



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Oxicombustión en motores de aviación general

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DEL DISEÑO
DEPARTAMENTO DE MÁQUINAS Y MOTORES TÉRMICOS

Autor: José Manuel Lisón Santos
Tutor: Luis Miguel García-Cuevas González
Co-tutor: Fabio Alberto Gutiérrez Castro

Grado en Ingeniería Aeroespacial
Curso 2019-2020

Tobarra, junio de 2020

*"La risa no tiene tiempo, la imaginación no tiene edad y los sueños son para siempre."
Walt Disney.*

Resumen

El control de las emisiones contaminantes está siendo, en los últimos años, uno de los problemas sobre los que más se trabaja dentro del diseño de un motor de combustión. Los problemas derivados de estas sustancias han obligado al endurecimiento de los requisitos de homologación.

Gracias al desarrollo de nuevos materiales y el avance en software de cálculo, soluciones como la Oxi-Combustión están cada vez más cerca de ser caminos viables para pequeños vehículos como turismos o avionetas.

La Oxi-Combustión ofrece grandes ventajas en cuanto a emisiones contaminantes se refiere, ya que no se producen óxidos de nitrógeno durante el proceso gracias a la ausencia de nitrógeno en el proceso de quema de combustible.

En el presente proyecto se abordará, en primer lugar, el diseño de un motor Oxi-Combustión tomando como punto de partida un motor convencional ya existente montado sobre una pequeña aeronave. Finalmente se compararán las prestaciones de ambas plantas motrices estudiando la viabilidad del sistema Oxi-Combustión en el ámbito de la aviación general.

Abstract

The control of polluting emissions has been, in recent years, one of fields where is being working harder in the design of a combustion engine. The problems derived from these substances have forced the hardening of the approval requirements.

Thanks to the development of new materials and the advance in calculation software, solutions such as Oxy-Combustion are getting closer to being viable paths for small vehicles such as cars or light aircraft.

Oxy-Combustion offers great advantages in terms of polluting emissions, since nitrogen oxides are not produced during the process thanks to the absence of nitrogen in the fuel burning process.

In the present project, the design of an Oxy-Combustion engine will be addressed first, taking as a starting point an already existing conventional engine mounted on a small aircraft. Finally, the performance of both power plants will be compared by studying the feasibility of the Oxy-Combustion system in the field of general aviation.

Resum

El control de les emissions contaminants està sent, en els últims anys, un dels problemes sobre els quals més es treballa dins del disseny d'un motor de combustió.

Els problemes derivats d'aquestes substàncies han obligat a l'enduriment dels requisits d'homologació.

Gràcies al desenvolupament de nous materials i l'avanç en software de càlcul, solucions com l'Oxi-Combustió estan cada vegada més prop de ser camins viables per a xicotets vehicles com turismes o avionetes.

L'Oxi-Combustió ofereix grans avantatges quant a emissions contaminants es referix, ja que no es produïxen òxids de nitrogen durant el procés gràcies a l'absència de nitrogen en el procés de cremada de combustible.

En el present projecte s'abordarà, en primer lloc, el disseny d'un motor d'Oxi- Combustió prenent com a punt de partida un motor convencional ja existent muntat sobre una xicoteta aeronau. Finalment, es compararan les prestacions d'ambdós plantes motrius estudiant la viabilitat del sistema d'Oxi-Combustió en l'àmbit de l'aviació general.

Agradecimientos

Quiero agradecer a mi familia, especialmente a mis padres, por el apoyo en los buenos y, sobre todo, en los malos momentos durante estos años, por siempre haber sido un ejemplo en el que verme reflejado y por enseñarme a nunca darme por vencido por muy grandes que sean los retos a los que me enfrente.

También querría agradecer a mis compañeros de piso y a Rocío los ánimos y halagos, tan necesarios en los momentos en los que sentía que el reto de esta difícil carrera se hacía imposible.

A Luismi y Fabio por la confianza y la ayuda prestada en este interesante proyecto, junto con todo el grupo de investigación de Oxi-Combustión del CMT, especialmente Joserra y Paco por sus buenos consejos.

Y finalmente, a mis amigos, tanto del pueblo como de la carrera, por estar ahí cuando los he necesitado y por ayudarme a desconectar y ver las cosas desde un mejor punto de vista.

Índice general

Resumen	V
Índice general	XIII
1 Planteamiento del proyecto	1
1.1 Introducción	1
1.2 Objetivos	3
1.3 Antecedentes	3
1.4 Estructura y desarrollo del trabajo	4
1.4.1 Estructura	4
1.4.2 Desarrollo	5
1.5 Referencias	5
2 Justificación del proyecto	7
2.1 Óxidos de Nitrógeno	7
2.1.1 Introducción a los NO _x	7
2.1.2 Estado actual y normativa vigente	8
2.1.3 Efectos de los NO _x	10
2.1.4 Mecanismos de formación de NO _x	12
2.1.5 Mecanismos de reducción de NO _x en MCIA	13
2.2 Dióxido de Carbono	16
2.2.1 Introducción al CO ₂	16
2.2.2 Técnicas de reducción	17
2.3 Referencias	18

3 Entorno de Estudio	19
3.1 Aeronave de Estudio.	19
3.1.1 Desglose de Pesos	20
3.1.2 Dimensiones y prestaciones aerodinámicas [14]	21
3.2 Motor de Estudio.	23
3.3 Misión y requerimientos	25
3.4 Entorno de trabajo: VEMOD	26
3.5 Referencias.	27
4 Ciclo Oxidación	29
4.1 Estado Actual	29
4.1.1 Procesos Actuales	29
4.1.2 Oxygen Transport Membrane	31
4.2 Elementos necesarios	37
4.3 Referencias.	38
5 Diseño Preliminar	39
5.1 Diseños propuestos.	39
5.2 Comparación	40
5.3 Conclusiones.	42
6 Diseño avanzado	45
6.1 Introducción	45
6.2 Sistema de control	46
6.3 Estudios de optimización	48
6.3.1 Optimización de turbogrupos	48
6.3.2 Optimización de la mezcla de admisión.	50
6.4 Mapa de operación del motor	51
6.5 Estudio del motor Oxi-Combustión en los tramos de Despegue y Ascenso.	53
6.6 Referencias.	56
7 Estudio de Viabilidad y conclusiones	57
7.1 Comparación con unidad de potencia actual.	57
7.1.1 Comparación de prestaciones.	59

7.1.2 Comparación de pesos	65
7.2 Viabilidad de utilización	66
7.3 Conclusiones.	67
8 Trabajos Futuros	69
8.1 Estudio de viabilidad de secuestro de CO ₂	69
8.2 Estudio de implementación en carretera	72
8.3 Nuevos estudios de influencia sobre la unidad propulsiva.	72
8.4 Estudio del proceso de combustión	72
8.5 Referencias.	75
9 Presupuesto	77
9.1 Introducción a costes	77
9.2 Costes Unitarios	78
9.2.1 Material Informático.	78
9.2.2 Software.	79
9.2.3 Costes de Personal.	79
9.2.4 Costes asociados al COVID-19.	80
9.3 Costes Totales.	81
9.4 Huella de Carbono	82
9.5 Referencias.	83
10 Pliego de Condiciones	85
10.1 Condiciones generales	85
10.1.1 Real Decreto 488/1997 de 14 de Abril [25].	85
10.1.2 Ordenanza General de Seguridad e Higiene en el Trabajo [26].	89
10.1.3 Disposición 4911 del BOE núm. 130 de 2020-Capítulo 1 [27]	93
10.2 Condiciones de especificaciones técnicas	97
10.2.1 Especificaciones de equipos.	97
10.2.2 Condiciones de calidad.	98
10.2.3 Condiciones de garantía y mantenimiento	99
10.2.4 Reclamaciones	99
10.2.5 Revisión de precios.	99
10.2.6 Fianza	99
10.2.7 Aceptación	99

10.3 Referencias	100
A Anexo I: Polar Parabólica de coeficientes constantes	101
B Anexo II: Ecuaciones Diferenciales de la mecánica de vuelo	105
Bibliografía	107

Índice de figuras

1.1. Evolución de la temperatura global	2
2.1. Tasa de creación de NOx según dosado y temperatura [4]	8
2.2. Puntos de emisión de NOx [5]	9
2.3. Emisión de NOx según sectores en Europa, 2015 [5]	9
2.4. Evolución de la normativa referida a emisión de NOx	10
2.5. Composición del material particulado 2.5 [6]	10
2.6. Boina de contaminación sobre Valencia, año 2017 [7]	11
2.7. Mecanismo Súbito	13
2.8. Esquema simplificado de un sistema EGR García [8]	14
2.9. Diagrama comparativo ciclo diesel y ciclo LTC [9]	14
2.10. Catalizador de tres vías	15
2.11. Eficiencia del catalizador de tres vías según el dosado de funcionamiento	15
2.12. Esquema del sistema SCR [10]	16
2.13. Evolución de la concentración de CO ₂ en la atmósfera [12]	17
3.1. Cessna 150 [13]	19
3.2. Curva Polar Cessna 150	22
3.3. Eficiencia Aerodinámica Cessna 150	23

3.4. Motor Continental O-200-A	24
3.5. Ciclo de certificación LTO	25
4.1. Ciclo VPSA [18]	30
4.2. Estudio paramétrico del comportamiento de membrana BSFC	32
4.3. Membrana en forma de disco	32
4.4. Membrana en tipología Tubular	33
4.5. Membrana dispuesta en fibras huecas	34
4.6. Membrana dispuesta en un solo tubo	35
4.7. Membrana dispuesta en un monolito multiperforado	36
4.8. Membrana con disposición Tubo-Plato	36
4.9. Esquema básico de un ciclo Oxi-Combustión	38
5.1. Esquema preliminar a optimizar	41
6.1. Layout definitivo del motor Oxi-Combustión	46
6.2. Mapa de compresor de baja presión optimizado con puntos de operación límite	49
6.3. Mapa de compresor de baja presión optimizado con puntos de operación límite	49
6.4. Barrido de Potencia	50
6.5. Barrido de Consumo	51
6.6. Potencia del motor Oxi-Combustión a distinto régimen y grado de carga	52
6.7. Consumo del motor Oxi-Combustión a distinto régimen y grado de carga	53
7.1. Esquema del Motor Original	58
7.2. Potencia del motor de Aire a distinto régimen	59
7.3. Potencia del motor de Aire a distinto régimen	60

7.4. Comparación de consumo entre motor de aire y motor Oxi-Combustión a altas cargas	61
7.5. Comparación de potencia entre motor de aire y motor Oxi-Combustión a altas cargas	61
7.6. Comparación de concentración de O_2 en el momento de encendido entre motor de aire y motor Oxi-Combustión a altas cargas	62
7.7. Comparación de presión de admisión a cilindros entre motor de aire y motor Oxi-Combustión a altas cargas	63
7.8. Comparación de potencia entre motor de aire y motor Oxi-Combustión a bajas cargas	64
7.9. Comparación de consumo entre motor de aire y motor Oxi-Combustión a bajas cargas	64
8.1. Diagrama de fase del CO_2	70
8.2. Procesos de compresión Isotermo y Adiabático	71
8.3. Límites térmicos del motor Oxidcombustión	73
8.4. Límites de estabilidad de llama	74
8.5. Restricción de Knock	74
8.6. Estudio de Relación de compresión para 1 bar y 2.5 bar en admisión	75
9.1. Mix de generación eléctrica Español [24]	82
B.1. Sistema de ejes de referencia de un aeronave	105

Índice de tablas

3.1. Desglose de pesos [14]	20
3.2. Dimensiones Geométricas	21
3.3. Condiciones en crucero	21
3.4. Parámetros Aerodinámicos	21
3.5. Dimensiones del Continental O-200-A	24
3.6. Especificaciones del Continental O-200-A	25
3.7. Etapas de ciclo LTO [17]	25
3.8. Resumen de requisitos impuestos al motor	26
5.1. Límites termo-mecánicos impuestos	39
5.2. Estudio de utilización de un cuarto regenerador	41
5.3. Estudio de límites termo-mecánicos en la utilización de un cuarto regenerador	41
5.4. Estudio de utilización de una compresión en doble etapa	42
5.5. Estudio de límites termo-mecánicos en la utilización de una compresión en doble etapa	42
5.6. Temperatura a la entrada de los regeneradores en la línea de aire	43
7.1. Desglose de pesos de elementos añadidos	65
7.2. Comparación del vuelo de crucero con ambas plantas motrices	67

7.3. Comparativa de rangos máximos	67
8.1. Condiciones en los procesos de compresión	71
8.2. Aumento de peso por el uso del sistema de licuado de CO ₂	71
9.1. Costes Totales	81

Lista de Símbolos

Símbolos Latinos

x	—	Posición en el eje x (m).
z	—	Posición en el eje z (m).
T	—	Empuje (N).
L	—	Fuerza de Sustentación (N).
D	—	Resistencia aerodinámica (N).
c	—	Cuerda aerodinámica (m).
S_w	—	Superficie alar (m ²).
g	—	Aceleración gravitatoria (m/s ²).
b	—	Embergadura (m).
e	—	Factor de Oswald.
AR	—	Relación de aspecto.
W	—	Peso (N).
m	—	Masa (kg).
CD	—	Coefficiente de resistencia aerodinámica.
CL	—	Coefficiente de sustentación.
k	—	Coefficiente de resistencia inducida.
t	—	Timepo (s).
v	—	Velocidad (m/s).
h	—	Altura (m).
A	—	Área (m ²).
P_n	—	Potencia nominal (W).
C	—	Coste (€).
V	—	Valor (€).
h_a	—	Horas hábiles (h).

Letras Griegas

α	—	Ángulo de ataque.
γ	—	Pendiente de trayectoria.
λ	—	Tasa de exceso de aire.

ρ	—	Densidad (kg/m ³).
π	—	Número Pi.
μ	—	Coefficiente de fricción seca.
η	—	Rendimiento.

Subíndices

0	—	Parásita.
<i>i</i>	—	Inducida.
<i>c</i>	—	Crucero.
<i>to</i>	—	Despegue.
<i>as</i>	—	Ascenso.
<i>pl</i>	—	Carga de pago.
<i>mem</i>	—	Membrana.
<i>hél</i>	—	Hélice.
<i>req</i>	—	Requerida.
<i>h</i>	—	horario.
<i>am</i>	—	Amortizado.

Capítulo 1

Planteamiento del proyecto

1.1 Introducción

El ser humano, desde que en 1769 el ingeniero escocés James Watt construyera y patentara la primera máquina de vapor de uso práctico, ha avanzado a pasos agigantados en el desarrollo de la sociedad.

Comenzando por la industria, siendo una de las causas principales de la revolución industrial inglesa a mediados del siglo XVIII y que se propagaría por toda Europa, gracias al desarrollo de telares mecánicos que agilizaban enormemente la producción de todo tipo de prendas.

El desarrollo acelerado de la industria no podría haberse consumado si no se hubiera realizado a la par del desarrollo del transporte, que permitiría, en primera instancia, el suministro continuo de materias primas desde la fuente hasta la industria.

La industria del transporte dio sus primeros pasos con la invención en 1803 del barco de vapor por parte de Robert Fulton y la construcción de la primera locomotora en 1804 de la mano de Richard Trevithick.

Otra fecha importante para el mundo de la ingeniería fue el año 1886, cuando el ingeniero alemán Carl Benz, desarrolló el primer automóvil. Este hecho abrió la puerta al transporte individualizado y exclusivo de personas por tierra y no solo de mercancías.

Todo este desarrollo continuó con Wilbur y Orville Wright. Dos hermanos estadounidenses fabricantes de bicicletas que no se conformaron con apoyar los pies en el suelo, sino que buscaron la exploración de un territorio nunca explorado, el aire, cumpliendo el sueño de muchas otras personas antes que ellos, el vuelo prolongado en un sistema más pesado que el aire. Este suceso ocurrió en el año 1903 en un aeroplano llamado

Flyer 1 y, aunque sólo duró 12 segundos, fue el pistoletazo de salida del transporte aéreo actual.

Estos hechos han permitido que el ser humano se moviera cada vez más rápido alrededor del mundo o incluso fuera de él, ayudando al conocimiento de nuevas culturas y adquisición de conocimientos propios de otras sociedades o lugares.

Sin embargo, el ser humano, ciego por rápido desarrollo que se estaba llevando a cabo, no era capaz de observar que estaba degradando el mundo que lo rodeaba.

Tanto la extracción de los combustibles fósiles, indispensables para el desarrollo del transporte, como la quema de ellos, han llevado, hoy en día, a situaciones extremas en el planeta Tierra. Como son, el calentamiento global, producido por la continua emisión de gases de efecto invernadero, como el CO_2 o el N_2O , que han provocado que la temperatura media del planeta haya subido 1.5°C desde el periodo preindustrial [1] causando sucesos como la fusión del hielo polar y el aumento del nivel del mar. También ha aumentado drásticamente la concentración de óxidos de nitrógeno en ambientes urbanos provocando el aumento de enfermedades respiratorias que pueden llevar a la muerte del individuo.

En la figura 1.1 se presentan los resultados del estudio [1], donde se muestra la evolución de la temperatura global y los pronosticos de evolución de la misma.

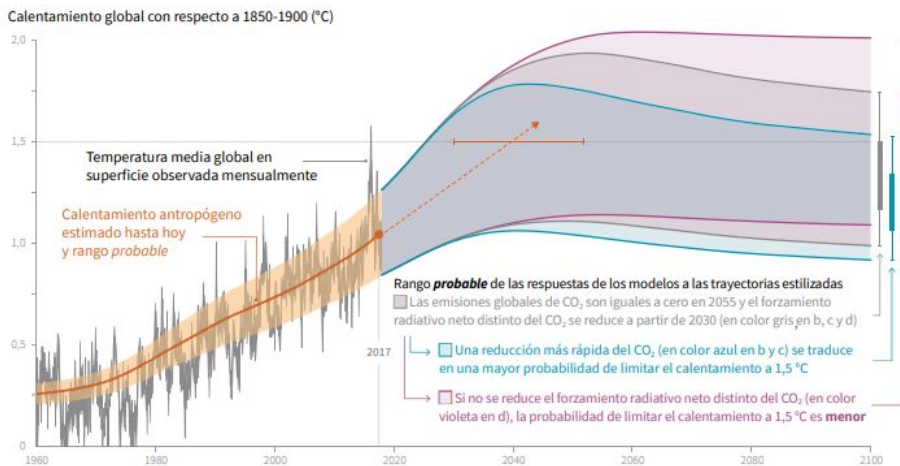


Figura 1.1: Evolución de la temperatura global

Es por ello que el desarrollo en la industria y transporte necesita un gran cambio y comenzar a compaginar el progreso con la limitación, o incluso eliminación, de todas estas emisiones antes de que el problema causado por el ser humano sea irreversible.

1.2 Objetivos

Este proyecto consta de dos objetivos principales. El primero de ellos será el diseño de un motor oxi-combustión, caracterizado por ser un motor libre de nitrógeno en el proceso de combustión, ayudando de esta manera a la reducción de óxidos de nitrógeno en el ambiente.

Este motor se diseñará tomando como base un motor real de combustión interna alternativo montado sobre una aeronave.

El segundo objetivo será la comparación de ambos motores, convencional y oxi-combustión, en la realización de la misión característica de la aeronave tomada.

Como objetivo adicional se plantearán ciertos caminos a seguir en estudios futuros sobre este motor, como son el estudio de la combustión o el planteamiento de un sistema reductor de emisiones de CO₂.

1.3 Antecedentes

Los antecedentes a este proyecto, en el ámbito de la oxi-combustión se encuentran, principalmente, en el mundo de la industria.

Los primeros estudios sobre esta técnica se llevaron a cabo con la finalidad del secuestro del CO₂, estos datan de 1982 Maier [2], aunque, debido a la crisis del petróleo y a la falsa idea del inminente desabastecimiento de combustibles fósiles, estos estudios fueron dejados en segundo plano.

Ya en la década de los 90 se retomaría el interés en esta técnica como reducción de gases de efecto invernadero, con estudios llevados a cabo por *International Flame Research Foundation* (IFRF), *Japanese New Energy and Industrial Technology Development Organisation* (NEDO) o *Argonne National Laboratory* (ANL).

En el año 2009, un estudio llevado a cabo por Wall y Yu [3], mostró que en plantas energéticas de hasta 3 MW se habían llevado a cabo pruebas exitosas de procesos Oxi-Combustión y secuestro de CO₂ y que además estaban programadas pruebas en centrales de hasta 300 MW

1.4 Estructura y desarrollo del trabajo

1.4.1 Estructura

El presente documento se divide en diez capítulos y 2 anexos.

El primer capítulo, *Planteamiento del proyecto* incluye una breve introducción sobre la necesidad de controlar las emisiones contaminantes, antecedentes del proyecto, objetivos propuestos para el mismo y esta descripción sobre la estructura del documento.

El segundo capítulo, *Justificación del proyecto*, trata las causas por las que se justifica la realización del proyecto, haciendo hincapié en los efectos nocivos de los principales gases contaminantes de los motores de combustión actuales.

En el tercer capítulo, *Entorno de Estudio* se presenta la aeronave y motor de estudio, que serán la base de este proyecto. En este capítulo también se incluye la misión que el motor oxi-Combustión, junto con la aeronave de estudio, debe ser capaz de cumplir para que se considere factible su utilización. Se concluirá con una descripción del software VEMOD, programa proporcionado por el CMT para la caracterización de motores de combustión interna alternativos.

En el cuarto capítulo, *Ciclo Oxi-combustión* se introduce al lector en la oxi-combustión presentando los procesos actuales de separación de nitrógeno y oxígeno concluyendo con las membranas BSFC y las características de las mismas. En el final del capítulo se presenta un esquema básico de un motor Oxi-Combustión.

En los capítulos cinco y seis, *Diseño preliminar y avanzado* se describe el proceso de diseño y optimización llevado a cabo para llegar a la configuración final del motor oxi-Combustión, presentada al final del capítulo seis

El capítulo siete, *Estudio de Viabilidad y conclusiones* se presenta la comparación del motor Oxi-combustión diseñado en los capítulos anteriores con el motor original. Se muestra el origen de las diferencias entre ambos y se termina con una breve conclusión sobre el uso del motor Oxi-combustión diseñado en sustitución del motor actual.

El capítulo ocho, *Trabajos futuros*, trata los caminos a seguir tras la realización de este proyecto siendo de especial relevancia el estudio de secuestro de CO₂.

En el capítulo nueve, *Presupuesto*, se presentan los costes estimados de la realización de este proyecto así como el beneficio esperado tras la conclusión del mismo.

El capítulo diez, *Pliego de condiciones*, refleja los requisitos, generales y técnicos, necesarios para que este proyecto pueda ser llevado a cabo.

Finalmente se presentan una serie de anexos que podrán servir al lector para comprender los fundamentos teóricos de los procedimientos mostradas en el presente documento.

1.4.2 Desarrollo

El presente proyecto comenzará por la caracterización del motor original en el programa VEMOD, tomando como datos de validación los publicados por el fabricante.

Posteriormente, también en VEMOD, se tratará el diseño del sistema Oxi-Combustión con el objetivo de minimizar el consumo del mismo pero cumpliendo con los límites termo-mecánicos impuestos.

Una vez que se alcance el diseño óptimo, se comparará con la unidad de potencia original, montados ambos sobre la aeronave de estudio y con el rango máximo como parámetro determinante.

Finalmente se extraerán las conclusiones pertinentes y se establecerán líneas de estudio futuras a razón de los resultados obtenidos.

1.5 Referencias

- [1] IPCC. “Calentamiento global de 1.5°C”. En: (2019) (vid. pág. 2).
- [2] Günter Scheffknecht; Leema Al-Makhadmeh¹; Uwe Schnell; Jörg Maier. “Oxy-fuel coal combustion—A review of the current state-of-the-art”. En: (2011) (vid. pág. 3).
- [3] J Wall T.F.; Yu. “Coal-fired oxyfuel technology status and progress to deployment”. En: (2009) (vid. pág. 3).

Capítulo 2

Justificación del proyecto

2.1 Óxidos de Nitrógeno

La razón principal que justificaría la realización de este proyecto sería estudiar la posibilidad de implementar una planta propulsiva capaz de producir cero emisiones contaminantes pertenecientes al grupo de los NO_x pero manteniendo unas prestaciones mínimas comparado con un motor convencional equiparable.

El hecho que permite que este proyecto se pueda llevar a cabo en estos momentos es el desarrollo de las membranas separadoras de oxígeno y nitrógeno *in-situ* con un alto rendimiento.

2.1.1 Introducción a los NO_x

El término NO_x se aplica a ciertos compuestos químicos formados por la combinación de nitrógeno y oxígeno en diferentes proporciones. Los principales compuestos definidos en este grupo serían el óxido nitroso (N₂O), el óxido nítrico (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO₂).

