 106(1064):521–546. 6.2.1, 6.2.1
- Sausen, R., Isaksen, I., Grewe, V., Hauglustaine, D., Lee, D. S., Myhre, G., Kohler, M. O., Pitari, G., Schumann, U., Stordal, F., et al. (2005). Aviation radiative forcing in 2000: An update on ipcc (1999). *Meteorologische Zeitschrift*, 14(4):555–561. 6.2.1
- Schot, J. and Geels, F. W. (2007). Niches in evolutionary theories of technical change. *Journal of Evolutionary Economics*, 17(5):605–622. 4.2
- Shaffer, S. (2005). Development update on delphi's solid oxide fuel cell system. In *2005 SECA Review Meeting*, Pacific Grove, CA. 7.4.1
- Singhal, S. C. (2002). Solid oxide fuel cells for stationary, mobile, and military applications. *Solid State Ionics*, 152:405–410. 7.4.1
- Sinnett, M. (2007). 787 no-bleed systems: saving fuel and enhancing operational efficiencies. *Aero Quarterly*, 18:6–11. 4.6.2
- Smith, W. (2000). The role of fuel cells in energy storage. *Journal of Power Sources*, 86(1):74–83. 5.1.3
- Springer, T. E., Wilson, M. S., and Gottesfeld, S. (1993). Modeling and experimental diagnostics in polymer electrolyte fuel cells. *Journal of the Electrochemical Society*, 140(12):3513–3526. 5.2.1
- Srinivasan, S., Mosdale, R., Stevens, P., and Yang, C. (1999). Fuel cells: reaching the era of clean and efficient power generation in the twenty-first century. *Annual Review of Energy and the Environment*, 24(1):281–328. 5.2, 5.2.1
- Stalnaker, T., Usman, K., and Taylor, A. (2016). Airline economic analysis. 8.3, 8.4
- Stambouli, A. B. (2011). Fuel cells: The expectations for an environmental-friendly and sustainable source of energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(9):4507–4520. 5.1.2, 5.2
- Stambouli, A. B. and Traversa, E. (2002). Solid oxide fuel cells (sofcs): a review of an environmentally clean and efficient source of energy. *Renewable and sustainable energy reviews*, 6(5):433–455. 6.2.2
- Steinberg, M. and Cheng, H. C. (1989). Modern and prospective technologies for hydrogen production from fossil fuels. *International Journal of Hydrogen Energy*, 14(11):797–820. 6.1.4
- Stodolsky, F., Gaines, L., and Vyas, A. (2000). Analysis of technology options to reduce the fuel consumption of idling trucks. Technical report, Argonne National Lab., IL (US). 6.1
- Svensson, F., Hasselrot, A., and Moldanova, J. (2004). Reduced environmental impact by lowered cruise altitude for liquid hydrogen-fuelled aircraft. *Aerospace Science and Technology*, 8(4):307–320. 6.2.2
- Swan, W. (2007). Misunderstandings about airline growth. *Journal of Air Transport Management*, 13(1):3–8. 8.5.1
- Vancouver, P. M. (2006). Measuring the economic rate of return on investment in aviation. *InterVISTAS Consulting Inc.* 8.5.1
- Verstraete, D. (2015). On the energy efficiency of hydrogen-fuelled transport aircraft. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(23):7388–7394. 1
- Wachsman, E. D., Marlowe, C. A., and Lee, K. T. (2012). Role of solid oxide fuel cells in a balanced energy strategy. *Energy & Environmental Science*, 5(2):5498–5509. 1

- Whyatt, G. A. and Chick, L. A. (2012). Electrical generation for more-electric aircraft using solid oxide fuel cells. *Pacific Northwest National Laboratory, Richland, Washington, Tech. Rep. PNNL-21382*. 1, 7.2, 7.3.2, 9
- Wood, E., Alexander, M., and Bradley, T. H. (2011). Investigation of battery end-of-life conditions for plug-in hybrid electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 196(11):5147–5154. 6.1.1
- Xie, S., Gong, J., and Liu, W. (2010). Simulation and control of bus conditioner for a power distribution system of more electric aircraft. In *Mechatronics and Automation (ICMA), 2010 International Conference on*, pages 1527–1530. IEEE. 4.6.1