El principal mecanismo de formación de este tipo de gases reactivos es la combustión a altas temperatura, siempre que el comburente utilizado en esa reacción sea el aire. Tal y como se puede observar en la figura 2.1 las tasas de creación de estos compuestos aumenta cuanto más alta es la temperatura y cuanto más bajo sea el dosado, esto es debido a que en un dosado pobre existe gran cantidad de oxígeno libre que, debido a la alta temperatura se disocia en oxígeno monoatómico y recombina con los elementos disponibles en esas condiciones, el cual será el nitrógeno monoatómico principalmente.

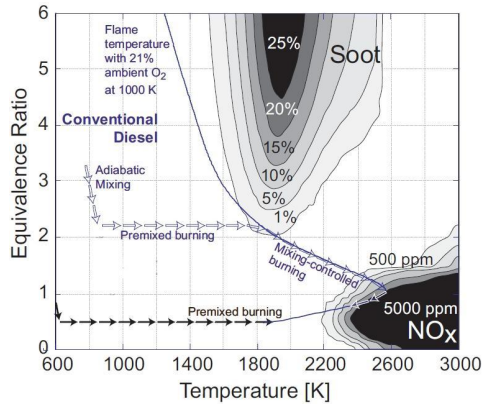


Figura 2.1: Tasa de creación de NOx según dosado y temperatura [4]

Tanto el NO o el NO₂ serán los elementos más a tener en cuenta en este estudio debido a que son los compuestos más perjudiciales para la salud y el medio ambiente dentro del grupo de los NOx.

- Óxidos de Nitrógeno (NO)

El NO es un compuesto gaseoso a temperatura ambiente. Es un gas incoloro y muy inestable, ya que se oxida rápidamente en presencia de oxígeno transformándose en NO₂, debido a esto es considerado igual de perjudicial que el Dióxido de Nitrógeno.

- Dióxidos de Nitrógeno (NO₂)

El NO₂ tiene su punto de ebullición en los 21.2 grados Celsius y se presenta con colores marrón-amarillentos. A estos tonos se debe el aspecto de las nubes de contaminación que envuelven ciudades con altas tasas de emisiones de estos gases. Es un compuesto muy tóxico y precursor de la formación de partículas de nitrato lo que produce graves problemas en el sistema respiratorio.

2.1.2 Estado actual y normativa vigente

Hoy en día tanto el NO como el NO₂ están considerados como contaminantes por parte de la Unión Europea debido a sus efectos demostrados en la salud y el medioambiente.

En la figura 2.2 tomada por la NASA durante los años 2004-2014 se muestra donde se encuentran los focos de emisiones de estos compuestos, los cuales coinciden con los núcleos más poblados del planeta. Otro dato destacable se encuentra en la figura 2.3 donde se puede observar la distribución Europea de emisiones de NOx según sectores del año 2014. En el se puede apreciar como el sector del transporte y de la industria

son los principales focos de emisión, de ahí nace la necesidad de encontrar un sistema propulsivo que sea capaz de bajar las emisiones actuales.

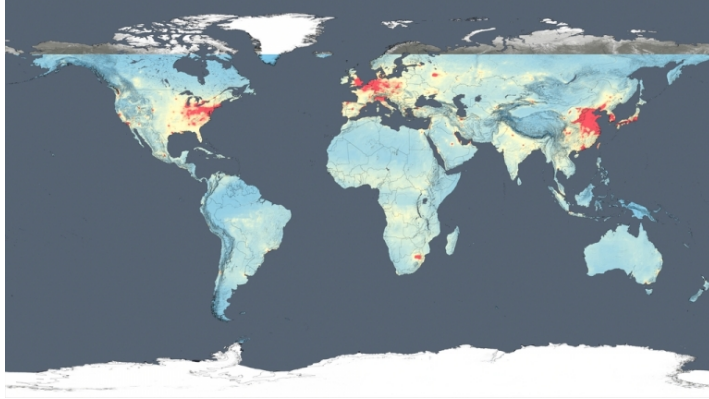


Figura 2.2: Puntos de emisión de NO_x [5]

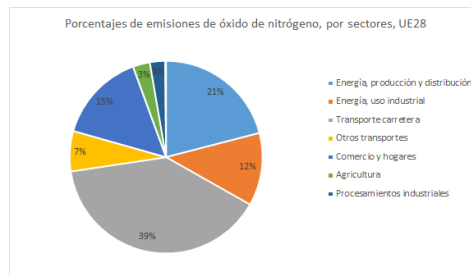


Figura 2.3: Emisión de NO_x según sectores en Europa, 2015 [5]

A partir del año 2000 la Unión Europea incorporó a la norma regulatoria de emisiones en transporte por carretera los compuestos NO_x, desde entonces y en las sucesivas normas europeas se ha ido reduciendo ese límite yendo acorde a lo que la tecnología permitía, esta tendencia se puede observar en la figura 2.4 donde se muestran los límites legales de emisión desde el año 2000, a fecha de 2020 donde tiene efecto la norma EURO6 el límite se encuentra situado en los 0.06 g km⁻¹ para vehículos gasolina y en 0.08 g km⁻¹ para vehículos diesel.

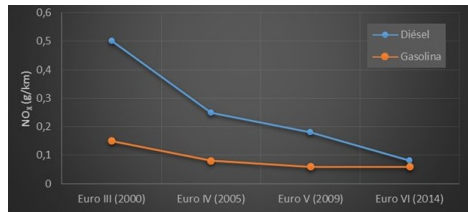


Figura 2.4: Evolución de la normativa referida a emisión de NOx

2.1.3 Efectos de los NOx

Efectos en el cuerpo humano

Como se ha comentado en apartados anteriores el riesgo que presentan las emisiones de NO es la posterior oxidación a NO₂.

La exposición continuada del dióxido de nitrógeno puede llevar a provocar diferentes patologías en el aparato respiratorio como bronquitis y asma. También se ha demostrado que es el culpable de ciertos procesos alérgicos, especialmente en niños.

De forma indirecta el NO₂ se relaciona con múltiples enfermedades como el autismo, fallos del sistema cardiovascular, ictus, enfermedades renales y Cáncer, ya que se ha demostrado que es uno de los precursores del Material Particulado Fino (MP2,5), el cual se denomina como una mezcla de agentes contaminantes en estado sólido y líquido en suspensión en el aire. Esta sustancia fue declarada Cancerígeno Humano en octubre de 2013 [6].

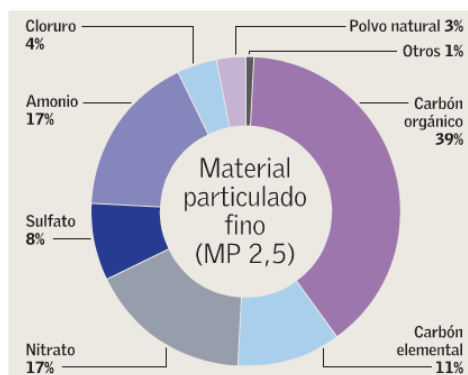
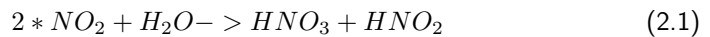


Figura 2.5: Composición del material particulado 2.5 [6]

Efectos en el medio ambiente

Además de los efectos mostrados sobre la salud humana los NO_x son también la causa de diversos efectos sobre el medio ambiente.

El principal efecto sería la formación de ácido nítrico (HNO₃) al combinarse el dióxido de nitrógeno con el agua de la atmósfera. Este ácido fuerte es uno de los principales causantes de la lluvia ácida. Su mecanismo de formación sería el mostrado en la Ecuación 2.1



Los NO_x también tienen una gran trascendencia en la formación del smog fotoquímico, debido a que, mediante la combinación con otros contaminantes atmosféricos, darían como resultado la formación de Ozono troposférico.

Esto causa que en días sin viento, donde estos compuestos se pueden acumular, se observe la típica "boina de contaminación" sobre ciudades con mucho tránsito de vehículos como se observa en la figura 2.6.



Figura 2.6: Boina de contaminación sobre Valencia, año 2017 [7]

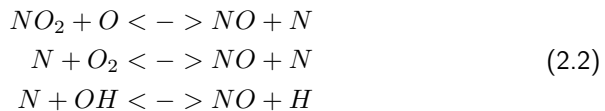
Finalmente, el óxido nitroso (N₂O) es un gas con un acusado efecto invernadero, Es considerado, aun siendo baja su presencia en la atmósfera, el tercer compuesto más contribuyente al calentamiento global, por detrás del CO₂ y el metano, debido a su gran capacidad para absorber energía.

2.1.4 Mecanismos de formación de NOx

Existen diversos mecanismos por los cuales el NO se formaría dentro de un MCIa tales como el mecanismo térmico o de Zeldevich, el mecanismo vía N₂O, el mecanismo súbito o mecanismo vía combustible entre otros. En este proyecto se explicarán los tres primeros.

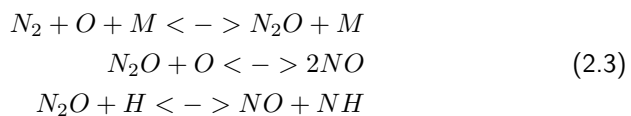
- Mecanismo Térmico

Este método es la principal fuente de formación de NO cuando las temperaturas suben por encima de los 1800K, a partir de ahí comienzan a darse las reacciones de disociación del oxígeno y posterior recombinación con los átomos de nitrógeno según el esquema mostrando en la Ecuación 2.2



- Mecanismo vía N₂O

Se produce en zonas donde el dosado relativo es esencialmente bajo (menores a 0,8), además debe de producirse en ambientes con temperaturas moderadas y altas presiones, por ello este mecanismo es propio de las turbinas de gas, su esquema básico sería en representado en la Ecuación 2.3.



Como se puede observar no se forma directamente en NO como en el mecanismo anterior, sino que primero se formaría en N₂O para terminar formando el NO por la reacción con el oxígeno y el hidrógeno.

- Mecanismo Súbito

Comienza a producirse en zonas con altas concentraciones de HC, como pueden ser las zonas interiores de la llama.

Consiste en una reacción rápida del HC con N₂ dando lugar a aminas y compuestos tipo CN y HCN que terminarán formando monóxido de nitrógeno según el esquema mostrado en la figura 2.7

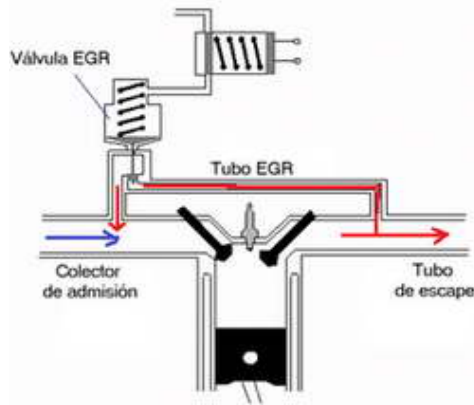


Figura 2.8: Esquema simplificado de un sistema EGR García [8]

Otro tipo de medidas, aunque llevadas a cabo en motores de encendido por compresión serían el diseño del sistema de inyección y la combustión a baja temperatura (LTC), la cual consistiría en implementar un ciclo tal que evitara las zonas de máxima tasa de creación de NO_x como se ve en la figura 2.9

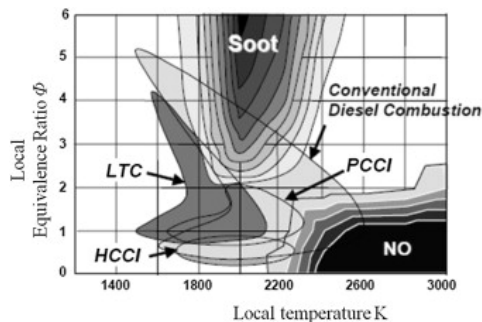


Figura 2.9: Diagrama comparativo ciclo diesel y ciclo LTC [9]

2. Soluciones Pasivas

Para los métodos pasivos se debe diferenciar hoy en día entre los motores gasolina que trabajan con dosado estequiométrico y motores diesel que trabajan con dosados relativos inferiores a la unidad.

Para los primeros el método mas eficiente que existe sería el catalizador de tres vías, representado en la figura 2.10. El cual permite oxidar tanto los HC como el CO y reducir a su vez NO_x, sin embargo el motor debe estar perfectamente calibrado para que siempre trabaje en un régimen muy estrecho alrededor del

dosado estequiométrico, ya que, si no el catalizador cae bruscamente en rendimiento, este hecho se puede observar en la figura 2.11. Para ello es necesario la utilización de una sonda Lambda que mide el exceso de oxidante en el escape.

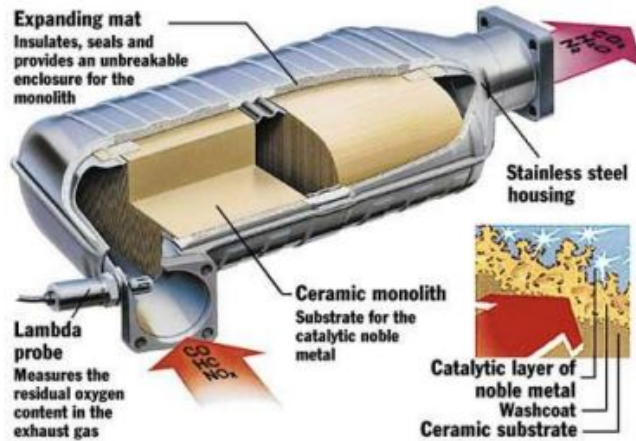


Figura 2.10: Catalizador de tres vías

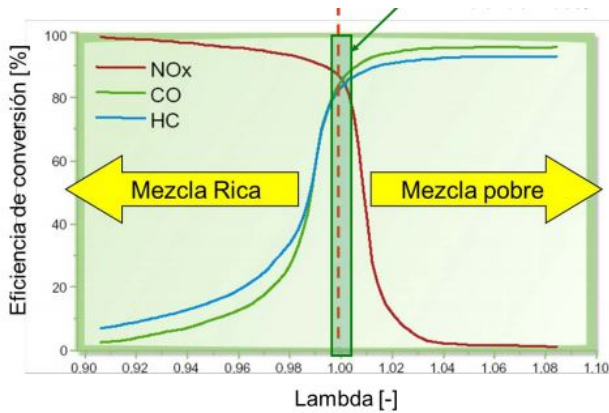


Figura 2.11: Eficiencia del catalizador de tres vías según el dosado de funcionamiento

Para un motor Diesel existen principalmente dos dispositivos capaces de reducir los NOx.

El primero de ellos serían las Trampas LNT ("Lean NOx Trap") que funcionan como acumulador de NOx cuando el sistema trabaja con mezcla pobre y posteriormente se regeneran subiendo el dosado hasta valores mayores a la unidad.

El otro sistema es el SCR (Reducción Catalítica Selectiva), este método es capaz de reducir los NO_x en un 90% trabajando con dosado pobre, pues no es necesaria la presencia de oxígeno, sin embargo se necesita la adición de una sustancia denominada AdBlue compuesta de agua y urea. Tras este sistema de postratamiento las sustancias de escape serán H₂O, N₂ y CO₂.

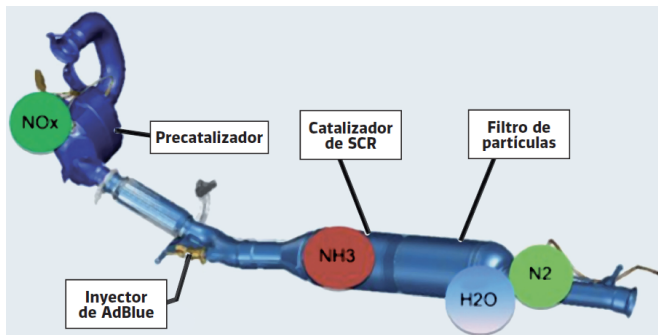


Figura 2.12: Esquema del sistema SCR [10]

2.2 Dióxido de Carbono

En este apartado se van a introducir los efectos de uno de los contaminantes más habituales de los motores de combustión, el dióxido de carbono (CO₂).

Aunque este estudio no este enfocado a la reducción de este compuesto, sí que se presentarán ciertas ideas para su tratamiento en ideas futuras de manera que este estudio pueda ser ampliado mediante esta vía.

2.2.1 Introducción al CO₂

El dióxido de carbono es una molécula triatómica compuesta por dos átomos de oxígeno y un de carbono. Este elemento se presenta en su forma gaseosa en condiciones ambientes, no es inflamable y en condiciones estandar es estable e inerte, sin embargo es hipergólico con sustancias como el amoníaco o aminas.

La exposición continuada al CO₂ puede causar dolor de cabeza o trastornos respiratorios si está presente en muy altas concentraciones pudiendo llegar a causar paro respiratorio o incluso la muerte [11].

También es considerado uno de los principales precursores del efecto invernadero, es por ello que, aunque el CO₂ sea un producto directo de la combustión, sea evaluado en las respectivas normativas como un contaminante.

El CO_2 de la tierra siempre se ha mantenido en valores estables, sin embargo desde la revolución industrial y hasta nuestros días la concentración de esta sustancia en la atmósfera terrestre ha aumentado de manera lineal, como se observa en la figura 2.13, este hecho demuestra que es necesaria la inversión en proyectos que ayuden a reducir la emisión de este compuesto.

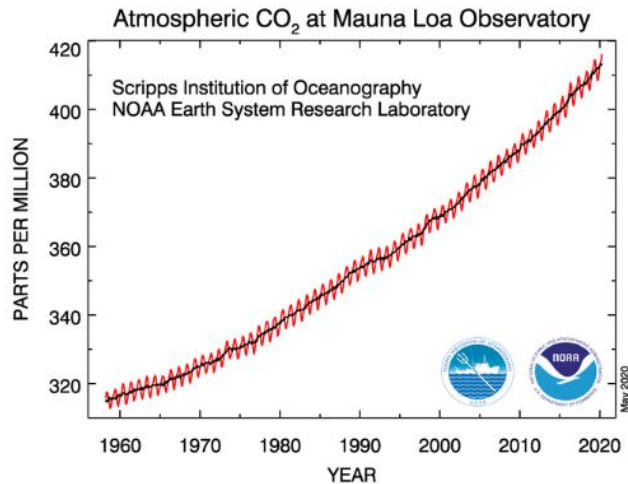


Figura 2.13: Evolución de la concentración de CO_2 en la atmósfera [12]

2.2.2 Técnicas de reducción

Puesto que el CO_2 es un producto directo de la combustión la única manera de reducirlo de forma directa es quemando menos combustible. Esto se puede implementar por dos vías.

La primera de ellas sería la mejora del rendimiento del motor. De esta forma se podría obtener la misma potencia de salida quemando menos cantidad de combustible y por tanto produciendo menos dióxido de carbono.

La otra forma consiste en la reducción del peso y la resistencia aerodinámica del conjunto así sería viable la utilización de un motor con menor potencia, y por tanto menor consumo de combustible, para la obtención de las mismas prestaciones en el vehículo.

Aparte de estas soluciones, en los últimos años se ha avanzado en el desarrollo de otras técnicas que permitirían el tratamiento del CO_2 una vez producido. Una de ellas, y sobre la que se avanzará algo más en capítulos posteriores, es el secuestro del dióxido del carbono. Como introducción a la misma, esta técnica consiste en el licuado del

CO₂ por medio del tratamiento del flujo de escape, almacenándolo e impidiendo que este sea liberado a la atmósfera.

2.3 Referencias

- [4] Hannu Jaaskelainen. "Low Temperature Combustion". En: *EPA* (2004) (vid. pág. 8).
- [5] "NOx: la boina del mundo". En: *EcoPost* (2015) (vid. pág. 9).
- [6] Fundación Crana. *Óxidos de nitrógeno (NOX = NO + NO2)*. URL: http://www.crana.org/es/contaminacion/mas-informacion_3/axidos-nitrageno-nox-no2 (visitado 20-10-2016) (vid. pág. 10).
- [7] Agencia EFE. "Toda la población valenciana respiró aire contaminado en 2017". En: *El Mundo* (2017) (vid. pág. 11).
- [8] Jesús García. *Pérdidas de potencia en el motor* (vid. pág. 14).
- [9] Kang Y.Huh Youngjae Lee. "Analysis of different modes of low temperature combustion by ultra-high EGR and modulated kinetics in a heavy duty diesel engine". En: *EISevier* (2014) (vid. pág. 14).
- [10] Talleres La Comunidad. *Sistema de escape SCR AdBlue*. URL: <https://www.lacomunidadeltaller.es/sistema-de-escape-scr-adblue/> (visitado 22-05-2019) (vid. pág. 16).
- [11] Instituto para la Salud Geoambiental. *Dióxido de carbono CO2*. URL: <https://www.saludgeoambiental.org/> (visitado 2019) (vid. pág. 16).
- [12] U.S. Department of Commerce; National Oceanic Atmospheric Administration; NOAA Research. *Trends in Atmospheric Carbon Dioxide*. URL: <https://www.esrl.noaa.gov/> (visitado 2020) (vid. pág. 17).

Capítulo 3

Entorno de Estudio

3.1 Aeronave de Estudio

La aeronave sobre la que va a estar enfocado este estudio es la Cessna 150, como se puede observar en la figura 3.1 es un avión biplaza de ala alta, originalmente fue diseñada como un aeronave de recreo y por tanto se emplaza en el grupo de aviación general.



Figura 3.1: Cessna 150 [13]

Sucedió al Cessna 140, con el que se diferencia principalmente por el tren de aterrizaje de tipo triciclo en vez de tipo convencional que presentaría su antecesor.

El primer vuelo data del año 1957 aunque no sería hasta un año después cuando comenzaría su producción, el grueso de las aeronaves matriculadas se encuentran en Estados Unidos con más de 22.000 unidades, aunque algunas factorías europeas como Reims Aviation obtuvieron la licencia para fabricar este avión, llegando a producir hasta 1.800 unidades utilizando como planta propulsora un motor Rolls Royce en vez del Continental O-200A del que se hablará en puntos posteriores. Estas cifras hacen que el Cessna 150 sea uno de los aviones más producidos en la historia.

3.1.1 Desglose de Pesos

Peso	Valor
Peso máximo al despegue (m_{To})	730 kg
Peso en Vacío (m_e)	501 kg
Peso Tripulación (m_{crew})	80 kg
Peso Combustible (m_{fuel})	69 kg
Peso Carga de Pago (m_{pl})	80 kg

Tabla 3.1: Desglose de pesos [14]

Como comentario adicional a la tabla 3.1, el peso en vacío incluye el peso de la aeronave con motor y todos los fluidos necesarios para su correcto funcionamiento a excepción del combustible y finalmente el peso de combustible se ha calculado acorde a la capacidad máxima de los tanques, 98 litros, y a la densidad del combustible utilizado, 832 kg/m³.

Por tanto esta razón de pesos corresponde a la configuración de máximo alcance pero puede variar según la misión.

3.1.2 Dimensiones y prestaciones aerodinámicas [14]

Dimensión	Valor
Longitud del fuselaje	7.29 m
Superficie Alar(S_w)	14.86 m ²
Envergadura(b)	10.16 m
Cuerda media aerodinámica	1.47 m
Alargamiento(AR)	6.88
Estrechamiento	0.687
Flecha a un cuarto de cuerda	0°
Ángulo de diherdro	1°

Tabla 3.2: Dimensiones Geométricas

Parámetro	Valor
Altitud Crucero	1070 m
Velocidad Crucero	200 km/h

Tabla 3.3: Condiciones en crucero

Parámetro	Valor
Coficiente de Drag parásito (CD_0)	0.042
Factor de Oswald (e)	0.847
Coficiente de Drag Inducido (k)	0.0471
Coficiente de Lift en Crucero	0.283
Coficiente de Lift Máximo	1.5

Tabla 3.4: Parámetros Aerodinámicos

Para el cálculo de CD_0 se ha estimado la contribución de cada una de las superficies expuestas de la aeronave mediante los factores de forma asociados.

Para calcular el factor de Oswald se a utilizado la correlación de David Hull [15] representada en la Ecuación 3.1 .

$$e = (1 - 0,045AR^{0,68})(1 - 0,022 \cdot Flecha_{c/4}^{1,615}) \quad (3.1)$$

Finalmente el coeficiente de drag inducido viene representado por la Ecuación 3.2

$$k = \frac{1}{\pi \cdot AR \cdot e} \quad (3.2)$$

Con todos estos coeficientes calculados se puede representar el comportamiento aerodinámico de la aeronave por medio de la polar parabólica de coeficientes constantes, siempre que el vuelo se mantenga que un régimen subsónico bajo $M_\infty < 0.6$. Este comportamiento viene modelizado en la Ecuación 3.3

$$CD = CD_0 + k \cdot CL^2 \quad (3.3)$$

Si en esta ecuación se sustituyen los valores reflejados en la tabla 3.4 se obtendría la curva polar reflejada en la figura 3.2 y la eficiencia aerodinámica mostrada en la figura 3.3, donde se muestra también la localización del punto de crucero.

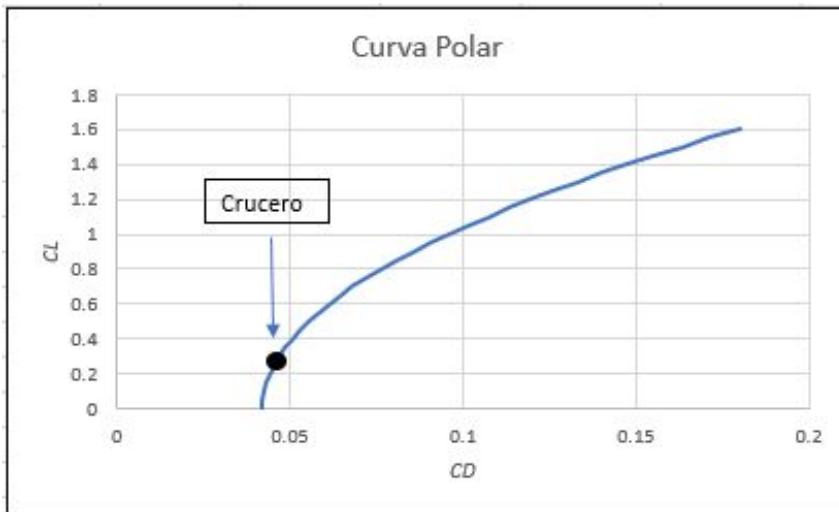


Figura 3.2: Curva Polar Cessna 150

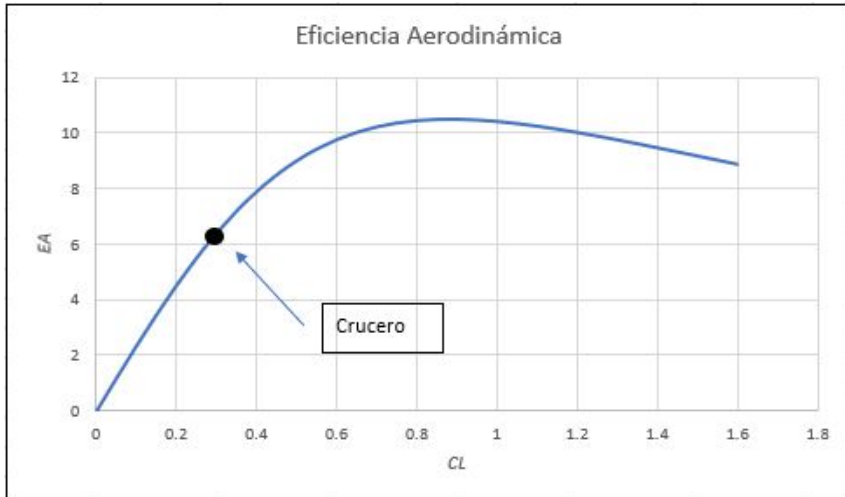


Figura 3.3: Eficiencia Aerodinámica Cessna 150

3.2 Motor de Estudio

El motor base de este estudio será el Continental O-200, el cual fué la principal planta propulsiva de la Cessna 150.

Fue diseñado y producido por el fabricante estadounidense Continental Motors entre los años 1947 y 1980 para aviación general. Además de la Cessna 150 también ha sido utilizado en otras aeronaves semejantes como el Piper PA-18 Super Cub o el Aeronca Model 7 Champion.

El Continental O-200 es un motor de cuatro cilindros de aspiración atmosférica con tipología boxer como se puede observar en la figura 3.4, refrigerado por aire y alimentado mediante carburador de regulación manual.



Figura 3.4: Motor Continental O-200-A

En la tabla 3.5 y la tabla 3.6 se muestran las dimensiones y especificaciones de este motor en su versión O-200-A, estos valores serán utilizados como la base de este estudio [16].

Dimensión	Valor
Carrera	98.6 mm
Diámetro	103.1 mm
Cilindrada Unitaria	822.5 cm ³
Cilindrada Total	3290 cm ³
Longitud	724.7 mm
Anchura	801.6 mm
Altura	588.8 mm
Peso (Sin accesorios)	77.19 kg

Tabla 3.5: Dimensiones del Continental O-200-A

Parámetro	Valor
Relación de Compresión	7.0:1
Potencia Máxima	75 kW
Potencia Específica	23 kW/L
Ratio Potencia-Peso	920 W/kg

Tabla 3.6: Especificaciones del Continental O-200-A

En el (Anexo Tal) se ha adjuntado el esquema de motor realizado en VEMOD, teniendo en cuenta que las dimensiones de pipas y demás características constructivas que no están expresadas en este apartado han sido obtenidas de la referencia (la que sea), la cual corresponde al manual de un motor equivalente con configuración en línea de la misma marca.

3.3 Misión y requerimientos

El ciclo de funcionamiento que se exigirá al motor se asemeja en gran medida a la primera parte de un ciclo LTO (*Landing-Takeoff Cycle*) de certificación representado en la figura 3.5, en especial las partes de despegue y ascenso, de manera que el conjunto aeronave+motor sea capaz de mantener vuelo estable con las condiciones que este ciclo impone dadas en la tabla 3.7.

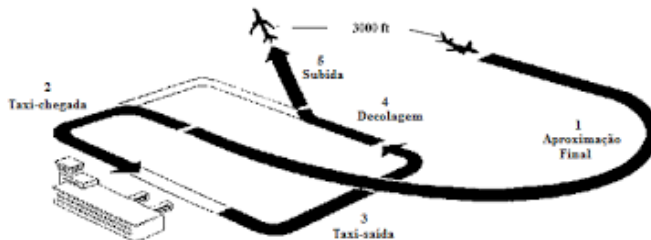


Figura 3.5: Ciclo de certificación LTO

Fase de Vuelo	Grado de Empuje	Tiempo [min]
Despegue	100 %	0.7
Ascenso	85 %	2.2
Aproximación	30 %	4
Rodaje en Tierra	7 %	26

Tabla 3.7: Etapas de ciclo LTO [17]

Se establecerá también que la aceleración del despegue se realice desde velocidad nula hasta la velocidad de rotación ($1.2V_{Stall}$), posteriormente el conjunto debe acelerar hasta la velocidad de crucero a lo largo de la fase de ascenso, además de que este debe alcanzar dicha altitud.

De manera que los requisitos que debe cumplir el conjunto para que sea viable se encuentran resumidos en la tabla 3.8.

Fase de Vuelo	Grado de Empuje	Tiempo [min]	Velocidad Final	Altura final
Despegue	100 %	0.7	98 km/h	0
Ascenso	85 %	-	V_c	1070 m

Tabla 3.8: Resumen de requisitos impuestos al motor

Una vez que se compruebe que el conjunto es capaz de realizar dicho ciclo se procederá a comparar ambos conjuntos, motor original y motor oxcombustión a lo largo de un vuelo en crucero siendo el rango máximo el parámetro diferencial de este estudio, expresado según la ecuación de Breguer 3.4

$$R_{max} = \frac{\eta_{hélice}}{C_e} \cdot \frac{CL}{CD} \cdot Ln \frac{W_{inicial}}{W_{final}} \quad (3.4)$$

3.4 Entorno de trabajo: VEMOD

El presente proyecto girará en torno al software VEMOD, el cual será utilizado para obtener las prestaciones y valores característicos del motor a optimizar.

VEMOD se define como un software de simulación cero y unidimensional de procesos termofluidodinámicos desarrollado en el Instituto CMT - Motores Térmicos.

El principio de funcionamiento de este programa se basa en la resolución de las ecuaciones de Euler en 1D con términos debidos a fricción, transferencia de calor e intercambio y formación de especies mediante un método de volúmenes finitos con malla colocada y reconstrucción de Godunov y MUSCL como método de alta resolución.

Es capaz de calcular el balance de masa, energía y especies para elementos cero-dimensionales como los cilindros de un motor, las membranas o los intercambiadores de calor.

Tiene implementadas múltiples correlaciones empíricas y modelos de orden reducido para fenómenos complejos como son la combustión y formación de especies en las

cámaras de combustión, la transferencia de calor en diversos elementos o la permeabilidad de especies en membranas. Resuelve circuitos hidráulicos y la transferencia de calor en sólidos mediante métodos de elementos finitos.

Tiene también la capacidad de resolver sistemas eléctricos sencillos y diversos elementos de control útiles, como controladores de tipo PID, tablas de interpolación, funciones genéricas programadas en Python o generadores de números aleatorios, aunque estas funciones aun no se encuentran completamente implementadas ya que el programa aún se encuentra en proceso de desarrollo.

3.5 Referencias

- [13] *Enciclopedia Ilustrada de la Aviación Vol.5 pags. 1098-1099*. Editorial Delta, 1982 (vid. pág. 19).
- [14] Edward H Phillips. *Wings of Cessna, Model 120 to the Citation III*. 1986 (vid. págs. 20, 21).
- [15] Prof. Asignatura. "Mecánica de vuelo-Procedimientos₀₂". En: (2019) (vid. pág. 21).
- [16] Federal Aviation Administration. "TYPE CERTIFICATE DATA SHEET NO. E-252". En: (2017) (vid. pág. 24).
- [17] OACI. "Anexo 16, Vol II". En: (2015) (vid. pág. 25).

Capítulo 4

Ciclo Oxicombustión

4.1 Estado Actual

4.1.1 Procesos Actuales

La industria, hoy en día, es capaz de realizar procesos para los que es necesaria una provisión constante de oxígeno, tales como tratamientos metalúrgicos o depuración de aguas.

Esta generación se realiza habitualmente mediante técnicas VPSA (Vacuum Pressure Swing Adsorption), este sistema está compuesto como se puede ver en la figura 4.1 por dos tamices moleculares capaces de separar el nitrógeno del oxígeno dejando fluir éste último para ser almacenado posteriormente.

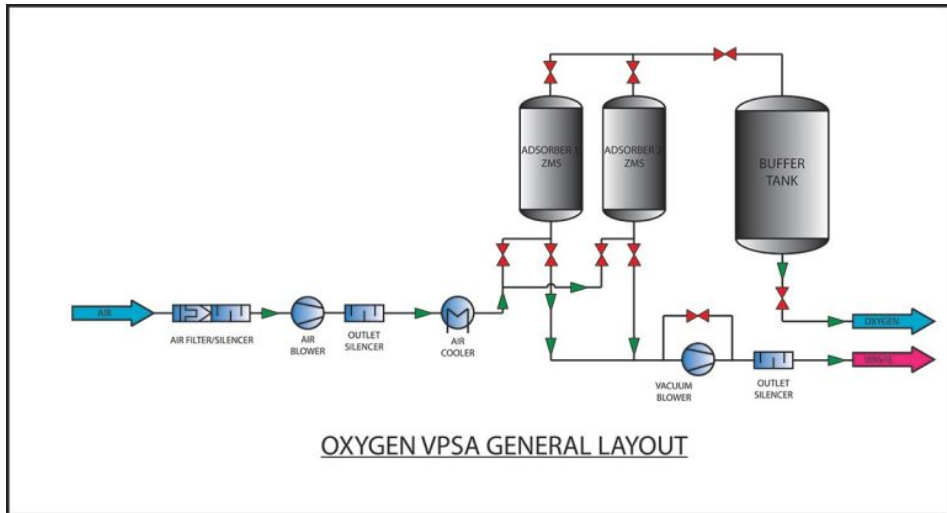


Figura 4.1: Ciclo VPSA [18]

Su principio de funcionamiento consiste en hacer fluir aire a través de uno de estos tamices hasta que se sature por acumulación de nitrógeno, momento en el cual no es capaz de filtrar más oxígeno. Mediante un sistema de valvulería se pasa el flujo de aire al otro tamiz, que se encuentra vacío. Al mismo tiempo se activa el circuito de vacío implementado por una bomba que succiona el tamiz saturado, extrayendo el nitrógeno acumulado. Cuando el segundo tamiz se satura se realiza el proceso inverso conectando la bomba de vacío a este punto y haciendo fluir el flujo de aire por el primer tamiz.

Este sistema tiene varias ventajas como la pureza del oxígeno producido, entre el 90 % y el 95 %, control estable de la producción de oxígeno y poco consumo energético y mantenimiento.

Sin embargo, hoy en día este proceso requiere de instalaciones voluminosas, lo que hacen imposible su implementación en la pequeña industria o el transporte.

Otro sistema de alimentación de oxígeno llevado a cabo hoy en día es el uso de oxígeno criogénico, sin embargo para el uso de este recurso es necesario un costoso sistema de almacenamiento y la dependencia de la industria productora de este recurso, por ello actualmente no es viable para el transporte y pequeña industria.

4.1.2 Oxygen Transport Membrane

Las Oxygen Transport Membrane (OTM) son una de las opciones tenidas en cuenta para llevar la producción 'in situ' de oxígeno al transporte y pequeña industria.

Debido a las ventajas, tanto económicas como mediambientales, que supondrían la implementación de estas membranas, en los últimos años se ha investigado profundamente en la mejora de la eficiencias de este sistema, así como su proceso de fabricación abarantando sus costes.

Se han presentado numerosas formulaciones de compuestos para realizar estas membranas, sin embargo las membranas BSFC ($Ba_{0,5}Sr_{0,5}Co_{0,8}Fe_{0,2}O_{3-8}$) presentan una de las mas altas tasas de producción de oxígeno estable para una superficie viable para ser utilizada en pequeños motores.

Investigaciones referidas al desarrollo de estos sistemas han conseguido representar el comportamiento de estas membranas por medio de ecuaciones empíricas como la Ecuación 4.1 que relaciona el flujo de oxígeno a través de la membrana con el área y espesor de la misma y las condiciones termodinámicas de su entorno [19].

$$m_{O_2} = 1,041 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{A_{mem} \cdot P_{MO_2} \cdot e^{\frac{-6201}{T_{mem}}} \cdot T_{mem}}{e_{mem}} \cdot \ln \frac{P_{O_2feed}}{P_{O_2permeant}} \quad (4.1)$$

Como se puede observa en la Ecuación 4.1 el flujo másico de oxígeno aumenta con la temperatura de la membrana y con el aumento del ratio de presiones parciales entre ambos lados de la membrana, además de linealmente con el aumento del area.

Para que esta producción sea estable y suficiente para un área máxima dada es necesario que las temperaturas se encuentren entre 600°C y 1000°C, punto en el cuál los materiales de la membrana no son capaces de soportar las temperaturas.

También, como muestra la Ecuación 4.1, es necesario que la presión parcial de oxígeno en la alimentación sea más alta que en la parte impermeable y cuanto más alta sea más alta será la transmisión.

Estas tendencias se pueden observar en la figura 4.2, donde muestra un estudio paramétrico realizado en dicha membrana variando tanto la presión de alimentación como la temperatura de membrana, mostrandose en el eje de ordenadas el flujo de oxígeno en unidades molares.

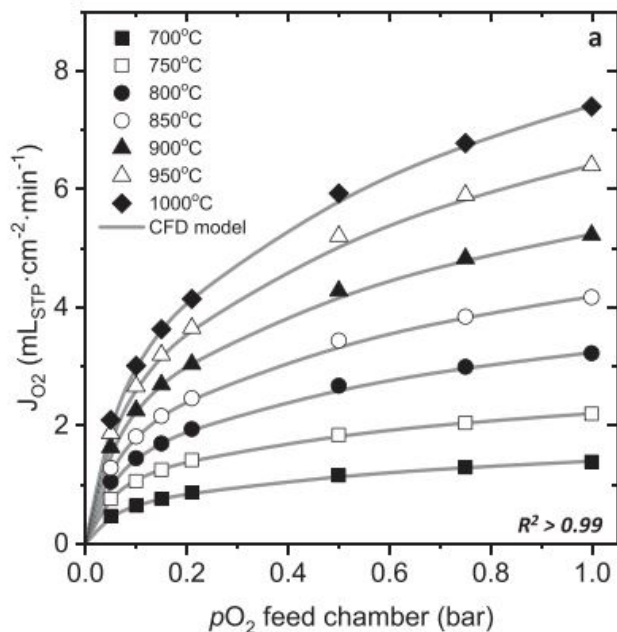


Figura 4.2: Estudio paramétrico del comportamiento de membrana BSFC

Este estudio se ha realizado con la tipología de membrana mostrada en la figura 4.3, sin embargo también existen otras clases de tipologías como la mostrada en la figura 4.4 donde la membrana se dispone formando tubos.

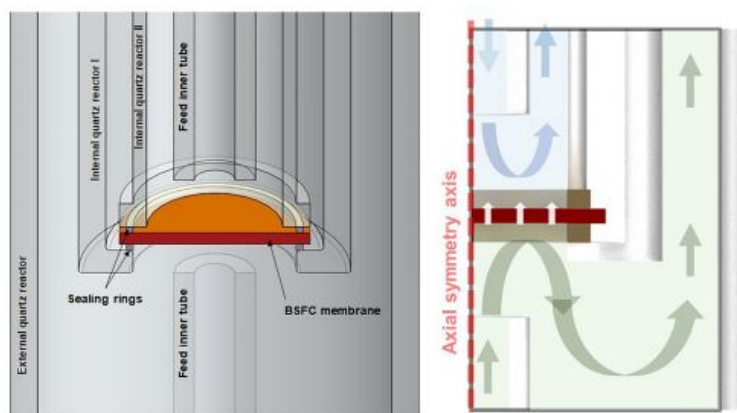


Figura 4.3: Membrana en forma de disco

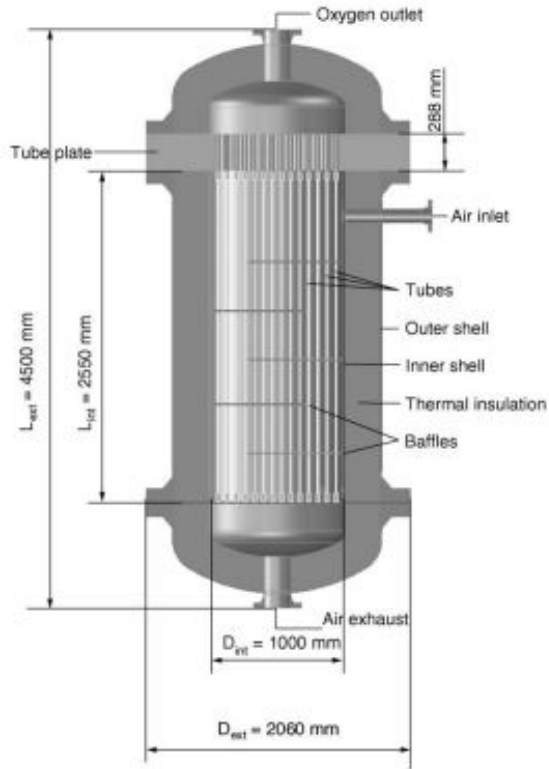


Figura 4.4: Membrana en tipología Tubular

Tipología tubular

Estudios como el dado en la referencia [20] han demostrado que la forma tubular sería la elección óptima para los casos en los que un gas pobre en oxígeno barra la membrana por la parte impermeable, tal y como sucede en un estudio de motor alternativo.

En el mismo artículo se presenta un detallado estudio sobre como debe disponerse la membrana dentro del módulo tubular, distinguiendo cuatro diferentes modelos.

1. Disposición en Fibras Huecas

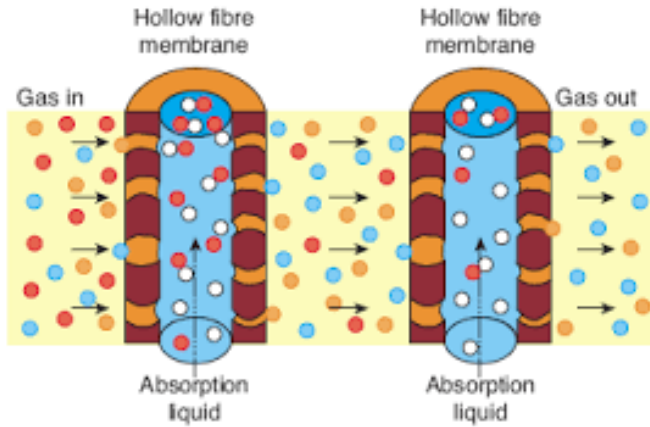


Figura 4.5: Membrana dispuesta en fibras huecas

La disposición de membrana mostrada en la figura 4.5 consiste en la colocación de capilares huecos formados por membrana BSFC, de manera que el aire se haría pasar por fuera de las fibras y el oxígeno quedaría atrapado dentro de los mismos siendo posteriormente arrastrado por el flujo pobre de oxígeno.

2. Disposición en un solo tubo

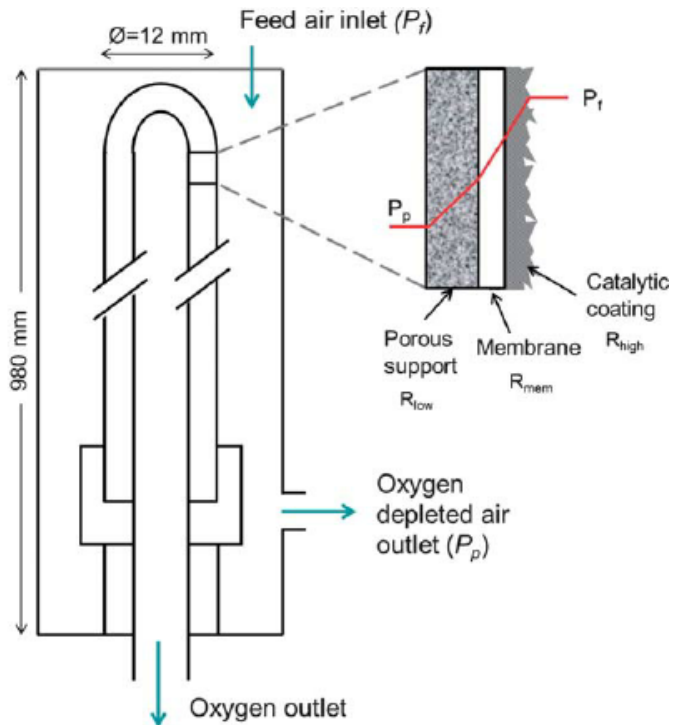


Figura 4.6: Membrana dispuesta en un solo tubo

En el caso de la figura 4.6 la membrana se distribuiría en las paredes de un único tubo hueco. Por el exterior del mismo se haría pasar el aire, provocando que el oxígeno fluya hacia su interior.

3. Disposición en Monolito multiperforado

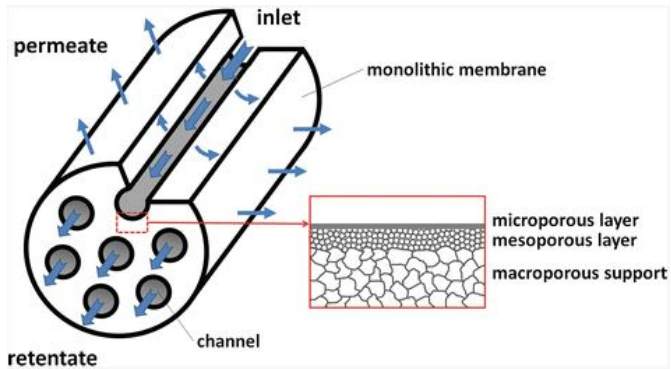


Figura 4.7: Membrana dispuesta en un monolito multiperforado

En la figura 4.7 se presenta un cilindro macizo de membrana multiperforado por pequeños canales por los que se hace pasar el aire a presión, esto permite que el oxígeno fluya hacia el exterior pudiendo ser arrastrado por el flujo pobre en oxígeno.

4. Disposición en Membrana Tubo-Plato

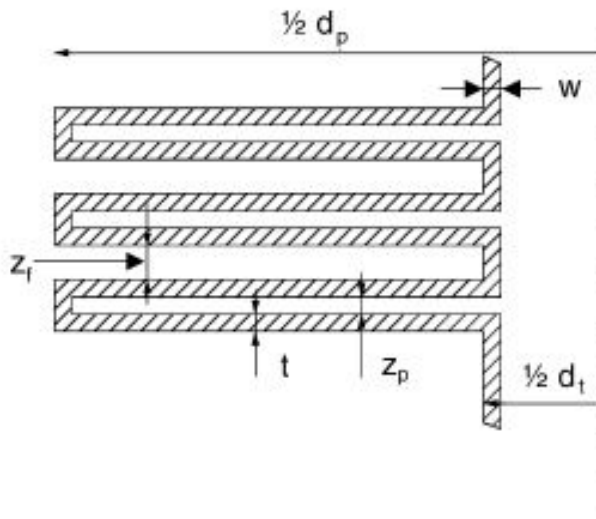


Figura 4.8: Membrana con disposición Tubo-Plato

En la figura 4.8 el aire fluiría por los conductos de la parte izquierda de la imagen, haciendo que el oxígeno fluyera hacia la parte derecha pudiendo ser arrastrado por el flujo pobre de oxígeno

Los valores más altos de área específica de membrana (cantidad de m^2_s de membrana que se pueden obtener de cada m^3 de BSFC) se obtienen en la disposición monolítica, sin embargo, la fabricación de este tipo de membrana es destacablemente más costosa que la de todas las demás.

4.2 Elementos necesarios

En este punto del proyecto se va a introducir el esquema general de motor sobre el que se van a implementar las diferentes tipologías. Este esquema tratará de satisfacer los requerimientos necesarios para que el flujo llegue a la membrana en condiciones óptimas para maximizar el flujo de oxígeno.

Como se ha explicado en el apartado anterior, es necesario que el flujo de entrada llegue a la membrana con una temperatura dada, muy superior a la temperatura ambiente, por tanto es necesario que este flujo sea calentado en el conducto de admisión.

Por consiguiente, será necesario el uso de un dispositivo que caliente este flujo. Este puede ser un calentador independiente o un regenerador que aproveche el calor del flujo de escape.

También, como se ha visto en la Ecuación 4.1, comprimir el flujo de entrada resulta beneficioso para la producción de oxígeno, para ello se dispondrán elementos como compresores o turbogrupos que realicen esta tarea.

Además se observa como la no presencia de oxígeno en la parte impermeable favorece la transmisión del mismo de una parte a otra.

Puesto que el motor en cuestión funciona como un MEP su dosado relativo es igual a la unidad y la presencia de oxígeno en el escape es prácticamente nula, por ello utilizar el EGR para que barra la membrana ayudará en esta cuestión, además colaborará en mantener altas temperaturas en la membrana.

En la figura 4.9 se representa un primer esquema general de como debe ser el motor Oxi-Combustión.

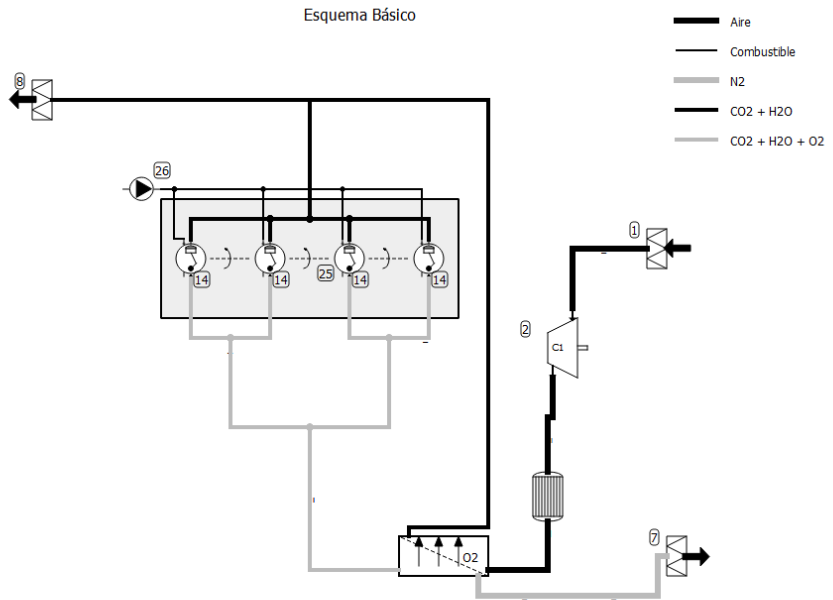


Figura 4.9: Esquema básico de un ciclo Oxi-Combustión

En los capítulos siguientes se buscará la optimización de este esquema general, de forma que se obtenga el máximo rendimiento posible en la potencia del motor de estudio con un peso que sea viable para la aeronave seleccionada.

4.3 Referencias

- [18] Maruti Corporation. *Planta VPSA*. URL: <http://vpsaoxygenplant.com/> (visitado 12-04-2020) (vid. pág. 30).
- [19] D. Catalán-Martínez; A. Santafé-Moros; J.M. Gozálviz-Zafrilla; J. García-Fayos; J.M. Serra. "Characterization of oxygen transport phenomena on BSCF membranes assisted by fluid dynamic simulations including surface exchange". En: *Chemical Engineering Journal* (2020) (vid. pág. 31).
- [20] Jaap F. Vente; Wim. G. Haije; Ruud IJpelaan; Frans T. Rusting. "NO on the full-scale module design of an air separation unit using mixed ionic electronic conducting membranes". En: *Journal of Membrane Science* (2005) (vid. pág. 33).

Capítulo 5

Diseño Preliminar

En el presente capítulo se van a presentar las diferentes ideas que han surgido a la hora de confeccionar el layout definitivo del motor Oxi-Combustión siguiendo con las tendencias presentadas en el capítulo anterior.

5.1 Diseños propuestos

La optimización del esquema general de funcionamiento se ha basado en la minimización del consumo del conjunto, siempre que la potencia dada por el motor de aire original se mantuviera.

Otro punto importante en la optimización del esquema ha sido la minimización del área de membrana necesaria para llevarlo a cabo, de manera que resulte económicamente y físicamente viable su producción.

También se han establecido límites térmicos y mecánicos en elementos críticos del sistema, los cuales se muestran en la tabla 5.1.

Límites	Membrana	Turbina	Cilindros
Presión [Bar]	8	-	105
Temperatura [°C]	950	1000	3000

Tabla 5.1: Límites termo-mecánicos impuestos

En principio, se descartará la idea de la obtención de la energía necesaria para calentar y comprimir el flujo entrante mediante sistemas externos al motor como calentadores o compresores eléctricos, ya que es posible extraer esta energía del mismo motor.

Las ideas principales que han surgido han sido las siguientes:

En cuanto a la necesidad de aumentar la presión del flujo entrante a la membrana se deben buscar zonas donde la presión sea mayor que en el flujo de aire. Las opciones entonces serían las siguientes:

- Turbosobrealimentar el aire de admisión con los gases de escape de los cilindros.
- Turbosobrealimentar el aire de admisión con el nitrógeno saliente de la membrana.

En cambio, para implementar el necesario aumento de temperatura de este flujo de entrada a la membrana es necesario extraer calor de zonas más calientes. Se plantean las siguientes ideas:

- Extraer el calor del flujo de salida de los cilindros para calentar el flujo de aire.
- Extraer el calor del flujo de nitrógeno para calentar el flujo de aire.
- Extraer el calor del flujo rico en oxígeno saliente de la membrana para calentar el flujo de aire.

5.2 Comparación

En primer lugar, atendiendo a las limitaciones de temperatura impuestas a la entrada de turbina, se deduce, que no es viable la colocación de un turbogrupo a la salida de los cilindros si buscamos que en la membrana haya la máxima temperatura posible, en este caso 950 °C. Por lo tanto, se descartará esta idea siempre que se mantengan estas condiciones límite.

En cuanto a los regeneradores de calor, se ha observado mediante cálculos realizados con VEMOD que el sistema no puede funcionar de forma continua si no se instalan los regeneradores de Salida de Cilindros-Aire, Nitrógeno-Aire y Admisión a Cilindros-Aire. Quedaría pues un grado de libertad en la colocación o no de un cuarto regenerador, que se encargaría de extraer calor del flujo de escape y calentar el flujo de aire.

La colocación de estos regeneradores se debe imponer según la temperatura del flujo que intercambia. Como primera iteración se colocarán de la siguiente manera, en dirección a la entrada a membrana, Nitrógeno-Aire, Admisión a Cilindros-Aire y Salida de Cilindros-Aire. Posteriormente, se comprobará si esta colocación es correcta.

Finalmente, para que el rendimiento volumétrico no decaiga en exceso, también se dispondrá de un cooler conectado con el ambiente, a continuación del regenerador Admisión a Cilindros-Aire.

Teniendo esto en cuenta, el lay-out a optimizar en este punto viene representado en la figura 5.1.

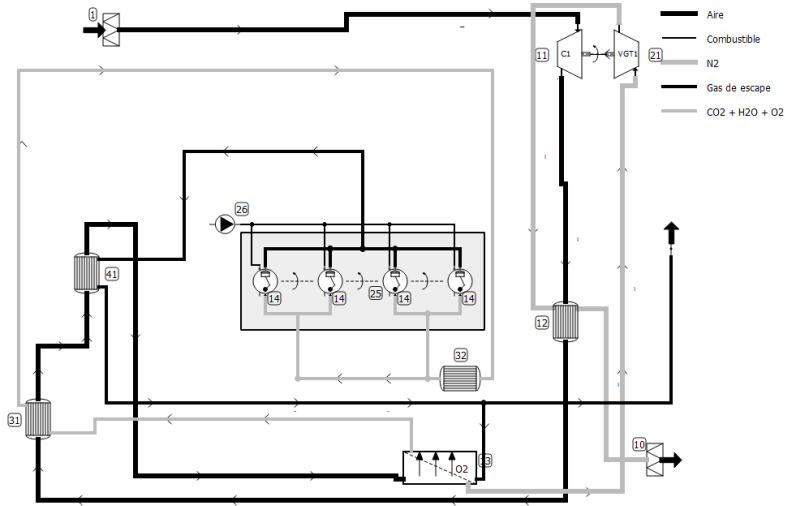


Figura 5.1: Esquema preliminar a optimizar

Realizando un primer cálculo en VEMOD se obtienen los siguientes valores característicos, mostrado en las tabla 5.2 y tabla 5.3.

Layout	Potencia [kW]	BSFC [g/kWh]	Área Membrana [m ²]
Sin Regenerador	69.69	275.39	12
Con Regenerador	71.35	271.4	12

Tabla 5.2: Estudio de utilización de un cuarto regenerador

Layout	T.Membrana [°C]	P.Inlet Membrana [Bar]	T.Turbina [°C]	P.Máxima [Bar]	T.Máxima[°C]
Sin Regenerador	945.215	2.348	852.52	89.94	2359.93
Con Regenerador	949.364	2.375	854.36	90.17	2368.72

Tabla 5.3: Estudio de límites termo-mecánicos en la utilización de un cuarto regenerador

Se observa como disponer de un cuarto regenerador mejora el comportamiento del motor, es por ello que se mantendrá su colocación, sin embargo, se debe tener en cuenta que esta acción añade un extra de peso.

También se observa como no se superan los límites termo-mecánicos impuestos.

Continuando con el proceso de mejora, se observa como la presión en la parte de aire de la membrana, es aún baja en comparación con el límite mecánico impuesto. Puesto que el flujo de nitrógeno aún tiene capacidad para ser expandido tras este primer turbocompresor, se considerará la colocación de una compresión en doble etapa entre la línea de aire y nitrógeno. De esta manera, si la presión aumenta, será posible disminuir el área de membrana para un mismo gasto de oxígeno, siguiendo las tendencias de la Ecuación 4.1.

Para colocar este segundo compresor será necesario colocar otro cooler entre medias de ambos compresores, para que el proceso de compresión se realice de la manera más eficiente posible.

Los datos comparativos entre una etapa o dos etapas de compresión se presentan en la tabla 5.4 y tabla 5.5.

Layout	Potencia [kW]	BSFC [g/kWh]	Área Membrana [m ²]
Sin Regenerador	69.69	275.39	12
Con Regenerador	71.35	271.4	12
Doble Etapa de Compresión	131.564	281.36	5

Tabla 5.4: Estudio de utilización de una compresión en doble etapa

Layout	T.Membrana [°C]	P.Inlet Membrana [Bar]	T.Turbina [°C]	P.Máxima [Bar]	T.Máxima[°C]
Sin Regenerador	945.215	2.348	852.52	89.94	2359.93
Con Regenerador	949.364	2.375	854.36	90.17	2368.72
Doble Etapa de Compresión	947.46	5.94	939.47	100.01	2181.6

Tabla 5.5: Estudio de límites termo-mecánicos en la utilización de una compresión en doble etapa

5.3 Conclusiones

Como se puede observar en la tabla 5.4, la utilización de una compresión en doble etapa es beneficiosa para la producción de oxígeno, aunque no mejora el consumo del motor.

Sin embargo, la implantación de este sistema será beneficiosa para incrementos puntuales de potencia, como ocurre en los despegues o ascensos, ya que, como se puede observar, la potencia máxima se incrementa prácticamente al doble.

Otro punto importante para elegir esta tipología, es la clara reducción del área de membrana necesaria para que el motor pueda operar, reduciéndose ésta desde los 12 m² utilizados con un turbogrupo hasta los 5 m² con los que se podría operar si se

utiliza la doble etapa de compresión. Esta reducción, supone una reducción destacable en el peso de la planta propulsora, pero además, supone un claro ahorro económico en la producción de membrana BSFC, aunque éste aun no se pueda cuantificar.

Sin embargo, como se verá en capítulos posteriores, la implantación de la doble etapa impone un claro aumento de peso por el segundo turbogruppo y el cooler dispuesto entre ambos compresores. Además añadiría un extra de gasto en el mantenimiento del motor, que aunque no vaya a ser estudiado en este proyecto, debería ser tenido en cuenta para trabajos futuros.

Para terminar con el diseño preliminar, se debe comprobar si la colocación de los regeneradores es correcta. Esta condición se cumplirá si las temperaturas de entrada a estos regeneradores crece progresivamente en la medida en la que están colocados en la línea de aire. Este hecho comprueba que el calor sea absorbido por el flujo de admisión de la membrana y no al revés. Como se puede comprobar en la tabla 5.6 la colocación de los regeneradores es correcta.

Regenerador	Temperatura de entrada [°C]
Escape-Aire	182.91
Nitrógeno-Aire	434.51
Salida de membrana-Aire	577.5
Salida de cilindros-Aire	729.048
Entada Miec	939.6

Tabla 5.6: Temperatura a la entrada de los regeneradores en la línea de aire

Capítulo 6

Diseño avanzado

6.1 Introducción

Como se ha observado en el capítulo anterior, la tipología óptima de motor sería la que utiliza los siguientes elementos.

- 2 Turbogrupos entre admisión y línea de nitrógeno

El primero de ellos localizado inmediatamente después de la admisión y conectado con la línea de nitrógeno, éste será denominado como turbogrupo de baja presión.

El segundo se localiza a continuación de éste y también se conecta a la línea de nitrógeno, se denominará turbogrupo de alta presión.

- 2 Intercooler

El primero de ellos se localiza entre los dos turbogrupos en la línea de admisión y el segundo se dispone en la admisión a los cilindros.

- 4 Regeneradores de calor

Nombrados en orden de localización a lo largo de la línea de admisión de aire, el primero de ellos se conecta con la línea de gases de escape recogiendo el calor residual de dicho flujo, el segundo con la línea de nitrógeno y recoge el calor residual tras ambas turbinas, el tercero se conecta con la línea de admisión a los cilindros ayudando a enfriar dicho flujo y el cuarto se dispone a la salida de los cilindros ayudando que la temperatura en la membrana no supere el umbral de los 950 °C.

De esta manera la tipología de motor Oxi-Combustión a optimizar en este proyecto será la representada en la figura 6.1.

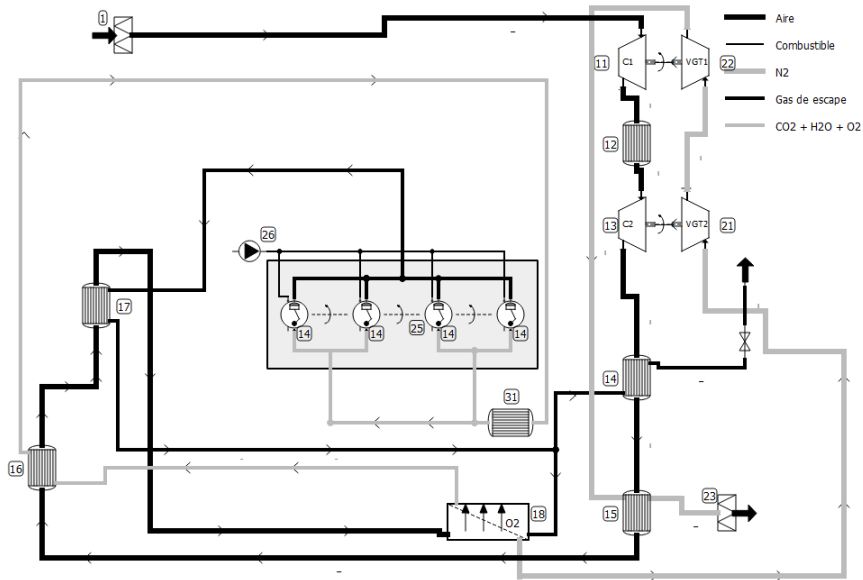


Figura 6.1: Layout definitivo del motor Oxi-Combustión

6.2 Sistema de control

El control de este motor se ha llevado a cabo por medio de controladores PID. Éstos se encargarán de recoger el valor de una variable de entrada medida mediante sensores dispuestos en el elements de interés y proporcionar una respuesta implementada en un actuador para que este valor de entrada sea el exigido a PID.

El control de este sistema es bastante complejo ya que los efectos de las variables de actuación se encuentran acoplados en diferentes variables de respuesta. Por ellos cobra gran importancia la elección de dichas variables para que los efectos sobre las mismas se puedan independizar lo máximo posible.

Las variables de entrada elegidas son las mostradas a continuación.

- Potencia al eje

Controlada mediante la apertura de la turbina de baja presión que provocará el aumento de la presión en la parte de admisión de oxígeno de la membrana, esto causará el aumento en el flujo másico de oxígeno y por tanto el aumento de potencia.

Se debe resaltar que debido a limitaciones del programa VEMOD no ha sido posible elegir la potencia de salida como una variable, es por ello que el grado de carga se escala con la presión tras el compresor de baja presión.

- Igualdad de relación de compresión en ambos compresores

Controlada mediante la apertura de la turbina de alta presión

- Tasa de dilución de gases de escape y oxígeno

Controlada por el cierre de una válvula localizada en la línea de escape, de manera que controla el aumento o disminución de la presión en la zona impermeable de la membrana y por tanto la producción de oxígeno.

Cuanta más presión haya en el lado permeable menor será la proporción de oxígeno en la mezcla.

- Valor límite de temperatura en la membrana

Controlado mediante el límite máximo de proporción de oxígeno en la mezcla, cuanto mas alto sea este límite mayor será la temperatura en la membrana.

- Control del transporte de calor desde la línea de escape a la línea de admisión de aire.

Este control está implementado con una válvula de by-pass sobre el regenerador en la salida de los cilindros y ayuda a evitar que la transmisión de calor se realice de manera inversa a como esta diseñada, haciendo que si la temperatura en la línea de los gases EGR es menor que que en la línea de admisión de aire este by-pass se abra la haga subir para, como mínimo, mantener la igualdad en esas temperaturas.

- Presión máxima en cilindro.

Controlada mediante el ángulo de inicio de la combustión.

6.3 Estudios de optimización

En este apartado se va a contemplar la optimización de ciertos elementos y valores impuestos con la finalidad de reducir el consumo global del motor.

6.3.1 Optimización de turbogrupos

El diseño y mapa, tanto de turbina como de compresor, de los turbogrupos están tomados de los datos proporcionados por el departamento del motor HR13 de Renault, sin embargo, puesto que el motor de estudio dispone del doble de cilindrada se presupone que los valores de caudal serán diferentes, por lo que será necesario adaptar la escala de estos turbogrupos a las necesidades del motor de estudio.

Por limitaciones del programa VEMOD el escalado de turbina y compresor tienen que ser iguales, por tanto solo se puede optimizar uno de los dos elementos, en este caso se ha optado por la optimización del compresor.

Puesto que se espera que el motor opere, en este caso, a bajas cargas y bajo régimen de giro, se optimizará para que el máximo rendimiento se obtengan con estas características pero que para el resto del mapa de operación el rendimiento decaiga lo mínimo posible evitando las zonas de bombeo y choque.

En las figura 6.2 y figura 6.3 se presentan los mapas de compresor optimizados junto con los dos puntos de operación límites del mapa motor que corresponden al grado máximo, representado con el punto a mayor relación de compresión y mínimo de carga, mostrado en el punto de menor relación de compresión.

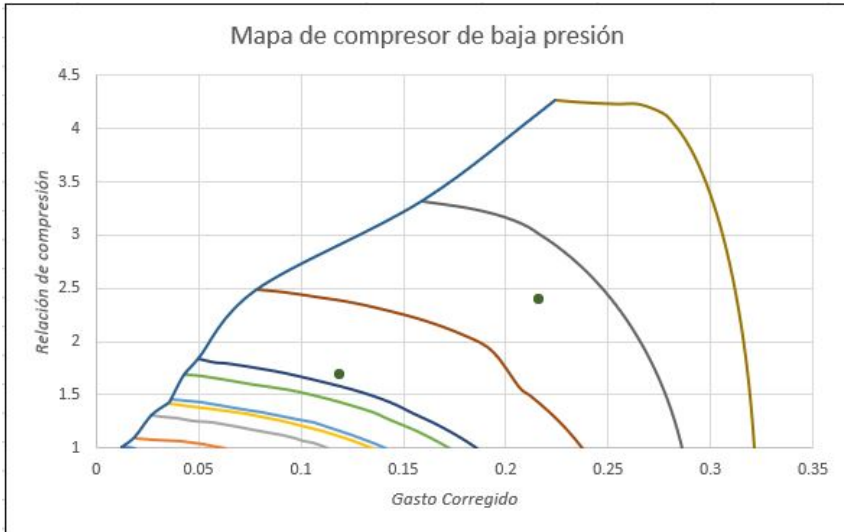


Figura 6.2: Mapa de compresor de baja presión optimizado con puntos de operación límite

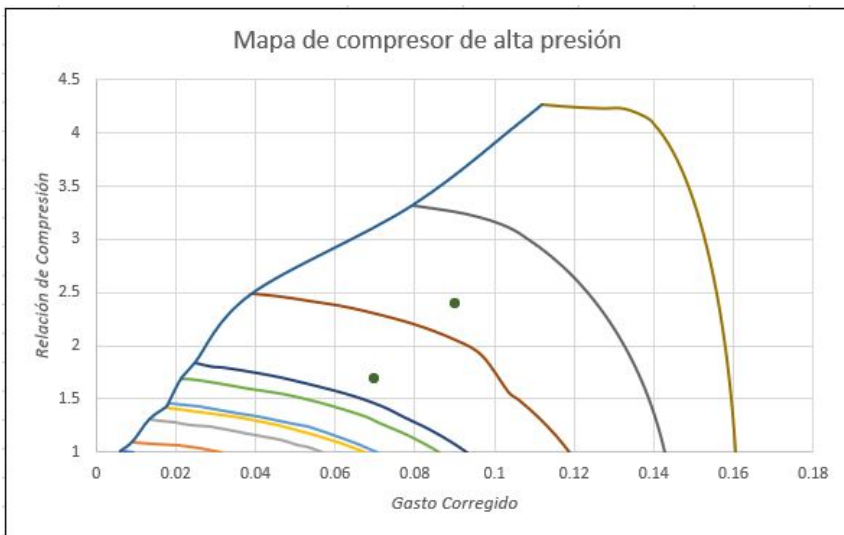


Figura 6.3: Mapa de compresor de baja presión optimizado con puntos de operación límite

Estos mapas muestran los compresores escalados a 1.8 veces el caudal corregido del motor HR13 para el compresor de baja presión y 0.9 veces para el compresor de alta

presión obteniendo eficiencias de 0.735 y 0.739 respectivamente para el punto de mínima carga.

6.3.2 Optimización de la mezcla de admisión

Puesto que se ha establecido la fracción másica de oxígeno como una variable modificable, siempre que no se superen los valores límites de temperatura establecidos, es posible realizar un estudio de optimización respecto a este parámetro con la finalidad de minimizar el consumo del motor.

El estudio se llevará a cabo en el régimen de 2000 rpm y mínima carga de forma que la optimización transcurra en el punto de operación de vuelo de crucero.

Los resultados obtenidos se muestran en las figura 6.4 y figura 6.5

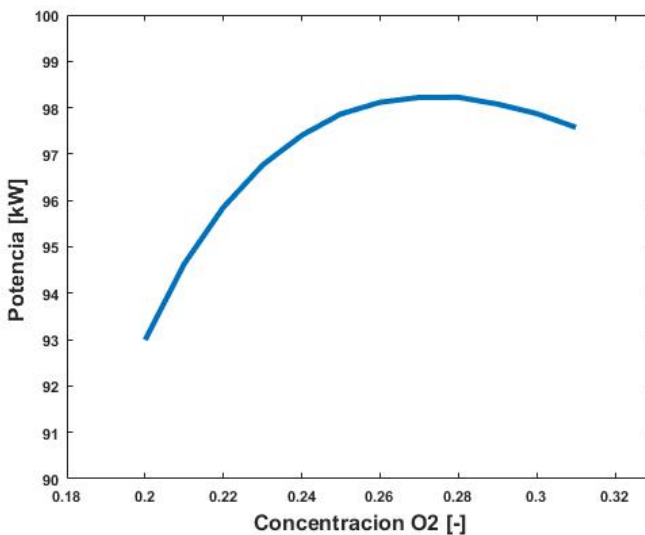


Figura 6.4: Barrido de Potencia

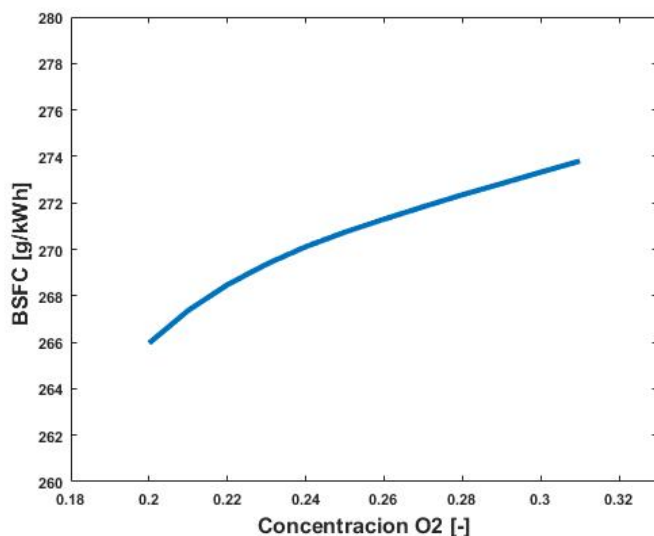


Figura 6.5: Barrido de Consumo

Como se puede observar, tanto potencia como consumo, son decrecientes con el aumento de fracción másica de oxígeno en la admisión a cilindros, sin embargo si la fracción de oxígeno es demasiado pequeña el motor con conseguirá arrancar pues el calor generado en la combustión será absorbido en su totalidad por los gases de EGR. Por tanto la fracción de oxígeno óptima seleccionada será de 0.22.

Este valor deberá de ser contrastado con estudios futuros referidos al desarrollo de la combustión de motores Oxi-Combución.

6.4 Mapa de operación del motor

En la figura 6.6 se muestra el mapa completo de operación del motor, donde se presentan las prestaciones del motor para diferentes regímenes y grados de carga.

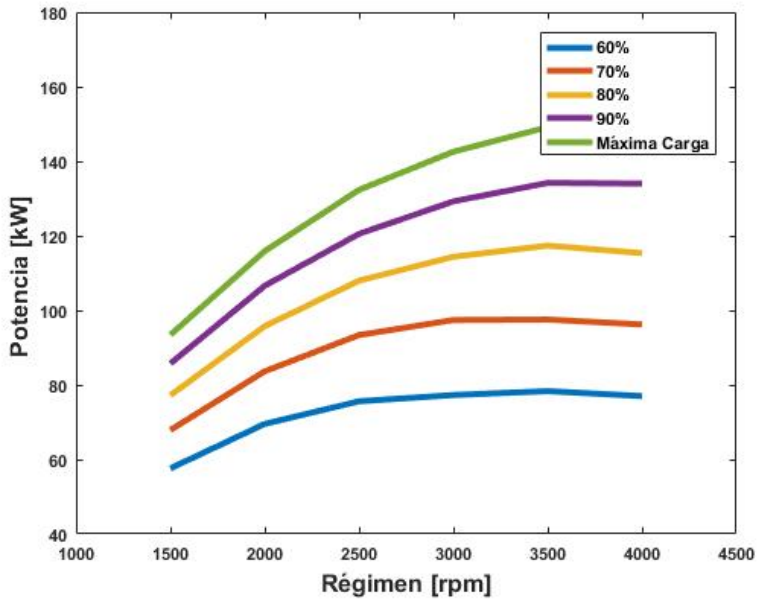


Figura 6.6: Potencia del motor Oxi-Combustión a distinto régimen y grado de carga

Se debe destacar que el grado de carga varía mediante la relación de compresión de ambos compresores, en este caso varía entre 1,7 y 2,5 bares siendo estos límites elegidos por estabilidad en el arranque y por límites estructurales de la membrana.

Como se puede observar en la figura 6.7 el rendimiento para bajas cargas no disminuye, incluso mejora. Esta tendencia es contraria a como sucedería en un motor de gasolina convencional debido a la diferencia en el método de variación de grado de carga, ya que, en este caso, se prescinde de la válvula estranguladora en la admisión que provoca la caída del rendimiento volumétrico y por consiguiente hace aumentar el consumo.

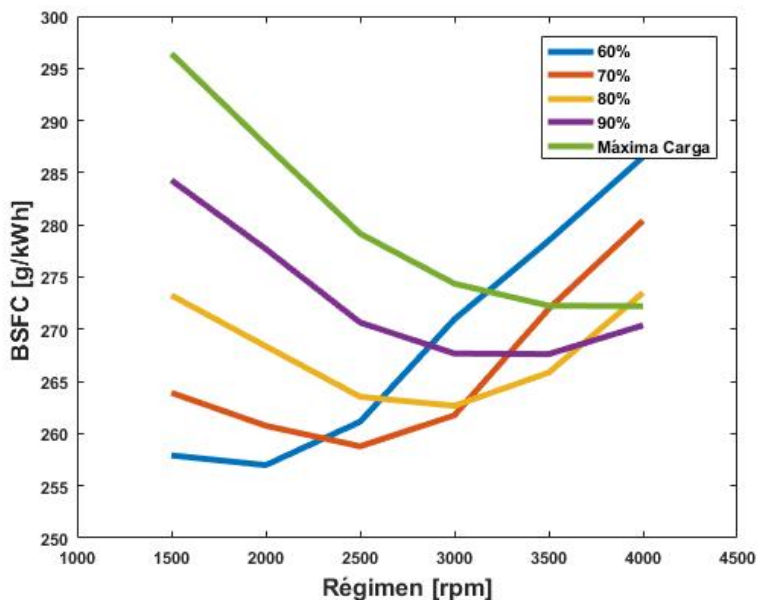


Figura 6.7: Consumo del motor Oxi-Combustión a distinto régimen y grado de carga

Finalmente se debe observar que el óptimo de rendimiento en el mapa de operación se localiza a bajas cargas y a bajo régimen donde el avión va a operar en crucero.

6.5 Estudio del motor Oxi-Combustión en los tramos de Despegue y Ascenso

Las prestaciones exigidas al motor en los tramos de despegue y ascenso se encuentran representadas en la tabla 3.8, la cual representa las mismas etapas del ciclo LTO de certificación.

El despegue de cualquier aeronave de ala fija se define como el tramo desde que el avión comienza la carrera de despegue con velocidad nula hasta que se sitúa a una altura de 35 pies sobre el nivel del suelo, en el transcurso de ese trayecto es necesario que el avión, adquiera como mínimo, la velocidad de rotación que permite utilizar los controles aerodinámicos para el control de la actitud de la aeronave.

La ecuación que modeliza la distancia necesaria para el despegue viene representada en la Ecuación 6.1, la cual se obtiene integrando las ecuaciones diferenciales de la

mecánica de vuelo unidimensionales, dadas en el (anexo tal) aplicando la hipótesis de pequeños ángulos de ataque y pendiente de ascenso.

Esta ecuación se divide en dos sumandos, denominados como distancia de rodaje, definida como la distancia en la que el avión tiene en pista todas las ruedas del tren de aterrizaje y distancia de transición, definida como la distancia entre el final del rodaje y el punto donde el avión se encuentra a 35 pies sobre el suelo [21].

$$X_{TO} = \frac{-W_{TO}}{g\rho S_w(CD_{TO} - \mu_{TO}CL_{TO})} \ln \left(1 - \frac{\rho S_w(CD_{TO} - \mu_{TO}CL_{TO})v_{Rot}^2}{2(T - \mu_{TO}W_{TO})} \right) + 3,3v_{Rot} \quad (6.1)$$

Donde CL_{TO} se estima algo por encima del CL de crucero, en este caso será de 0.5 y puesto que el tren de aterrizaje no es retráctil, el CD_{TO} se estimará según la polar parabólica de coeficientes constantes, en este caso será 0.0537.

También se tendrá en cuenta un descenso en el rendimiento propulsivo de la hélice respecto al caso del vuelo en crucero, situándose éste en 0.4

En el caso de la densidad se tomará la altura a nivel del mar para el despegue y se modelizará la superficie de despegue según una pista de asfalto o hormigón con un μ de 0.02.

La v_{Rot} que es igual a 1.2 veces la v_{Stall} tendrá un valor de 98 km/h.

Para el caso del empuje se debe señalar que tiene una dependencia directa con la velocidad, sin embargo en este caso, se estimará constante con el valor dado para la velocidad media en el tramo de despegue, 72 km/h.

$$T = \eta_h \frac{P_n}{v} \quad (6.2)$$

Con todas estas consideraciones se obtiene que la carrera de despegue tiene una longitud de 196.68 metros, esto contrasta con la longitud de pista con el motor de aire, que necesitaría una pista de 357.62 metros para realizar el despegue.

El cálculo del tiempo necesario para el despegue es trivial a partir de la ecuación del movimiento rectilíneo uniformemente acelerado entre 0 y 196.68 metros.

$$t_{TO} = \sqrt{\frac{2X_{TO}W_{TO}}{T}} = 30,6s = 0,51min \quad (6.3)$$

Para el caso del ascenso se tendrán en cuenta ciertas hipótesis. La primera de ellas será la de mantener la densidad del medio constante durante todo el ascenso ya que

de 0 a 1070 metros, donde se sitúa la altitud de crucero, la variación de densidad es del 9.38 %. También se considerará que el peso del avión no varía desde el despegue, esta aproximación será válida cuando el tiempo invertido en esta fase sea pequeño comparado con el tiempo total de vuelo.

La velocidad de ascenso se mantendrá constante. La ascensión se realizará a velocidad aerodinámica constante y una vez llegada a la altitud de crucero se acelerará hasta la velocidad de crucero. Se debe comentar que un ascenso típico no tiene esta trayectoria, sin embargo simplifica mucho los cálculos,

Para el cálculo de la velocidad ascensional se volverá a recurrir a las ecuaciones de la mecánica de vuelo con las mismas hipótesis utilizadas anteriormente, siendo la potencia nominal entregada por el motor el 0.8 de la potencia máxima. El valor de la velocidad ascensional vendrá dado de la resolución de Ecuación 6.4, la cual se trata de una ecuación de cuarto grado por lo que habrá que despreciar tres de las soluciones.

$$\rho S_w C D_0 v_z^4 + \eta P_n v_z = \frac{4kW^2}{\rho S_w} \quad (6.4)$$

Obteniendo como única solución válida $v_z = 4.8$ m/s, lo que contrasta que los 3.4 m/s mostrados en las prestaciones de la aeronave utilizada.

La obtención del tiempo de ascenso es un poco más complicada que en el caso del despegue pero igualmente sencilla de calcular, expresado en la Ecuación 6.5

$$t_{as} = \frac{h_c}{v_z} + \int_{v_{rot}}^{v_c} \frac{W}{\eta_h \frac{P_n}{v} - \frac{1}{2} \rho v^2 S_w (C D_0 + k (\frac{2W}{\rho S_w v^2})^2)} dv = 6,33 \text{min} \quad (6.5)$$

Por lo tanto y según los resultados obtenidos en este apartado se puede concluir que el motor Oxi-Combustión sería válido para las especificaciones requeridas, especialmente en el tramo de despegue donde sería viable reducir la longitud de pista necesaria para el despegue en comparación con la utilización del motor de aire.

En el tramo de ascenso se observa como es necesaria la inversión de 4 minutos más que en el tiempo mostrado en el ciclo LTO, sin embargo el ciclo LTO culmina con una altura de 2000 pies sobre el suelo y no dispone de tramo de aceleración, por lo que para el tramo equivalente con este motor sería necesario invertir 2.11 minutos haciendo viable su utilización.

6.6 Referencias

- [21] Prof. Asignatura. “Mecánica de vuelo-TEMA-06-Despegues”. En: (2019) (vid. pág. 54).

Capítulo 7

Estudio de Viabilidad y conclusiones

En este capítulo se proceder a comparar el motor Oxi-Combustión optimizado en el apartado anterior con la unidad de potencia presente actualmente en la aeronave, para ello se utilizará el rango de vuelo del avión como parámetro principal de la comparación.

7.1 Comparación con unidad de potencia actual

Para comenzar, para la realización de esta comparación ha sido necesario representar el motor Continental O200-A en el programa VEMOD ya que se desconocían varios datos necesarios para la comparación. El esquema sería el representado en la figura 7.1.

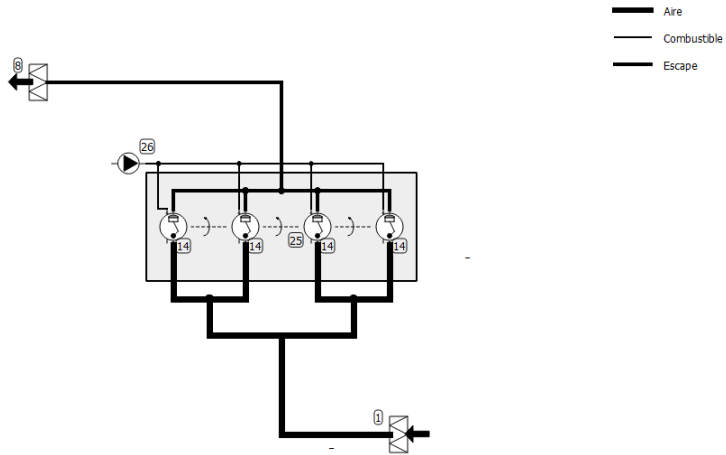


Figura 7.1: Esquema del Motor Original

Para validar el modelo utilizado se ha perseguido la obtención de 75 kW a 3000 rpm tal y como marcan las características de este motor. Se debe comentar que, aunque el motor original dispone de un sistema de carburadores para el suministro del combustible, en modelo se ha implementado el suministro de combustible mediante inyectores por problemas del programa a la hora de modelizar los carburadores.

Para las características constructivas como dimensionado de conductos o implementación del sistema de refrigeración y lubricación se ha utilizado un modelo del motor HR13 de Renault proporcionado por el departamento, el cual dispone de la mitad de cilindrada del motor de estudio, siendo necesario un escalado. De este motor también se han tomado los diagramas de distribución de las válvulas de admisión y escape y las características del sistema de inyección de combustible.

7.1.1 Comparación de prestaciones

Siguiendo esta metodología se han obtenido los siguientes valores de potencia y consumo para diferentes regímenes de giro a plena carga, tal y como se muestra en las figura 7.2 y figura 7.3.

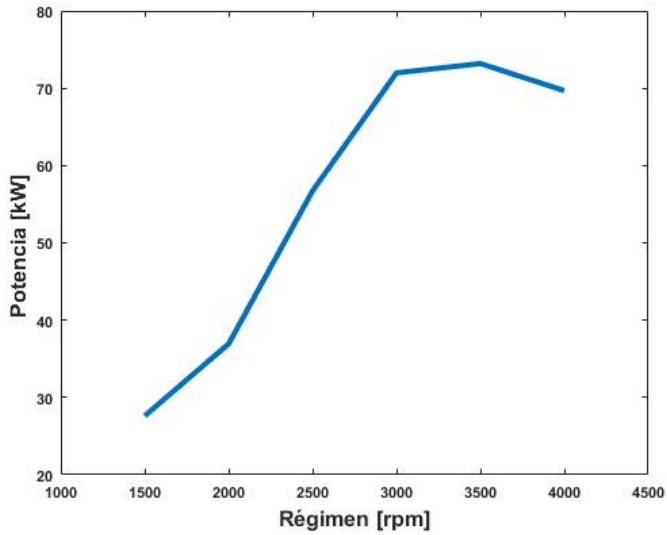


Figura 7.2: Potencia del motor de Aire a distinto régimen

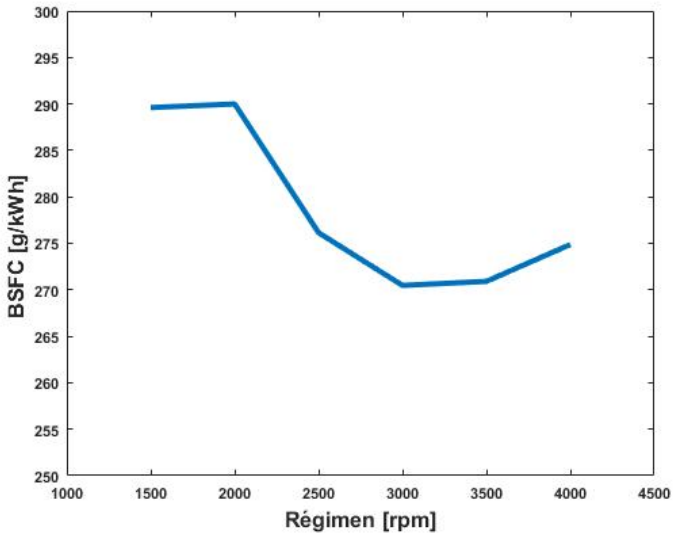


Figura 7.3: Potencia del motor de Aire a distinto régimen

En la figura 7.4 se muestra una comparación de los consumos a diferentes regímenes de giro para el motor original y el motor Oxi-combustión a baja carga. Como se puede observar el consumo del motor Oxi-combustión, que es donde operará el motor en crucero, es notablemente inferior que el mostrado en el motor de aire.

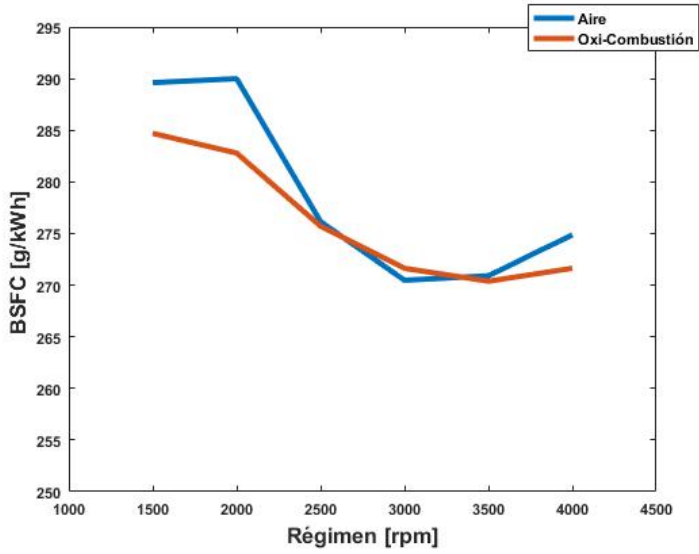


Figura 7.4: Comparación de consumo entre motor de aire y motor Oxi-Combustión a altas cargas

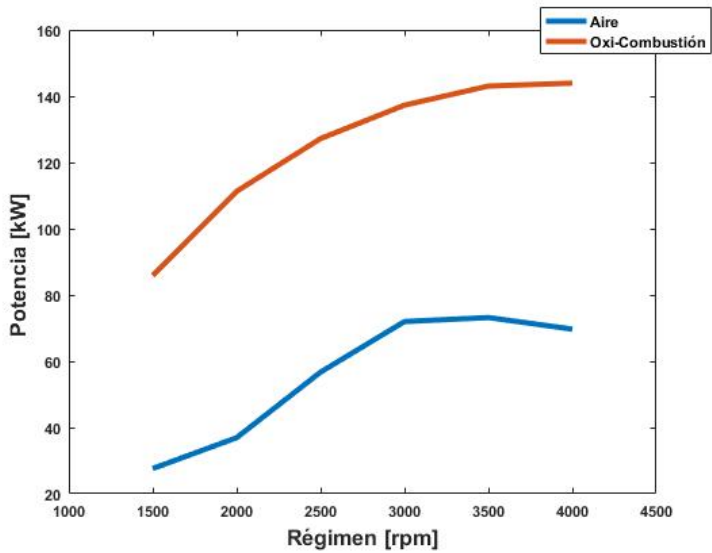


Figura 7.5: Comparación de potencia entre motor de aire y motor Oxi-Combustión a altas cargas

En la figura 7.5 se muestra la comparación de potencia entre el motor de aire y el motor Oxi-Combustión para altas cargas, como se puede observar la potencia del motor Oxi-Combustión es notablemente superior al mostrado por el motor de aire, esto es debido a dos factores principales.

- El incremento en la fracción másica de oxígeno en la mezcla

Este factor, representado en la figura 7.6, provoca que para una misma masa atrapada dentro del cilindro se inyecte más combustible, produciendo así más trabajo.

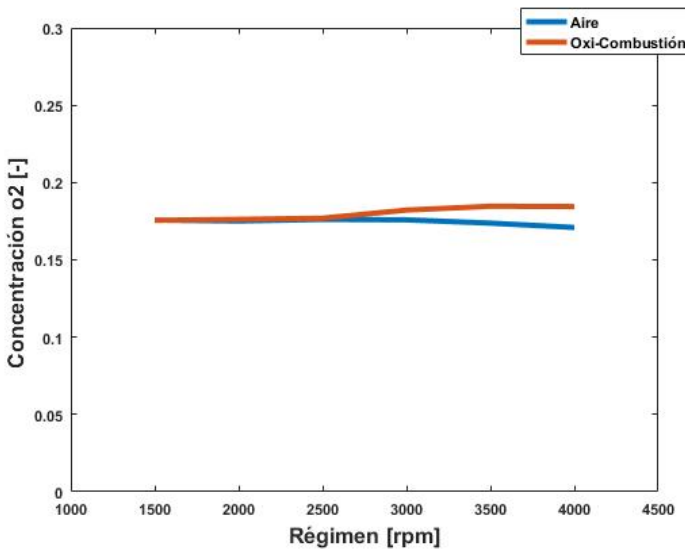


Figura 7.6: Comparación de concentración de O_2 en el momento de encendido entre motor de aire y motor Oxi-Combustión a altas cargas

- Mayor presión de admisión a los cilindros

Como se muestra en la figura 7.7, las presiones de admisión en el caso Oxi-Combustión son superiores al caso aire, lo que hace aumentar la masa atrapada dentro del cilindro.

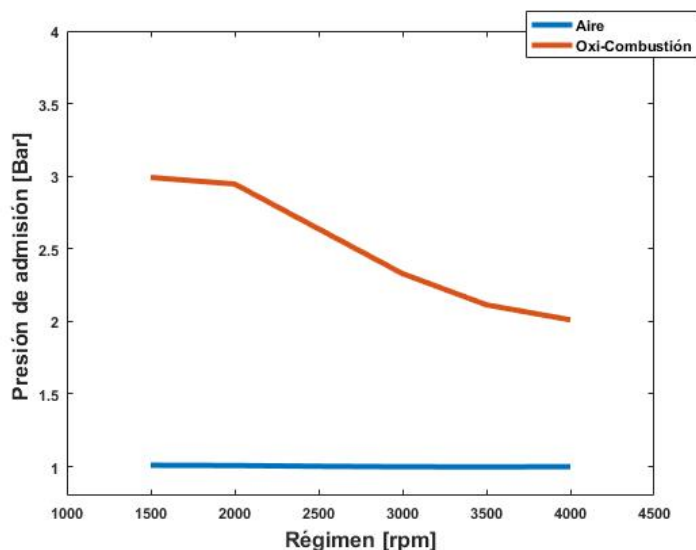


Figura 7.7: Comparación de presión de admisión a cilindros entre motor de aire y motor Oxi-Combustión a altas cargas

Puesto que las potencias entregadas por el motor Oxi-Combustión para altas cargas exceden en gran medida las potencias requeridas por la aeronave es necesario reducir el grado de carga. Este sistema de control, como se ha explicado con detalle en el capítulo anterior, se realiza mediante el control de la presión de entrada a la membrana. De esta manera disminuye la producción de oxígeno y por consiguiente la potencia entregada por el motor. En las figura 7.8 y figura 7.9 se muestra la comparación en potencia y consumo entre el motor de aire a altas cargas y el motor Oxi-Combustión a baja carga.

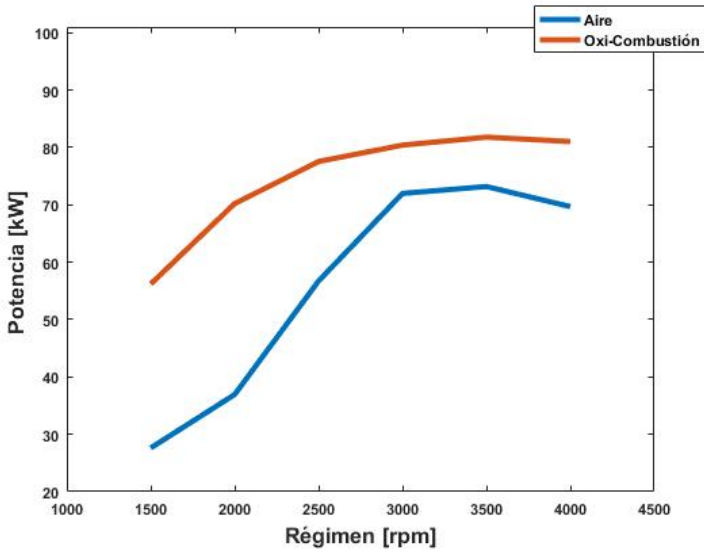


Figura 7.8: Comparación de potencia entre motor de aire y motor Oxi-Combustión a bajas cargas

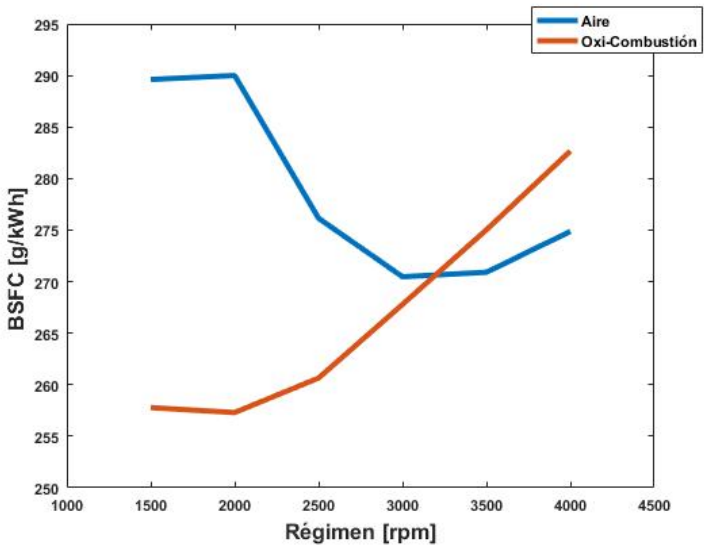


Figura 7.9: Comparación de consumo entre motor de aire y motor Oxi-Combustión a bajas cargas

Como se puede observar la reducción de consumo es incluso más notable en este caso que en el anterior. Ésta es una tendencia contraria a como sucedería en un motor gasolina convencional, ya que no es necesaria una mariposa que estrangule la admisión, si no que se realiza mediante el control de apertura y cierre de una turbina.

También se puede observar como la potencia en el eje aun se encuentra por encima de la que entrega el motor base, es por ello que se necesitará que se ajusten las condiciones del vuelo en crucero para que se opere en el rango de mínimo consumo del motor. Estas nuevas condiciones se expondrán con detalle en apartados posteriores.

7.1.2 Comparación de pesos

Para el caso del motor de aire se tomaran los datos de peso mostrados en la tabla 3.5. Para el motor Oxi-Combustión se partirá del mismo valor y se le sumará el peso de los componentes mostrados en la tabla 7.1

Elementos	Masa Unitaria [kg]	Cantidad	Peso Total [kg]
Turbogrupos de baja presión	9.00	1	9
Turbogrupos de alta presión	4.50	1	4.5
Intercooler de Aluminio	7.00	2	14
Regenerador de Baja temperatura	6.00	2	12
Regenerador de Alta temperatura	7.50	2	15
Membrana BSFC	8.00	1	8
Total			62.5

Tabla 7.1: Desglose de pesos de elementos añadidos

Como comentario a la tabla 7.1 añadir que los datos de pesos de los turbogrupos han sido obtenidos de valores catalogados de turbogrupos de tamaños similares utilizados en automóviles, los intercoolers y regeneradores se han obtenido a partir de los datos de ratios de potencia-peso obtenidos de la referencia (la que sea) tomando como valor estimado 8 kW/kg y finalmente el peso de membrana se ha estimado como el peso de un regenerador convencional debido a su similitud constructiva.

Estas estimaciones pueden llegar a ser no demasiado aproximadas, ya que los elementos han sido estimados desde elementos dispuestos en automóviles y no en aeronaves. También el peso final de la membrana puede variar del valor estimado, debido a que aún no existe un prototipo construido sobre el que poder comparar. Por tanto, si este motor se fuera a construir físicamente, sería necesario revisar estos valores.

7.2 Viabilidad de utilización

La metodología a seguir para verificar la viabilidad de la utilización del sistema Oxi-Combustión se basará en la comparación del rango máximo que es capaz de recorrer la aeronave en vuelo de crucero con la planta propulsiva de aire y con planta propulsiva de Oxi-Combustión.

Este cálculo se llevará a cabo mediante la ecuación de Breguer dada en la Ecuación 3.4.

Para mantener vuelo estable en las condiciones de crucero de la aeronave, mostradas en la tabla 3.3, es necesario generar un valor de empuje que iguale a la resistencia aerodinámica por tanto la potencia necesaria vendrá dada según la Ecuación 7.1

$$P_{req} = D \cdot V_0 = \frac{1}{2} \rho_{\infty} V_0^3 S_w (CD_0 + kCL^2) \quad (7.1)$$

Sin embargo, la potencia extraída del motor debe ser más alta que la potencia requerida por la aeronave, ya que es necesario incorporar el valor del rendimiento propulsivo de la hélice acoplada al eje del motor. Este parámetro se encuentra en valores de entre 0.7 y 0.85, puesto que la hélice utilizada para la Cessna 150 es una hélice bipala de paso fijo se estimará en un valor de 0.75, por tanto la potencia en el eje del motor viene descrita en la Ecuación 7.2

$$P_{eje} = \frac{P_{req}}{0,75} \quad (7.2)$$

Utilizando estas ecuaciones y para las condiciones de crucero se obtiene que la potencia necesaria en el eje es de 61.7 kW. Esta potencia es entregada por el motor de aire original para un régimen de 2750 rpm con un consumo de 273 g/kWh.

Para el motor Oxi-Combustión esta potencia se obtiene al régimen de 1750 rpm presentando en este caso un consumo de 257.8 g/kWh.

Se debe comentar también que como el régimen de giro del motor es menor, si se utiliza la misma caja de cambios, será necesario modificar el paso de la hélice para mantener el máximo rendimiento posible.

En la tabla 7.2 se muestra un resumen de las características de los vuelos realizados con el motor de aire y con el motor Oxi-Combustión.

Parámetro	Motor Aire	Motor Oxi-Combustión
Altitud [m]	1070	1070
Velocidad [km/h]	200	200
Consumo [g/kWh]	273	257.8
Masa Inicial [kg]	730	730
Masa Carga de Pago [kg]	80	20
Masa Final [kg]	661	665.5
CL	0.29	0.29
CD	0.046	0.046

Tabla 7.2: Comparación del vuelo de crucero con ambas plantas motrices

Como comentario adicional a la tabla 7.2 se debe observar que la carga de pago máxima se ha reducido en el caso del motor Oxi-Combustión debido al aumento de peso mostrado en el apartado anterior, este factor también afecta a la carga máxima de combustible, que se ve reducida.

Finalmente en la tabla 7.3 se muestran los valores de rangos máximos con la utilización de ambas plantas motrices.

Tipología de motor	Rango Máximo [km]
Aire	631.72
Oxi-Combustión	623.35

Tabla 7.3: Comparativa de rangos máximos

7.3 Conclusiones

Como se puede observar en la tabla 7.3 el alcance se ve reducido en un 1.3% para el caso del conjunto Oxi-Combustión con los valores de vuelos tenidos en cuenta. Si la carga de pago del conjunto Oxi-Combustión se aumentara hasta los 50 kg este valor empeoraría situándose en una reducción de 48%.

Aunque el motor Oxi-Combustión ofrezca una mejora de 5.5% en el consumo, el aumento de peso provocado por los elementos acoplados al motor han provocado este descenso de alcance máximo.

Es por ello que, atendiendo solamente al parámetro de alcance, la implementación del motor diseñado en este proyecto solo sea viable si la carga de pago es reducida, sin embargo si que ofrece ciertas ventajas que deben ser tenidas en cuenta.

- **Reducción de emisiones contaminantes**

Esta es la principal causa de estudios sobre esta tipología de motor. En primer lugar se eliminan todos aquellos elementos presentes en el grupo de los NO_x, ya que se elimina por completo la presencia de nitrógeno en la combustión.

Otra ventaja, aunque ésta más a largo plazo, es la posibilidad de estudiar el secuestro del CO₂, eliminando la emisión de esta sustancia a la atmósfera. Esto es provocado indirectamente por la eliminación del Nitrógeno en la combustión, ya que los gases de escape están compuestos mayoritariamente por CO₂ y agua, fácilmente separables.

La reducción de emisiones contaminantes es una medida que debe ser tomada en cuenta debido a los previsibles endurecimientos de las normativas que las regulan. Esto puede llegar a causar que en un futuro próximo, aunque el rango se reduzca drásticamente, la única opción viable, comparada con el motor de aire, sea la del motor Oxi-Combustión para esta aeronave.

- **Reducción de la longitud de la carrera de despegue y ascenso**

Este hecho es causado por el aumento de potencia máxima del motor lo que provoca que la pista necesaria para el despegue de este conjunto pueda ser más corta.

Esto, unido a la reducción del tramo de ascenso, lleva asociado también la reducción de la huella de ruido provocada por este conjunto, ya que el tramo de vuelo a baja altitud se reduce.

La reducción de la huella de ruido también es una ventaja destacable debido a que también se prevé el endurecimiento de la normativa en publicaciones futuras.

Ya se ha comprobado que la utilización del motor diseñado en este proyecto no es la más óptima para la Cessna 150, sin embargo, si se escogiera convenientemente la aeronave, de forma que la potencia requerida para el vuelo en crucero en el punto de máxima eficiencia aerodinámica se situara en el rango de mínimo consumo del motor y además el peso de la aeronave fuera mayor, de manera que el aumento de peso por el acoplamiento de los nuevos elementos del motor Oxi-Combustión fuera menos significativo, el motor Oxi-Combustión igualaría o incluso mejoraría en prestaciones al conjunto implementado con motor de aire. Puesto que, como se ha demostrado en apartados anteriores, el motor Oxi-Combustión, para bajas cargas, presenta ventajas destacables comparado con el motor equivalente de aire.

Esto, unido a las ventajas en la reducción de emisiones, harían viable y económicamente rentable tanto la utilización como la investigación de esta nueva tipología de plantas motrices.

Capítulo 8

Trabajos Futuros

En este apartado se van a tratar de introducir algunos de los caminos posibles que complementarían el estudio realizado en el presente proyecto.

8.1 Estudio de viabilidad de secuestro de CO₂

Uno de los estudios a realizar tras la optimización del sistema oxicomustión es el secuestro del CO₂. Esta técnica, como su nombre indica, consiste en el almacenamiento del CO₂ contenido en los gases de escape par que éste no sea liberado a la atmósfera, posteriormente este CO₂ puede ser vendido a ciertas industrias para su uso como combustible o en la fabricación de hielo seco.

En el motor OxiCombustión los gases de escape están compuestos esencialmente por agua y CO₂, por lo tanto la primera condición de esta técnica es la separación de estas dos especies. Este proceso es fácil de implementar por medio de un intercambiador de calor con el aire ambiente, lo que permitiría bajar la temperatura de estos gases por debajo de los 100°C causando el licuado del vapor de agua separando finalmente ambas sustancias.

Para que el dióxido de carbono sea almacenable es necesario licuarlo después de esta primera etapa de separación, para ello, como se puede observar en la figura 8.1, es necesario disminuir su temperatura por debajo de los 31°C y comprimirlo hasta una presión de, aproximadamente, 70 bar para que este proceso pueda tener lugar [22].

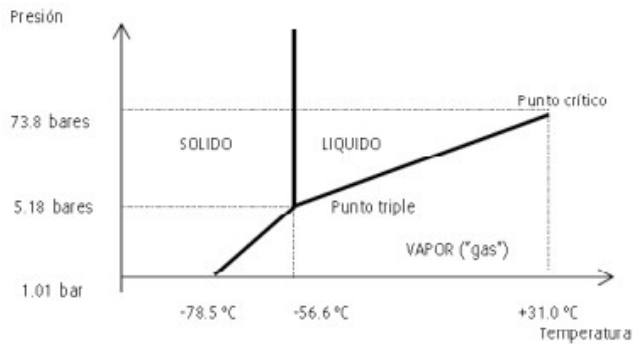


Figura 8.1: Diagrama de fase del CO₂

Se debe comentar que, debido a la alta relación de compresión necesaria, el único método viable para su realización sería un compresor volumétrico, el cual podría implementarse mediante un quinto pistón acoplado al eje que realizara esta tarea.

Esta compresión puede ser realizada de dos maneras:

- Compresión en una etapa

Este proceso de compresión se asemejaría a una compresión adiabática y sería necesaria la posterior refrigeración del gas a la salida del compresor.

- Compresión multi-etapa

En el límite este proceso sería equivalente a una compresión isoterma, la cual sería la manera óptima de realizar la compresión ya que es el proceso que menor trabajo consume. Sin embargo, es inviable realizar este proceso idealmente, pues sería necesario un número infinito de etapas compresor-intercambiador de calor para mantener la temperatura constante.

No obstante la implementación de 3 o 4 etapas podría ser viable y mejoraría el coste energético respecto a una compresión en una sola etapa.

En la figura 8.2 se presentan los procesos Isotermos y Adiabáticos presentados anteriormente para las condiciones solicitadas. Como se puede observar en la tabla 8.1, donde se representan numéricamente los procesos de compresión para los datos en vuelo de crucero, el coste energético es menor en el caso del proceso Isoterma.

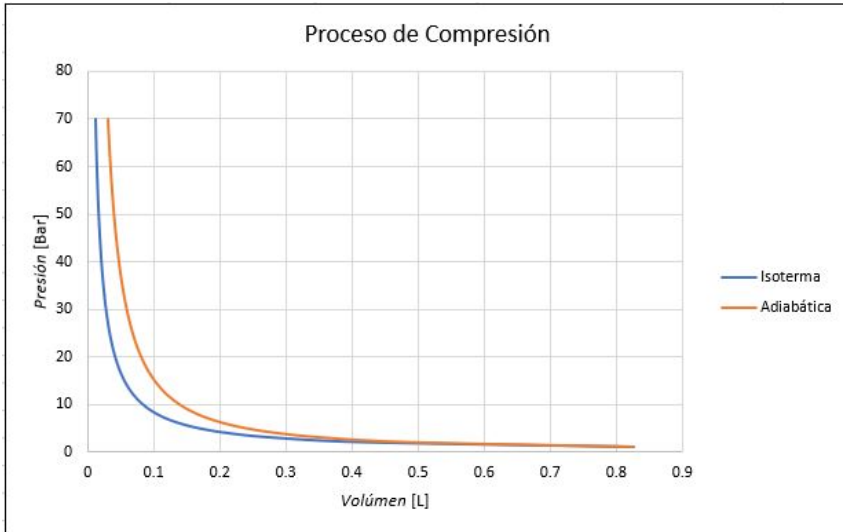


Figura 8.2: Procesos de compresión Isotermo y Adiabático

Proceso	Potencia Requerida [kW]	Relación de compresión requerida	Temperatura final [°C]
Isotermo	1.399	69.307	30
Adiabático	4.167	26.885	508.094

Tabla 8.1: Condiciones en los procesos de compresión

Continuando con la tendencia de este proyecto, también se ha considerado estudiar cual sería el incremento de peso que supondría el uso de este sistema, este incremento de masa puede ser comparado con la masa de combustible quemado de manera que se puede obtener cual sería el incremento de peso absoluto que tendría la aeronave por hora de vuelo en un trayector donde se utilizara este sistema, estos datos se presenta en la tabla 8.2.

Aumento de peso [kg/h]	Consumo Combustible [kg/h]	Aumento de peso absoluto [kg/h]
47.79	19.812	27.978

Tabla 8.2: Aumento de peso por el uso del sistema de licuado de CO₂

Como se puede observa el licuado de CO₂ es prácticamente inviable en el ámbito aeronáutico, donde el factor peso es vital, sin embargo si que se podría estudiar su uso en vehículos pesados como camiones o barcos o en industria donde el peso del sistema no es tan importante.

8.2 Estudio de implementación en carretera

Otra vía de estudio del sistema Oxi-Combustión es su implementación en el transporte por carretera.

Este estudio paralelo al realizado en este proyecto tendría la ventaja de no disponer una limitación tan marcada sobre el peso de los equipos, de esta manera el único parametro a optimizar sería el rendimiento del motor sin ninguna otra limitación.

Esto abriría el camino al uso de intercambiadores más grandes, los cuales presentarían un mejor rendimiento que los usados en este estudio haciendo así que el rendimiento del sistema pudiera subir más.

Otra ventaja sería la normativa de fiabilidad menos estricta, lo que permitiría aumentar tanto la relación de compresión de los cilindros como la presión máxima en cámara mejorando así el rendimiento global.

Finalmente se podría comenzar a plantear el uso del secuestro del CO₂ que, aunque a priori disminuyera las prestaciones del motor, también disminuiría aun más los gases contaminantes emitidos por esta unidad propulsiva, lo cual será un factor muy determinante en el presente y futuro de la automoción.

8.3 Nuevos estudios de influencia sobre la unidad propulsiva

Otra vía para continuar este trabajo sería la optimización de otros parámetros no considerado en este proyecto, algunos de ellos podrían ser:

- Optimización del diagrama de distribución de válvulas de apertura y cierre.
- Estudio detallado del dimensionado de conductos del motor
- Estudio de transmisión de calor en cilindro y escape
- Estudio del sistema de lubricación y refrigeración

8.4 Estudio del proceso de combustión

Finalmente, otro camino que se podría seguir al concluir este proyecto es el estudio del proceso de combustión del motor oxicomustión.

Este estudio resulta interesante debido a ciertos cambios significativos respecto a un motor de combustión convencional.

- Eliminación del nitrógeno en los gases inertes de la combustión.

Este hecho produce que las propiedades físicas y químicas del gas inerte cambien respecto al caso convencional, causando que el calor absorbido por los gases inertes cambie para un mismo calor liberado por parte del combustible.

Si este calor absorbido es demasiado grande puede llegar a producir el apagado de llama y si es demasiado pequeño se puede llegar a quemar el cilindro por exceso de temperatura.

- Utilización de una mayor tasa de oxígeno

Puesto que ahora la cantidad de oxígeno introducida en el cilindro es independiente de la proporción de oxígeno en el aire, las fracciones másicas de esta sustancia pueden ser mayores al 21% causando la necesidad de estudiar que supone este hecho en la combustión.

En el estudio [23] llevado a cabo por el instituto CMT de la UPV se pueden observar ciertas tendencias de este nuevo tipo de combustión.

En el estudio CFD llevado a cabo para el motor operando en altas cargas ($PME = 11$ bar) se han observado los siguientes fenómenos. Se debe comentar que se ha limitado a 3000 K la temperatura máxima en cilindro para evitar el quemado del motor.

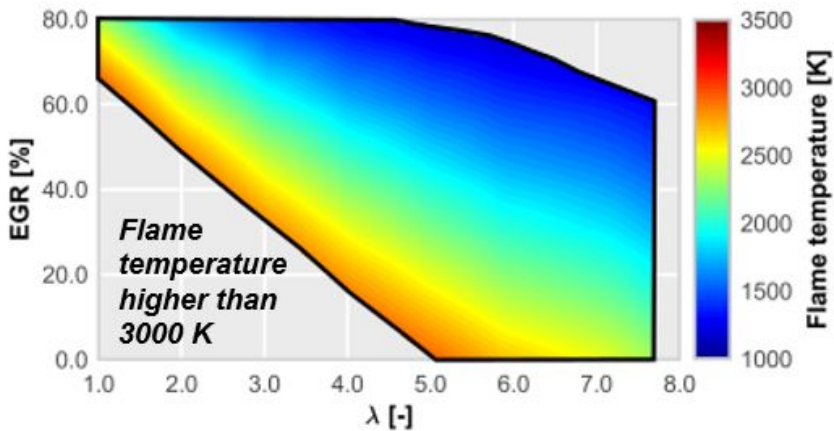


Figura 8.3: Límites térmicos del motor Oxicombustión

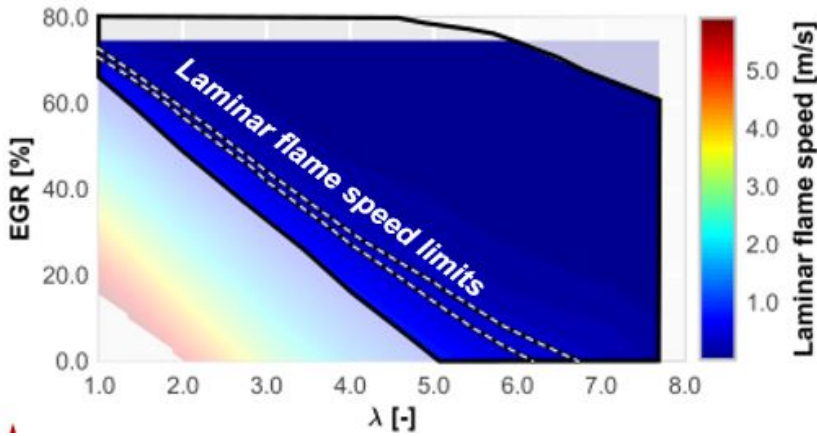


Figura 8.4: Límites de estabilidad de llama

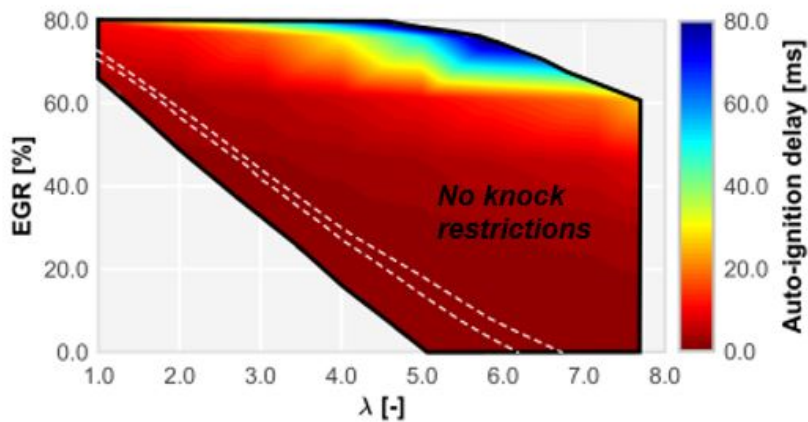


Figura 8.5: Restricción de Knock

Aunque estos estudios se hayan realizado para diferentes valores de λ solo se va a considerar el punto de $\lambda = 1$, pues, hasta el momento, no se considera trabajar fuera del rango estequiométrico debido a la dificultad de producción del oxígeno.

En la figura 8.3 se puede observar como el mínimo de dilución de oxígeno en EGR se sitúa en el 65 %, a partir del éste las temperaturas superan el límite impuesto.

En la figura 8.4 se presentan los límites para mantener tasas de quemado aceptables para que la combustión pueda tener lugar en tiempos razonables. Como se puede

observar estos límites fijan la tasa máxima de dilución en el 75 %, por encima de este valor la combustión no será completa y el rendimiento del motor caerá bruscamente.

Finalmente en la figura 8.5 se presentan los tiempos de retraso en el auto-encendido, se puede observar como para los rangos considerados no se produciría knock.

Continuando con este estudio, y puesto que no existiría la restricción del auto-encendido, se procedió a extenderlo alrededor de $\lambda = 1$ para diferentes relaciones de compresión en el cilindro, obteniendo los resultados mostrados en la figura 8.6

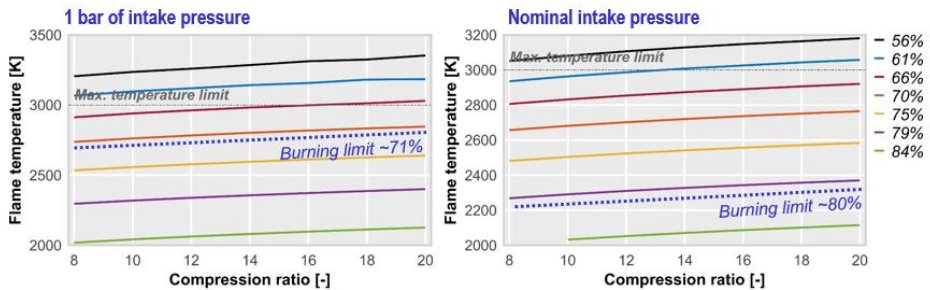


Figura 8.6: Estudio de Relación de compresión para 1 bar y 2.5 bar en admisión

En la figura 8.6 se puede observar como para 1 bar de admisión el intervalo admisible de dilución de EGR es bastante cerrado entre 65 % y 71 %, sin embargo dentro del mismo es posible aumentar considerablemente la relación de compresión respecto a un motor gasolina convencional gracias a la aparente ausencia de knock, permitiendo aumentar el rendimiento del motor.

También se observa en la figura 8.6 como para una presión de admisión mayor, tomada como nominal, el intervalo admisible de dilución de EGR aumenta, permitiendo que aumente más la relación de compresión.

8.5 Referencias

- [22] S.A Abelló Linde. "Trabajando con Dióxido de carbono CO₂". En: (2020) (vid. pág. 69).
- [23] CMT-Motores Térmicos. "Evaluation of the OxyC concept". En: (7-04-2020) (vid. pág. 73).

Capítulo 9

Presupuesto

9.1 Introducción a costes

En este capítulo se procederá a realizar un desglose de los costes asociados a la realización de este proyecto, entre los cuales se van a tratar costes de equipos, software y personal asociado al proyecto.

El precio de coste de cada uno de los elementos mostrados en el presente documento corresponden a precios de mercado actuales, tarifas legales o, en su defecto, estimaciones lo más realista posibles.

Para tener en cuenta el precio de la hora de uso de los equipos se tendrá en cuenta el precio de compra del mismo, su periodo de amortización y el valor del equipo tras el mismo, de manera que la tarifa horaria vendrá dada según las siguientes expresiones.

$$V_{am} = \frac{V_c - V_r}{n} \quad (9.1)$$

$$C_h = \frac{V_{am}}{h_a} \quad (9.2)$$

Siendo 1800 las horas anuales correspondientes a 40 horas laborales semanales, sobre las cuales se ha descontado una semana de Navidad otra de Semana Santa y un mes completo del periodo estival.

Para el coste de software, si este no es gratuito, se hará referencia al precio de coste anual de la suscripción al mismo, desde el cual se calculará el precio de utilización horaria del mismo.

Finalmente para calcular el coste del personal asociado y puesto que el proyecto esta llevado a cabo en una entidad pública, los sueldos tanto de profesores como de becarios asociados se encuentran publicados en el documento legal correspondiente, al que se hará refenecia para la obtención de los mismos.

Este proyecto, como trabajo de fin de grado, tiene oficialmente un periodo de realización de 300 horas, lo cual corresponde a 12 ETCS, sin embargo debido a esta situación excepcional se han dedicado más horas de las asignadas inicialmente, lo cual se estima en un tiempo total de 400 horas.

9.2 Costes Unitarios

9.2.1 Material Informático

El equipo utilizado es el ordenador portátil Asus X556UJ

- Procesador Intel Core i7-6500U @ 2.5 GHz
- Disco duro HDD de 400 GB
- Memoria RAM de 8 GB
- Tarjeta gráfica NVIDIA GeForce 920M

Este equipo fue adquirido para cubrir los años de estudio de la carrera de Ingeniera Aeroespacial, de modo que su periodo de amortización se supondrá en 4 años, se adquirió en el año 2016 por un precio de 630€ y se espera obtener un valor de retorno en el presente año 2020 de 200€ según precios de mercado.

Por tanto los precios horarios de utilización del equipo vienen dados a continuación.

$$V_{am} = \frac{630\text{€} - 200\text{€}}{4} = 107,50 \frac{\text{€}}{\text{Año}} \quad (9.3)$$

$$C_h = \frac{107,5}{1800} = 0,06 \frac{\text{€}}{\text{Hora}} \quad (9.4)$$

9.2.2 Software

- **Wolfram Mathematica**

La licencia anual del programa Wolfram Mathematica tiene un precio de 1780€.

$$C_h = \frac{1780}{1800} = 0,99 \frac{\text{€}}{\text{Hora}} \quad (9.5)$$

- **Matlab**

La licencia anual del programa Matlab tiene un precio de 800€.

$$C_h = \frac{800}{1800} = 0,44 \frac{\text{€}}{\text{Hora}} \quad (9.6)$$

- **Paquete Microsoft Office**

La licencia anual del paquete completo de Microsoft Office tiene un precio de 126€, se debe destacar que han sido utilizados especialmente los programas Excel, Teams y Power Point.

$$C_h = \frac{126}{1800} = 0,07 \frac{\text{€}}{\text{Hora}} \quad (9.7)$$

- **Latex**

Programa con licencia gratuita

- **QElectroTech**

Programa con licencia gratuita

- **VEMOD**

Programa proporcionado por el Instituto CMT sin un precio de mercado establecido.

9.2.3 Costes de Personal

Profesor - Tutor

Según se establece en "LAS RETRIBUCIONES AL PROFESORADO FUNCIONARIO EN BASE A LA LEY DE PRESUPUESTOS PARA EL EJERCICIO 2019" publicado

por parte del servicio de recursos humanos de Instituto CMT, la retribución mensual que recibe un profesor contratado doctor por 40 horas de trabajo semanales es de 2.169,86€, por tanto suponiendo un total de 160 horas mensuales el coste horario viene dado según la siguiente relación.

$$C_h = \frac{2,169,86}{160} = 13,56 \frac{\text{€}}{\text{Hora}} \quad (9.8)$$

Investigador científico - Co-Tutor

Según se establece en "LAS RETRIBUCIONES AL PROFESORADO FUNCIONARIO EN BASE A LA LEY DE PRESUPUESTOS PARA EL EJERCICIO 2019" publicado por parte del servicio de recursos humanos de Instituto CMT, la retribución mensual que recibe el personal colaborador de investigación científica por 40 horas de trabajo semanales es de 1.421,00€, por tanto suponiendo un total de 160 horas mensuales el coste horario viene dado según la siguiente relación.

$$C_h = \frac{1,421,00}{160} = 8,88 \frac{\text{€}}{\text{Hora}} \quad (9.9)$$

Becario - Alumno

Aunque el alumno no recibe ninguna retribución económica por la realización de este proyecto se podría cuantificar su aportación estableciendo como nómina mensual un precio medio de las ofertas para becarios publicadas en el portal del SIE, el cual se fijará en 650€ mensuales por 40 horas de trabajo semanales.

$$C_h = \frac{650}{160} = 4,06 \frac{\text{€}}{\text{Hora}} \quad (9.10)$$

El coste asociado a la seguridad social de cada uno de los trabajadores que han intervenido en este proyecto se ha establecido en el 33% de la base de cotización de cada uno de ellos, esta cantidad se mostrará en el apartado de costes totales.

9.2.4 Costes asociados al COVID-19

Debido a la situación actual ha sido necesario el gasto en elementos de desinfección, higiene y protección contral el virus COVID-19, tales como:

- Gel Hidro-alcohólico

El cual se vende en botes de 100 mL con un precio de 2.3€ la unidad.

- Toallitas desinfectantes

Utilizadas para la desinfección del teclado del ordenador después de cada uso, tienen un precio de 11€ el pack de 100 unidades.

- Lejía

Utilizada para la desinfección del puesto de trabajo, tiene un precio de 3.25€ por cada garrafa de dos litros de producto.

9.3 Costes Totales

Concepto	Tiempo [h] - Unidades [ud]	Coste horario [€/h] - Precio Unidad [€/ud]	Coste [€]	S.Social (32.1%) [€]	Importe Total [€]
Equipos					
Asus-X556UJ	390	0.06	23.40		23.40
<i>Subtotal</i>			23.40		23.40
Software					
					0.00
W.Mathematica	20	0.99	19.80		19.80
Matlab	100	0.44	44.00		44.00
M.Office	150	0.07	10.50		10.50
<i>Subtotal</i>			74.30		74.30
Personal					
Tutor	20	13.56	271.20	87.06	358.26
Co-Tutor	50	8.88	444.00	142.52	586.52
Alumno	400	4.06	1624.00	521.30	2145.30
<i>Subtotal</i>			2339.20	750.88	3090.08
COVID-19					
Gel Hidro-Alcohólico	5	2.30	11.50		11.50
Toallitas Desinfectantes	1	11.00	11.00		11.00
Lejía	2	3.25	6.50		6.50
<i>Subtotal</i>			29.00		29.00
Coste Total					
Total sin IVA			2465.90	750.88	3216.78
IVA (21%)			517.84	170.89	688.73
Total			2983.74	921.77	3905.51
Beneficio Bruto (7%)			277.79		277.79
Imp. Sociedades (25%)			69.45		69.45
Beneficio Neto			208.34		208.34

Tabla 9.1: Costes Totales

El coste total de este proyecto sería de
TRES MIL NOVECIENTOS SESENTA Y OCHO EUROS CON TREINTA Y SIETE CÉNTIMOS

El beneficio estimado de dicho proyecto sería de un total de
DOSCIENTOS OCHO EUROS CON TREINTA Y CUATRO CÉNTIMOS

9.4 Huella de Carbono

En este último apartado, se va a tratar el coste contaminante de la realización de este proyecto, de manera que se va a tratar de calcular la huella de carbono dejada por realizar este trabajo.

Para ello, primero, es necesario estimar el consumo eléctrico asociado a este proyecto. Según los datos del fabricante, el portátil Asus-X556UJ consume una potencia de 65 W y puesto que el único elemento utilizado para este trabajo ha sido este ordenador, el consumo energético total quedaría de la siguiente manera.

$$Consumo = \frac{65 \cdot 390h}{1000} = 25,35kW \cdot h \quad (9.11)$$

Con este dato en mente, es necesario ahora un valor de emisiones por kWh consumido, para ello es necesario tener en cuenta que el proyecto se ha realizado extrayendo toda la electricidad desde la red nacional, lo que quiere decir que el mix de generación energética será el mismo que presenta el estado español, mostrado a fecha de marzo de 2019 en la figura 9.1

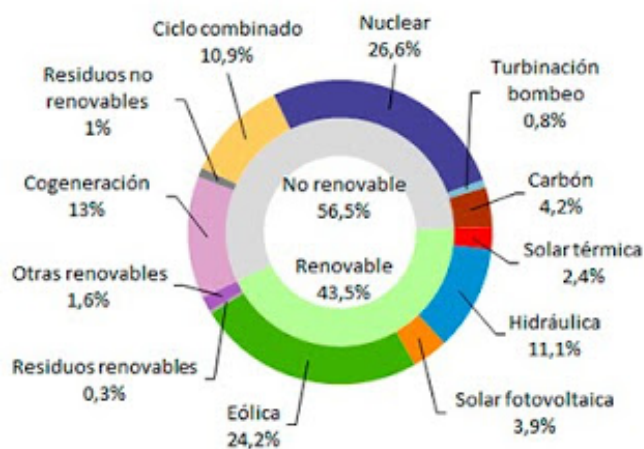


Figura 9.1: Mix de generación eléctrica Español [24]

Tomando estos datos, la plataforma 'CeroCO2.org' establece que por cada kW producido por la red nacional se han producido 0.41 kg de CO2. Por tanto el consumo total de CO2 es el mostrado a continuación.

$$MasaCO_2 = 65 \cdot 0,41 = 10,39kg \quad (9.12)$$

Como se puede observar no es un valor muy elevado, ya que es la misma producción que tiene cualquier automóvil convencional en 200 km de trayecto,

Sin embargo la realización de este simple cálculo es interesante para tomar conciencia del efecto que tienen estas acciones sobre el ecosistema, de manera que pueda ayudar en la búsqueda de una solución para reducir estas emisiones como puede ser el secuestro del CO₂.

9.5 Referencias

- [24] Sergio Fernández Mungía. *Generación eléctrica en España*. URL: <https://www.diariorenovables.com/> (visitado 19-04-2019) (vid. pág. 82).

Capítulo 10

Pliego de Condiciones

10.1 Condiciones generales

En este último capítulo se van a describir los requisitos necesarios, tanto técnicos como generales, necesarios para la realización del presente proyecto. Durante la realización de esta tarea, según la Orden de 9 de Marzo de 1971 por la que se aprueba la Ordenanza General de Seguridad e Higiene en el Trabajo, se deben de cumplir una serie de requisitos en el lugar de trabajo.

Por otra parte, en el Decreto 488/1997 de 14 de Abril, se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud para la utilización de equipos por los trabajadores.

Finalmente y atendiendo a la situación actual provocada por la pandemia del COVID-19 es necesario adoptar ciertas medidas excepcionales en el entorno laboral dadas en la Disposición 4911 del BOE núm. 130 de 2020.

Los artículos que se presentan a continuación afectaran a la realización de este proyecto.

10.1.1 Real Decreto 488/1997 de 14 de Abril [25]

Artículo 1. Objeto

1. El presente Real Decreto establece las disposiciones mínimas de seguridad y de salud para la utilización por los trabajadores de equipos que incluyan pantallas de visualización.

2. Las disposiciones de la Ley 31/1995. de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales, se aplicarán plenamente al conjunto del ámbito contemplado en el apartado anterior.
3. Quedan excluidos del ámbito de aplicación de este Real Decreto:
 - Los puestos de conducción de vehículos o máquinas
 - Los sistemas informáticos embarcados en un medio de transporte
 - Los sistemas informáticos destinados prioritariamente a ser utilizados por el público.
 - Los sistemas llamados portátiles, siempre y cuando no se utilicen de modo continuado en un puesto de trabajo.
 - Las calculadoras, cajas registradoras y todos aquellos equipos que tengan un pequeño dispositivo de visualización de datos o medidas necesario para la utilización directa de dichos equipos.
 - Las máquinas de escribir de diseño clásico, conocidas como máquinas de ventanilla.

Artículo 2. Definiciones

A efectos de este Real Decreto se entenderá por:

- Pantalla de visualización: una pantalla alfanumérica o gráfica, independientemente del método de representación visual utilizado.
- Puesto de trabajo: el constituido por un equipo con pantalla de visualización provisto, en su caso, de un teclado o dispositivo de adquisición de datos, de un programa para la interconexión persona/máquina, de accesorios ofimáticos y de un asiento y mesa o superficie de trabajo, así como el entorno laboral inmediato.
- Trabajador: cualquier trabajador que habitualmente y durante una parte relevante de su trabajo normal utilice un equipo con pantalla de visualización.

Artículo 3. Obligaciones generales del empresario.

1. El empresario adoptará las medidas necesarias para que la utilización por los trabajadores de equipos con pantallas de visualización no suponga riesgos para su seguridad o salud o, si ello no fuera posible, para que tales riesgos se reduzcan al mínimo. En cualquier caso, los puestos de trabajo a que se refiere el presente Real Decreto deberán cumplir las disposiciones mínimas establecidas en el anexo del mismo

2. A efectos de lo dispuesto en el primer párrafo del apartado anterior, el empresario deberá evaluar los riesgos para la seguridad y salud de los trabajadores, teniendo en cuenta en particular los posibles riesgos para la vista y los problemas físicos y de carga mental, así como el posible efecto añadido o combinado de los mismos. La evaluación se realizará tomando en consideración las características propias del puesto de trabajo y las exigencias de la tarea y entre éstas, especialmente, las siguientes:
 - El tiempo promedio de utilización diaria del equipo
 - El tiempo máximo de atención continua a la pantalla requerido por la tarea habitual.
 - El grado de atención que exija dicha tarea.
3. Si la evaluación pone de manifiesto que la utilización por los trabajadores de equipos con pantallas de visualización supone o puede suponer un riesgo para su seguridad o salud, el empresario adoptará las medidas técnicas u organizativas necesarias para eliminar o reducir el riesgo al mínimo posible. En particular, deberá reducir la duración máxima del trabajo continuado en pantalla, organizando la actividad diaria de forma que esta tarea se alterne con otras o estableciendo las pausas necesarias cuando la alternancia de tareas no sea posible o no baste para disminuir el riesgo suficientemente.
4. En los convenios colectivos podrá acordarse la periodicidad, duración y condiciones de organización de los cambios de actividad y pausas a que se refiere el apartado anterior.

Artículo 4. Vigilancia de la salud

1. El empresario garantizará el derecho de los trabajadores a una vigilancia adecuada de su salud, teniendo en cuenta en particular los riesgos para la vista y los problemas físicos y de carga mental, el posible efecto añadido o combinado de los mismos, y la eventual patología acompañante. Tal vigilancia será realizada por personal sanitario competente y según determinen las autoridades sanitarias en las pautas y protocolos que se elaboren, de conformidad con lo dispuesto en el apartado 3 del artículo 37 del Real Decreto 39/1997, de 17 de enero, por el que se aprueba el Reglamento de los servicios de prevención. Dicha vigilancia deberá ofrecerse a los trabajadores en las siguientes ocasiones:
 - Antes de comenzar a trabajar con una pantalla de visualización.
 - Posteriormente, con una periodicidad ajustada al nivel de riesgo a juicio del médico responsable.
 - Cuando aparezcan trastornos que pudieran deberse a este tipo de trabajo.

2. Cuando los resultados de la vigilancia de la salud a que se refiere el apartado 1 lo hiciese necesario, los trabajadores tendrán derecho a un reconocimiento oftalmológico.
3. El empresario proporcionará gratuitamente a los trabajadores dispositivos correctores especiales para la protección de la vista adecuados al trabajo con el equipo de que se trate, si los resultados de la vigilancia de la salud a que se refieren los apartados anteriores demuestran su necesidad y no pueden utilizarse dispositivos correctores normales.

Artículo 5. Obligaciones en materia de información y formación

1. De conformidad con los artículos 18 y 19 de la Ley de Prevención de Riesgos Laborales, el empresario deberá garantizar que los trabajadores y los representantes de los trabajadores reciban una formación e información adecuadas sobre los riesgos derivados de la utilización de los equipos que incluyan pantallas de visualización, así como sobre las medidas de prevención y protección que hayan de adoptarse en aplicación del presente Real Decreto
2. El empresario deberá informar a los trabajadores sobre todos los aspectos relacionados con la seguridad y la salud en su puesto de trabajo y sobre las medidas llevadas a cabo de conformidad con lo dispuesto en los artículos 3 y 4 de este Real Decreto
3. El empresario deberá garantizar que cada trabajador reciba una formación adecuada sobre las modalidades de uso de los equipos con pantallas de visualización, antes de comenzar este tipo de trabajo y cada vez que la organización del puesto de trabajo se modifique de manera apreciable.

Artículo 6. Consulta y participación de los trabajadores

La consulta y participación de los trabajadores o sus representantes sobre las cuestiones a que se refiere este Real Decreto se realizarán de conformidad con lo dispuesto en el apartado 2 del artículo 18 de la Ley de Prevención de Riesgos Laborales.

- Disposición transitoria única. Plazo de adaptación de los equipos que incluyan pantallas de visualización.

Los equipos que incluyan pantallas de visualización puestos a disposición de los trabajadores en la empresa o centro de trabajo con anterioridad a la fecha de entrada en vigor del presente Real Decreto deberán ajustarse a los requisitos establecidos en el anexo en un plazo de doce meses desde la citada entrada en vigor.

- Disposición final primera. Elaboración de la Guía Técnica para la evaluación y prevención de riesgos.

El Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, de acuerdo con lo dispuesto en el apartado 3 del artículo 5 del Real Decreto 39/1997, de 17 de enero, por el que se aprueba el Reglamento de los Servicios de Prevención, elaborará y mantendrá actualizada una Guía Técnica para la evaluación y prevención de los riesgos relativos a la utilización de equipos que incluyan pantallas de visualización.

- Disposición final segunda. Habilitación normativa.

Se autoriza al Ministro de Trabajo y Asuntos Sociales para dictar, previo informe de la Comisión Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo, las disposiciones necesarias en desarrollo de este Real Decreto y, específicamente, para proceder a la modificación del anexo del mismo para aquellas adaptaciones de carácter estrictamente técnico en función del progreso técnico, de la evolución de las normativas o especificaciones internacionales o de los conocimientos en el área de los equipos que incluyan pantallas de visualización.

Dado en Madrid a 14 de abril de 1997.

JUAN CARLOS R.
El Ministro de Trabajo y Asuntos Sociales,
JAVIER ARENAS BOCANEGRA

10.1.2 Ordenanza General de Seguridad e Higiene en el Trabajo [26]

Artículo 13. Seguridad estructural

Todos los edificios, permanentes o provisionales, serán de construcción segura y firme para evitar riesgos de desplome y los derivados de los agentes atmosféricos. Los cimientos, pisos y demás elementos de los edificios ofrecerán resistencia suficiente para sostener y suspender con seguridad las cargas para los que han sido calculados. Se indicará por medio de rótulos o inscripciones las cargas que los locales puedan soportar o suspender, quedando prohibido sobrecargar los pisos y plantas de los edificios

Artículo 14. Superficie y cubicación

Los locales de trabajo reunirán las siguientes condiciones mínimas:

1. Tres metros de altura desde el piso al techo.
2. Dos metros cuadrados de superficie por cada trabajador.
3. Diez metros cúbicos por cada trabajador.

No obstante, en los establecimientos comerciales, de servicios y locales destinados a oficinas y despachos la altura a que se refiere el apartado a) del número anterior podrá quedar reducida hasta 2,50 metros, pero respetando la cubicación por trabajador que se establece en el apartado c), y siempre que se renueve el aire suficientemente.

Para el cálculo de la superficie y volumen no se tendrán en cuenta los espacios ocupados por máquinas, aparatos, instalaciones y materiales.

Artículo 15. Suelos, techos y paredes

El pavimento constituirá un conjunto homogéneo, llano y liso sin soluciones de continuidad; será de material consistente, no resbaladizo o susceptible de serlo con el uso y de fácil limpieza.

Estará al mismo nivel, y de no ser así, se salvarán las diferencias de altura por rampas de pendiente no superior al 10 por 100.

Las paredes serán lisas, guarnecidas o pintadas en tonos claros y susceptibles de ser lavadas o blanqueadas.

Los techos deberán reunir las condiciones suficientes para resguardar a los trabajadores de las inclemencias del tiempo.

Artículo 25. Iluminación-Disposiciones generales

Todos los lugares de trabajo o tránsito tendrán iluminación natural, artificial o mixta apropiada a las operaciones que se ejecuten.

Siempre que sea posible se empleará la iluminación natural.

Se intensificará la iluminación de máquinas peligrosas, lugares de tránsito con riesgo de caídas, escaleras y salidas de urgencia.

Se deberá graduar la luz en los lugares de acceso a zonas de distinta intensidad luminosa.

Artículo 30. Ventilación, temperatura y humedad

En los locales de trabajo y sus anexos se mantendrán, por medios naturales o artificiales, condiciones atmosféricas adecuadas, evitando el aire viciado, exceso de calor y frío, humedad o sequía y los olores desagradables.

Las emanaciones de polvo, fibras, humos, gases, vapores o neblinas, desprendidos en locales de trabajo, serán extraídos, en lo posible, en su lugar de origen, evitando su difusión por la atmósfera.

En ningún caso el anhídrido carbónico o ambiental podrá sobrepasar la proporción de 50/10.000, y el monóxido de carbono, la de 1/10.000.

Se prohíbe emplear braseros, salamandras, sistemas de calor por fuego libre, salvo a la intemperie y siempre que no impliquen riesgo de incendio o explosión.

En los locales de trabajo cerrados, el suministro de aire fresco y limpio por hora y trabajador será, al menos, de 30 a 50 metros cúbicos, salvo que se efectúe una renovación total del aire varias veces por hora, no inferior a seis veces para trabajos sedentarios ni diez veces para trabajos que exijan esfuerzo físico superior al normal.

La circulación de aire en locales cerrados se acondicionará de modo que los trabajadores no estén expuestos a corrientes molestas y que la velocidad del aire no exceda de 15 metros por minuto con temperatura normal, ni de 45 metros por minuto en ambientes muy calurosos.

En los centros de trabajo expuestos a altas y bajas temperaturas serán evitadas las variaciones bruscas por el medio más eficaz.

Cuando la temperatura sea extremadamente distinta entre los lugares de trabajo, deberán existir locales de paso para que los operarios se adapten gradualmente a unas y otras.

Se fijan como límites normales de temperatura y humedad en locales y para los distintos trabajos, siempre que el procedimiento de fabricación lo permita, los siguientes:

- Para trabajos sedentarios: De 17 a 22 grados centígrados.
- Para trabajos ordinarios: De 15 a 18 grados centígrados.
- Para trabajos que exijan acusado esfuerzo muscular: De 12 a 15 grados centígrados.

Este hecho se llevará a cabo mediante un termostato y un sistema de calefacción que mantendrá la temperatura dentro de los rangos exigidos.

La humedad relativa de la atmósfera oscilará del 40 al 60 por 100, salvo en instalaciones en que haya peligro por generarse electricidad estática, que deberá estar por encima del 50 por 100.

8. Las instalaciones generadoras de calor o frío se situarán con la debida separación de los locales de trabajo para evitar en ellos peligros de incendio o explosión, el desprendimiento de gases nocivos, irradiaciones directas de calor o frío y las corrientes de aire perjudiciales al trabajador.

9. Todos los trabajadores estarán debidamente protegidos contra las irradiaciones directas y excesivas de calor.

10. En los trabajos que hayan de realizarse en locales cerrados con extremado frío o calor se limitará la permanencia de los operarios estableciendo, en su caso, los turnos adecuados.

Artículo 32. Limpieza de locales

Los locales de trabajo y dependencias anejas deberán mantenerse siempre en buen estado de aseo, para lo que se realizarán las limpiezas necesarias.

En los locales susceptibles de producir polvo, la limpieza se efectuará por medios húmedos cuando no sea peligrosa, o mediante aspiración en seco cuando el proceso productivo lo permita.

Todos los locales deberán someterse a una limpieza con la frecuencia necesaria y siempre que sea posible fuera de las horas de trabajo, con la antelación precisa para que puedan ser ventilados durante media hora al menos antes de la entrada al trabajo.

Cuando el trabajo sea continuo se extremarán las precauciones para evitar los efectos desagradables o nocivos del polvo y residuos y los entorpecimientos que la misma limpieza puede causar en el trabajo.

Las operaciones de limpieza se realizarán con mayor esmero en las inmediaciones de los lugares ocupados por máquinas, aparatos o dispositivos, cuya utilización ofrezca mayor peligro. El pavimento no estará encharcado y se conservará limpio de aceite, grasas u otras materias resbaladizas.

Los operarios o encargados de limpieza de los locales o elementos de la instalación que ofrezcan peligro para su salud al realizarla, irán provistos de equipo protector adecuado.

Los trabajadores encargados del manejo de aparatos, máquinas e instalaciones, deberán mantenerlos siempre en buen estado de limpieza.

Se evacuarán o eliminarán los residuos de primeras materias o de fabricación, bien directamente por medio de tuberías o acumulándolos en recipientes adecuados.

Igualmente se eliminarán las aguas residuales y las emanaciones molestas o peligrosas por procedimientos eficaces.

Como líquidos de limpieza o desengrasado, se emplearán, preferentemente, detergentes. En los casos que sea imprescindible limpiar o desengrasar con gasolina y otros derivados del petróleo, estará prohibido fumar.

10.1.3 Disposición 4911 del BOE núm. 130 de 2020-Capítulo 1 [27]

Artículo 1. Objeto.

Esta orden tiene por objeto establecer las condiciones para la flexibilización de determinadas restricciones de ámbito nacional establecidas por el estado de alarma, en aplicación de la fase 1 del Plan para la transición hacia una nueva normalidad.

Artículo 2. Ámbito de aplicación.

Esta orden será de aplicación a las actividades objeto de la misma que se desarrollen en las unidades territoriales que constan en el anexo, así como a las personas que residan en dichas unidades, de acuerdo con lo previsto en el segundo párrafo del artículo 3 del Real Decreto 514/2020, de 8 de mayo, por el que se prorroga el estado de alarma declarado por el Real Decreto 463/2020, de 14 de marzo. Sin perjuicio de lo anterior, lo previsto en los Capítulos VIII, IX, X y XI, así como lo dispuesto en los artículos 41 y 42 no será de aplicación respecto de las unidades territoriales contempladas en el apartado quince del anexo.

Las personas vulnerables al COVID-19 también podrán hacer uso de las habilitaciones previstas en esta orden, siempre que su condición clínica esté controlada y lo permita, y manteniendo rigurosas medidas de protección.

No podrán hacer uso de dichas habilitaciones, ya sea para reincorporarse a su puesto de trabajo o para acudir a los locales, establecimientos, centros, lugares de espectáculos o realizar las actividades a que se refiere esta orden, las personas que presenten síntomas o estén en aislamiento domiciliario debido a un diagnóstico por COVID-19, o que se encuentren en período de cuarentena domiciliaria por haber tenido contacto estrecho con alguna persona con síntomas o diagnosticada de COVID-19.

Artículo 3. Fomento de los medios no presenciales de trabajo.

Siempre que sea posible, se fomentará la continuidad del teletrabajo para aquellos trabajadores que puedan realizar su actividad laboral a distancia.

Artículo 4. Medidas de higiene y/o de prevención para el personal trabajador de los sectores de actividad previstos en esta orden.

Sin perjuicio del cumplimiento de la normativa de prevención de riesgos laborales y de la normativa laboral, el titular de la actividad económica o, en su caso, el director de los centros educativos y entidades previstos en esta orden deberá adoptar las medidas necesarias para cumplir las medidas de higiene y/o prevención para el personal trabajador de los sectores de actividad establecidos en esta orden. En este sentido, se asegurará que todos los trabajadores tengan permanentemente a su disposición en el lugar de trabajo geles hidroalcohólicos o desinfectantes con actividad virucida autorizados y registrados por el Ministerio de Sanidad para la limpieza de manos, o cuando esto no sea posible, agua y jabón. Asimismo, cuando no pueda garantizarse la distancia de seguridad interpersonal de aproximadamente dos metros, se asegurará que los trabajadores dispongan de equipos de protección adecuados al nivel de riesgo. En este caso, todo el personal deberá estar formado e informado sobre el correcto uso de los citados equipos de protección. Lo dispuesto en el párrafo anterior será también aplicable a todos los trabajadores de empresas que presten servicios en los centros, entidades, locales o establecimientos a los que resulta de aplicación esta orden, ya sea con carácter habitual o de forma puntual.

El fichaje con huella dactilar será sustituido por cualquier otro sistema de control horario que garantice las medidas higiénicas adecuadas para protección de la salud y la seguridad de los trabajadores, o bien se deberá desinfectar el dispositivo de fichaje antes y después de cada uso, advirtiendo a los trabajadores de esta medida.

La disposición de los puestos de trabajo, la organización de los turnos y el resto de condiciones de trabajo existentes en los centros, entidades, locales y establecimientos se modificarán, en la medida necesaria, para garantizar la posibilidad de mantener la distancia de seguridad interpersonal mínima de dos metros entre los trabajadores, siendo esta responsabilidad del titular de la actividad económica o, en su caso, del director de los centros educativos y entidades, o de la persona en quien estos deleguen.

Asimismo, las medidas de distancia previstas en esta orden deberán cumplirse, en su caso, en los vestuarios, taquillas y aseos de los trabajadores, así como en cualquier otra zona de uso común.

Si un trabajador empezara a tener síntomas compatibles con la enfermedad, se contactará de inmediato con el teléfono habilitado para ello por la comunidad autónoma o centro de salud correspondiente y, en su caso, con los correspondientes servicios

de prevención de riesgos laborales. Siempre que sea posible, el trabajador se colocará una mascarilla, debiendo abandonar, en todo caso, su puesto de trabajo hasta que su situación médica sea valorada por un profesional sanitario.

Artículo 5. Medidas para prevenir el riesgo de coincidencia masiva de personas en el ámbito laboral.

Sin perjuicio de la adopción de las necesarias medidas de protección colectiva e individual, los centros deberán realizar los ajustes en la organización horaria que resulten necesarios para evitar el riesgo de coincidencia masiva de personas, trabajadoras o no, en espacios o centros de trabajo durante las franjas horarias de previsible máxima afluencia o concentración, atendiendo a la zona geográfica de la que se trate, y de conformidad con lo recogido en los siguientes apartados de este artículo.

Se considerará que existe riesgo de coincidencia masiva de personas cuando no haya expectativas razonables de que se respeten las distancias mínimas de seguridad, particularmente en las entradas y salidas al trabajo, teniendo en cuenta tanto la probabilidad de coincidencia masiva de las personas trabajadoras como la afluencia de otras personas que sea previsible o periódica.

Los ajustes a los que se refiere el apartado anterior deberán efectuarse teniendo en cuenta las instrucciones de las autoridades competentes, así como, en su caso lo previsto en la normativa laboral y convencional que resulte de aplicación.

Artículo 6. Medidas de higiene exigibles a las actividades previstas en esta orden.

El titular de la actividad económica o, en su caso, el director de los centros educativos y entidades deberá asegurar que se adoptan las medidas de limpieza y desinfección adecuadas a las características e intensidad de uso de los centros, entidades, locales y establecimientos previstos en esta orden. En las tareas de limpieza se prestará especial atención a las zonas de uso común y a las superficies de contacto más frecuentes como pomos de puertas, mesas, muebles, pasamanos, suelos, teléfonos, perchas, y otros elementos de similares características, conforme a las siguientes pautas:

- Se utilizarán desinfectantes como diluciones de lejía (1:50) recién preparada o cualquiera de los desinfectantes con actividad virucida que se encuentran en el mercado y que han sido autorizados y registrados por el Ministerio de Sanidad. En el uso de ese producto se respetarán las indicaciones de la etiqueta.
- Tras cada limpieza, los materiales empleados y los equipos de protección utilizados se desecharán de forma segura, procediéndose posteriormente al lavado de manos.

Las medidas de limpieza se extenderán también, en su caso, a zonas privadas de los trabajadores, tales como vestuarios, taquillas, aseos, cocinas y áreas de descanso. Asimismo, cuando existan puestos de trabajo compartidos por más de un trabajador, se realizará la limpieza y desinfección del puesto tras la finalización de cada uso, con especial atención al mobiliario y otros elementos susceptibles de manipulación.

En el caso de que se empleen uniformes o ropa de trabajo, se procederá al lavado y desinfección diaria de los mismos, debiendo lavarse de forma mecánica en ciclos de lavado entre 60 y 90 grados centígrados. En aquellos casos en los que no se utilice uniforme o ropa de trabajo, las prendas utilizadas por los trabajadores en contacto con clientes, visitantes o usuarios, también deberán lavarse en las condiciones señaladas anteriormente.

Se deben realizar tareas de ventilación periódica en las instalaciones y, como mínimo, de forma diaria y por espacio de cinco minutos.

Cuando en los centros, entidades, locales y establecimientos previstos en esta orden haya ascensor o montacargas, su uso se limitará al mínimo imprescindible y se utilizarán preferentemente las escaleras. Cuando sea necesario utilizarlos, la ocupación máxima de los mismos será de una persona, salvo que sea posible garantizar la separación de dos metros entre ellas, o en aquellos casos de personas que puedan precisar asistencia, en cuyo caso también se permitirá la utilización por su acompañante.

Cuando de acuerdo con lo previsto en esta orden el uso de los aseos esté permitido por clientes, visitantes o usuarios, su ocupación máxima será de una persona, salvo en aquellos supuestos de personas que puedan precisar asistencia, en cuyo caso también se permitirá la utilización por su acompañante. Deberá procederse a la limpieza y desinfección de los referidos aseos, como mínimo, seis veces al día.

Se fomentará el pago con tarjeta u otros medios que no supongan contacto físico entre dispositivos, evitando, en la medida de lo posible, el uso de dinero en efectivo. Se limpiará y desinfectará el datáfono tras cada uso, así como el TPV si el empleado que lo utiliza no es siempre el mismo.

Se deberá disponer de papeleras, a ser posible con tapa y pedal, en los que poder depositar pañuelos y cualquier otro material desechable. Dichas papeleras deberán ser limpiadas de forma frecuente, y al menos una vez al día.

Lo previsto en este artículo se aplicará sin perjuicio de las especialidades en materia de limpieza y desinfección establecidas en esta orden para sectores concretos.

10.2 Condiciones de especificaciones técnicas

Este trabajo se ha basado en la simulación de un motor de combustión mediante un software proporcionado por el departamento. Para llevar el proyecto a cabo, sería necesario un ordenador con los requisitos especificados, conexión a internet y varios conocimientos previos sobre temas relacionados con termofluidodinámica, aerodinámica y sistemas de control.

10.2.1 Especificaciones de equipos

Hardware

Para realizar este proyecto no es necesario que el equipo informático sea lo más sofisticado posible, sin embargo disponer de varios núcleos de procesadores agilizará el cálculo. Por ello, un ordenador de gama media-alta sería el adecuado para realizar este trabajo.

Software

Para realizar el presente proyecto se requieren como mínimo los siguientes programas o similares a ellos.

- Matlab
- Mathematica
- Microsoft Office
- VEMOD
- QElectroTech
- Latex

Conexión a Internet

La conexión a internet ha sido muy necesaria en la realización de este proyecto, especialmente debido a la situación excepcional del COVID-19, que ha obligado a realizar reuniones a distancia con el grupo de trabajo por medio de videoconferencias.

La conexión a internet, también es necesaria para la búsqueda de información requerida en la realización del proyecto

Conocimientos previos

Como se ha dicho antes, para la realización de este proyecto es necesario conocer ciertos temas relacionados con Aerodinámica, Termofluidodinámica y Sistemas de Control. Esto permitirá entender los fenómenos que ocurren en el motor y solucionar problemas si es preciso.

Sobre los temas relacionados con el proyecto, no es necesario tener conocimientos previos, pues estos se adquirirán durante la realización del proyecto.

También es necesario disponer de un buen nivel de inglés, pues la mayor parte de la documentación relacionada con Oxi-Combustión se encuentra redactada en este idioma.

Conocimientos informáticos

Es necesario disponer de gran experiencia y manejo en programas como Matlab y Microsoft Office pues los códigos de compilación pueden tener un nivel avanzado.

En cuanto a la utilización del programa VEMOD no se necesita experiencia previa para su utilización, pero sí un pequeño periodo de aprendizaje sobre el mismo.

Supervisión

La persona encargada de la supervisión del proyecto, deberá contar con experiencia en la realización de proyectos de viabilidad en el ámbito aeronáutico. Además, gran parte de estos proyectos deberán haber sido llevados a cabo de manera satisfactoria en cuanto a plazos, presupuesto, cumplimiento de requisitos y aceptación se refiere.

10.2.2 Condiciones de calidad

La empresa que lleve a cabo este proyecto deberá garantizar la calidad final del producto. Será necesaria la realización de pruebas de calidad intermedias a lo largo del desarrollo del proyecto. Tanto el proceso de pruebas y resultados como el sistema de calidad de la empresa deberán estar documentados convenientemente. Se deberán presentar informes detallados sobre los resultados de cada prueba realizada, los cuales, deberán incluir tipo de prueba, fecha, descripción, personal encargado, resultados y observaciones.

10.2.3 Condiciones de garantía y mantenimiento

La entidad realizadora de este trabajo garantizará, durante dos años el buen funcionamiento del producto final, por tanto, se compromete a solucionar los problemas ocasionados por el uso normalizado de éste, así como ofrecer servicio de ayuda para el buen manejo del mismo.

La garantía comenzará a ser efectiva en el mismo momento de recepción de los sistemas.

Siempre que no se sigan las directrices dadas por el fabricante, la garantía quedará invalidada.

10.2.4 Reclamaciones

Solo se prestará atención a las reclamaciones realizadas por escrito en un periodo de quince días hábiles, desde el momento de la entrega del producto. En caso de que la mercancía sea defectuosa, el fabricante solo se compromete a la sustitución de ésta sin contemplar cualquier otra responsabilidad.

10.2.5 Revisión de precios

Los precios mostrados en el presente presupuesto son invariables, independientemente de cambios en los costes de personal y equipos.

10.2.6 Fianza

El comprador se debe comprometer a aportar un aval por valor del 10 % del precio final del producto en concepto de fianza, como respuesta al cumplimiento de las obligaciones del contrato vigente. Dicha fianza se mantendrá hasta el final del periodo de la garantía. La fianza será devuelta tras ese periodo.

10.2.7 Aceptación

La aceptación del producto se cumplimentará con los procesos de prueba o ensayos establecidos por el vendedor. Estos procesos deberan ser llevados a cabo en el lugar de instalación del producto, resultando necesario que el vendedor demuestre mediante dichas pruebas que el producto se encuentra en condiciones normales de funcionamiento. Si la instalación del producto se demorara mas de 30 días se considerará que el producto ha sido aceptado por parte del comprador.

10.3 Referencias

- [25] “Real Decreto 488/1997, de 14 de abril, sobre disposiciones mínimas de seguridad y salud relativas al trabajo con equipos que incluyen pantallas de visualización.” En: (1997) (vid. pág. 85).
- [26] “BOE núm. 64, de 16 de marzo de 1971, páginas 4303 a 4314: ORDENANZA GENERAL DE SEGURIDAD E HIGIENE EN EL TRABAJO”. En: (1971) (vid. pág. 89).
- [27] “Disposición 4911 del BOE núm. 130 de 2020”. En: (2020) (vid. pág. 93).

Apéndice A

Anexo I: Polar Parabólica de coeficientes constantes

La fuerza aerodinámica total, definida como la resultante de las fuerzas que experimenta un sólido por la acción de un fluido en movimiento alrededor de su superficie, se divide en la componente perpendicular a la corriente, sustentación (Lift) Ecuación A.1, y la componente paralela a la corriente de fluido, resistencia (Drag) Ecuación A.2.

$$L = \frac{1}{2} \rho v^2 S_w C_L \quad (\text{A.1})$$

$$D = \frac{1}{2} \rho v^2 S_w C_D \quad (\text{A.2})$$

Cuando se representan ambos valores enfrentados en un gráfico, éste adquiere el nombre de curva polar.

Para vuelos completamente subsónicos $M < 0.6$ se puede obtener una solución analítica para dicha curva polar, denominada Polar parabólica de coeficientes constantes. Esta expresión ofrece un valor de coeficiente de drag en función del coeficiente de sustentación.

$$C_D = C_{D_0} + K C_L^2 \quad (\text{A.3})$$

El coeficiente K se denomina coeficiente de resistencia inducida y cuantifica la contribución que tiene la sustentación en la resistencia total. Su valor, para bajo número de mach, tiene ecuación analítica y depende directamente del alargamiento alar y del

factor de oswald, el cual depende directamente de la forma del ala y tiene su valor máximo en 1 para alas elípticas.

$$K = \frac{1}{\pi A Re} \quad (A.4)$$

El coeficiente CD_0 se denomina coeficiente de resistencia parásita y es intrínseco a las formas de la aeronave y como interaccionan estas con el fluido que las envuelve.

Este coeficiente CD_0 puede aproximarse según la Ecuación A.5 para vuelo subsónico.

En la Ecuación A.5 se tienen las siguientes variables:

$$CD_0 = \frac{\sum_{i=1}^N (C_{fi} FF_i FI_i S_{weti})}{S_W} + CD_{misc} + CD_p \quad (A.5)$$

- N Número de elementos
- C_f Coeficiente de fricción
- FF Factor de forma
- FI Factor de interferencia
- S_{wet} Superficie mojada
- CD_{misc} Coeficiente de resistencia miscelánea
- CD_p Coeficiente de resistencia debido a perturbaciones

Para el presente cálculo CD_{misc} , CD_p no serán tenidos en cuenta.

C_f viene determinado por el número de Reynolds, el cual diferencia entre régimen laminar y turbulento del flujo sobre el que se sumerge la aeronave.

Para régimen turbulento, donde se realizará el cálculo propuesto, el C_f viene descrito según Ecuación A.10

$$C_f = \frac{0,027}{Re^{1/7}} \quad (A.6)$$

El factor de forma viene determinado para cada parte de la aeronave según su forma aerodinámica, estos se dividen en tres grupos:

- Superficies aerodinámicas (Ala y cola)

$$FF = (1 + 0,6(\frac{t}{c})^2 + 10(\frac{t}{c})^4) \cdot 1,34M^{0,18} \quad (A.7)$$

Donde t es el espesor máximo de dicho elemento, c la cuerda aerodinámica y M el número de Mach

- Fuselaje

$$FF = 1 + \frac{60}{f^3} + \frac{f}{400} \quad (A.8)$$

Donde

$$f = \frac{l}{\sqrt{4\pi S_{max}}} \quad (A.9)$$

Donde l es la longitud del fuselaje y S_{max} es el área máxima frontal del fuselaje

- Tren de aterrizaje y motor

$$FF = 1 + \frac{0,35}{f} \quad (A.10)$$

El factor de interferencia representa la resistencia ofrecida por el cambio en la distribución de presiones ocasionada por la enterferencia entre elementos de la aeronave, su efecto se cuantifica con valores iguales o mayores que 1.

- FI Ala 1.4
- FI Estabilizador horizontal y vertical 1.2
- FI Fuselaje y Motor 1.4
- FI Tren de aterrizaje 1.25

Apéndice B

Anexo II: Ecuaciones Diferenciales de la mecánica de vuelo

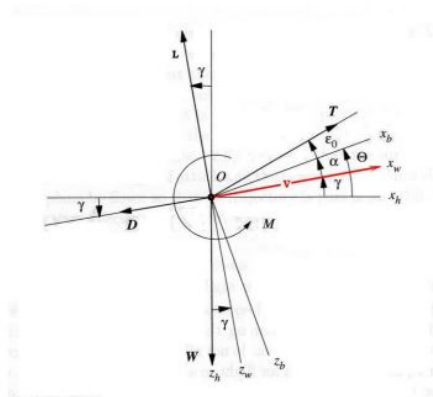


Figura B.1: Sistema de ejes de referencia de un aeronave

- O : origen del Sistema de Referencia, centro de gravedad del avión
- (x_b, z_b) : sistema de ejes Cuerpo
- (x_w, z_w) : sistema de ejes Viento
- (x_h, z_h) : sistema de ejes Horizonte
- θ : ángulo de asiento longitudinal

- γ : pendentete de trayectoria
- M: momento de cabeceo (positivo en el sentido de θ)

$$\frac{dx}{dt} = v \cos \gamma \quad (\text{B.1})$$

$$\frac{dz}{dt} = v \sin \gamma \quad (\text{B.2})$$

$$m \frac{dv}{dt} = T \cos \alpha - D - W \sin \gamma \quad (\text{B.3})$$

$$mv \frac{d\gamma}{dt} = T \cos \alpha - D - W \sin \gamma \quad (\text{B.4})$$

$$\frac{dW}{dt} = -C_e T \quad (\text{B.5})$$

$$\frac{d\theta}{dt} = q \quad (\text{B.6})$$

$$\frac{dq}{dt} = \frac{M}{I_{yy}} \quad (\text{B.7})$$

$$\theta = \gamma + \alpha \quad (\text{B.8})$$

Bibliografía

- [1] IPCC. "Calentamiento global de 1.5°C". En: (2019) (vid. pág. 2).
- [2] Günter Scheffknecht; Leema Al-Makhadmeh1; Uwe Schnell; Jörg Maier. "Oxy-fuel coal combustion—A review of the current state-of-the-art". En: (2011) (vid. pág. 3).
- [3] J Wall T.F.; Yu. "Coal-fired oxyfuel technology status and progress to deployment". En: (2009) (vid. pág. 3).
- [4] Hannu Jaaskelainen. "Low Temperature Combustion". En: *EPA* (2004) (vid. pág. 8).
- [5] "NOx: la boina del mundo". En: *EcoPost* (2015) (vid. pág. 9).
- [6] Fundación Crana. *Óxidos de nitrógeno (NOX = NO + NO2)*. URL: http://www.crana.org/es/contaminacion/mas-informacion_3/axidos-nitrageno-nox-no2 (visitado 20-10-2016) (vid. pág. 10).
- [7] Agencia EFE. "Toda la población valenciana respiró aire contaminado en 2017". En: *El Mundo* (2017) (vid. pág. 11).
- [8] Jesús García. *Pérdidas de potencia en el motor* (vid. pág. 14).
- [9] Kang Y.Huh Youngjae Lee. "Analysis of different modes of low temperature combustion by ultra-high EGR and modulated kinetics in a heavy duty diesel engine". En: *Elsevier* (2014) (vid. pág. 14).
- [10] Talleres La Comunidad. *Sistema de escape SCR AdBlue*. URL: <https://www.lacomunidadeltaller.es/sistema-de-escape-scr-adblue/> (visitado 22-05-2019) (vid. pág. 16).
- [11] Instituto para la Salud Geoambiental. *Dióxido de carbono CO2*. URL: <https://www.saludgeoambiental.org/> (visitado 2019) (vid. pág. 16).
- [12] U.S. Department of Commerce; National Oceanic Atmospheric Administration; NOAA Research. *Trends in Atmospheric Carbon Dioxide*. URL: <https://www.esrl.noaa.gov/> (visitado 2020) (vid. pág. 17).
- [13] *Enciclopedia Ilustrada de la Aviación Vol.5 pags. 1098-1099*. Editorial Delta, 1982 (vid. pág. 19).

- [14] Edward H Phillips. *Wings of Cessna, Model 120 to the Citation III*. 1986 (vid. págs. 20, 21).
- [15] Prof. Asignatura. "Mecánica de vuelo-Procedimientos₀₂". En: (2019) (vid. pág. 21).
- [16] Federal Aviation Administration. "TYPE CERTIFICATE DATA SHEET NO. E-252". En: (2017) (vid. pág. 24).
- [17] OACI. "Anexo 16, Vol II". En: (2015) (vid. pág. 25).
- [18] Maruti Corporation. *Planta VPSA*. URL: <http://vpsaoxygenplant.com/> (visitado 12-04-2020) (vid. pág. 30).
- [19] D. Catalán-Martínez; A. Santafé-Moros; J.M. Gozávez-Zafrilla; J. García-Fayos; J.M. Serra. "Characterization of oxygen transport phenomena on BSCF membranes assisted by fluid dynamic simulations including surface exchange". En: *Chemical Engineering Journal* (2020) (vid. pág. 31).
- [20] Jaap F. Vente; Wim. G. Haije; Ruud IJpelaan; Frans T. Rusing. "Non the full-scale module design of an air separation unit using mixed ionic electronic conducting membranes". En: *Journal of Membrane Science* (2005) (vid. pág. 33).
- [21] Prof. Asignatura. "Mecánica de vuelo-TEMA-06-Despegues". En: (2019) (vid. pág. 54).
- [22] S.A Abelló Linde. "Trabajando con Dióxido de carbono CO₂". En: (2020) (vid. pág. 69).
- [23] CMT-Motores Térmicos. "Evaluation of the OxyC concept". En: (7-04-2020) (vid. pág. 73).
- [24] Sergio Fernández Mungía. *Generación eléctrica en España*. URL: <https://www.diariorenovables.com/> (visitado 19-04-2019) (vid. pág. 82).
- [25] "Real Decreto 488/1997, de 14 de abril, sobre disposiciones mínimas de seguridad y salud relativas al trabajo con equipos que incluyen pantallas de visualización." En: (1997) (vid. pág. 85).
- [26] "BOE núm. 64, de 16 de marzo de 1971, páginas 4303 a 4314: ORDENANZA GENERAL DE SEGURIDAD E HIGIENE EN EL TRABAJO". En: (1971) (vid. pág. 89).
- [27] "Disposición 4911 del BOE núm. 130 de 2020". En: (2020) (vid. pág. 93).