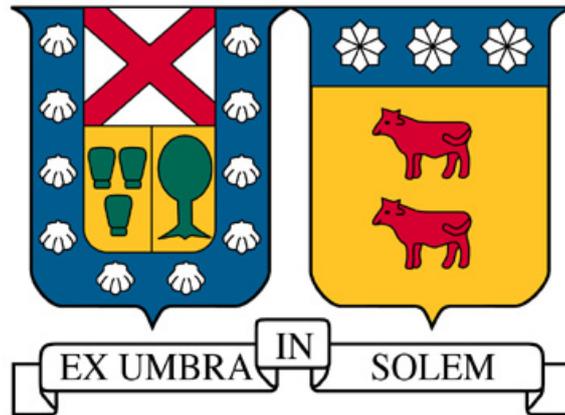


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

ACADEMIA DE CIENCIAS AERONÁUTICAS

SANTIAGO – CHILE



**ELECTRIFICACIÓN DEL TRACTOR DE REMOLQUE SIN
BARRA 'EXPEDITER 160' DESTINADO A AVIONES
COMERCIALES DE HASTA 300 TONELADAS.**

JUAN JOSÉ PUENTE SANDOVAL

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO EN AVIACIÓN COMERCIAL

PROFESOR GUÍA : SR. RODRIGO SUÁREZ V.

PROFESOR CORREFERENTE : SRA. ANAMARÍA ARPEA I.

JULIO 2017

Resumen y palabras clave

Las últimas mejoras en las tecnologías de las baterías y motores han permitido que el coche eléctrico deje de ser un sueño y se convierta en una realidad viable, limpia y económica. Esta revolución que empezó hace años en las carretillas de alimentos está llegando cada vez con más fuerza a vehículos más grandes y pesados como furgonetas y camiones.

Este trabajo estudia la viabilidad tecnológica y económica de la electrificación de un tractor de empuje de tamaño medio. Tras un breve repaso de la situación actual de estos vehículos en los aeropuertos y la generación de gases contaminantes producidos por ellos, el estudio se divide en dos partes:

La primera parte consta de un listado explicativo de cada uno de los elementos básicos de un sistema propulsivo eléctrico: motor, controlador, baterías, convertidores, cargadores, BMS...haciendo una propuesta realista y actual para electrificar el sistema térmico-diésel empleado hoy en día.

La segunda realiza un '*Power Budget*' que garantice un turno de trabajo de 8 horas continuas y además un presupuesto económico que mide la inversión inicial así como los gastos de consumos y mantenimiento en los siguientes años, divididos en tres horizontes: uno optimista, uno moderado y uno conservador. Así mismo se propone una instalación solar fotovoltaica para una completa eliminación de contaminación directa.

En resumen la tecnología actual permite una reducción total de las emisiones directas de gases con un ahorro de casi el 40% en una inversión a 10 años, manteniendo una utilidad superior al 90% con respecto a uno convencional.

Conversión eléctrica

Futuro sostenible

Tractor de remolque

Aeropuertos

Electrificación

Emisiones CO₂

Cero emisiones

Última tecnología

Paneles solares

Summary and keywords

The latest improvements in battery and motor technologies allow the electric car to stop being a dream and become a viable, clean and economic reality. This revolution which began years ago in food trolleys is coming hardly to larger and heavier vehicles such as vans and trucks.

This dissertation studies the technological and economic electrification's viability of a medium-sized pushback tractor. After a brief review of the current situation of these vehicles at airports and the generation of polluting gases produced by them, the study is divided into two parts:

The first part consists of an explanatory list of each of the basic elements of an electric propulsive system: motor, controller, batteries, converters, chargers, BMS ... performing a realistic and current proposal to electrify the thermal-diesel system used nowadays.

The second performs a '*Power Budget*' that guarantees a work shift of 8 continuous hours together with an economic budget that measures the initial investment as well as the expenses of consumptions and maintenance in the following years. Furthermore, a solar photovoltaic plant installation is proposed for a complete elimination of contamination.

In summary, the proposed technology allows a total reduction of direct gas emissions with a saving of nearly 40% in a 10-year investment, reaching a profit higher than 90% over a conventional one.

Electric conversion

Sustainable future

Pushback tractor

Airports

Electrification

CO₂ Emissions

Zero Emissions

Latest technology

Solar panels

Índice de contenidos

Resumen y palabras clave.....	2
Summary and keywords.....	3
1. Antecedentes Generales.....	9
1.1. Unidades.....	8
1.2. Siglas.....	8
1.3. Objetivos.....	9
1.3.1. General.....	9
1.3.2. Específicos.....	9
1.4. Justificación.....	10
1.5. Metodología.....	12
1.6. Alcance.....	12
2. Estado del Arte.....	13
2.1. Comparativa actual.....	13
3. Desarrollo.....	15
3.1. Partes de un sistema de propulsión eléctrico.....	15
3.2. Diseño.....	16
3.3. Cálculos de potencia, par y consumo.....	18
3.4. Motor eléctrico.....	20
3.4.1. Transmisión.....	24
3.5. Controlador.....	26
3.5.1. Freno regenerativo.....	27
3.5.2. Control vectorial.....	28
3.6. Packs de Baterías.....	30
3.6.1. Consumos totales.....	32
3.6.2. Conversores.....	34
3.6.3. Carga.....	35
3.6.4. BMS.....	38
3.7. Sistema de gestión de temperatura.....	39
3.8. Instalación de paneles solares.....	41

3.9. Estimación de costos.....	44
3.9.1. Horizonte optimista.....	45
3.9.2. Horizonte moderado.....	46
3.9.3. Horizonte conservador.....	47
3.10. Emisiones contaminantes.....	48
4. Conclusiones.....	49
4.1. Posibles continuaciones del trabajo.....	51
4.1.1. Viabilidad carreteo extendido.....	51
4.1.2. Viabilidad otros tamaños.....	51
4.1.3. Abastecimiento de energía al avión.....	51
5. Bibliografía.....	52
5.1. Publicaciones y Artículos.....	52
5.2. Libros.....	53
5.3. Fichas técnicas.....	53
5.4. Links.....	54
Anexos.....	55
Anexo 1: cálculos Excel.....	55
Anexos digitales.....	57

Índice de gráficos

<u>Gráfico 1.4.1</u> - Contaminación aeropuerto Seattle-Tacoma SEA.	10
<u>Gráfico 1.4.2</u> - Contaminación aeropuerto Vancouver YVR.....	11
<u>Gráfica 3.3.1</u> - Velocidad, Par y Potencia en un movimiento tipo.	19
<u>Gráfica 3.4.1.1</u> - Comparativa par y potencia motor térmico y eléctrico.	24
<u>Gráfica 3.6.1</u> - Vida útil y ciclos de carga de baterías LiFePo4.	30
<u>Gráfica 3.6.2.</u> - Características de descarga de baterías LiFePo4.	31
<u>Gráfica 3.6.1.1.</u> - Gasto energéticos en porcentaje.	33
<u>Gráfica 4.1</u> - Comparativa costos por hora.	51

Índice de tablas

<u>Tabla 1.1.1</u> - Simbología de unidades empleadas en el trabajo.	5
<u>Tabla 1.4.1</u> - Emisiones totales AMB por vehículos terrestres en 2015.....	11
<u>Tabla 2.1.1</u> - Comparativa actual tractores de remolque de motor térmico.	13
<u>Tabla 2.1.2</u> - Comparativa actual tractores de remolque de motor eléctrico.	13
<u>Tabla 2.1.3</u> - Comparativa actual tractores de remolque de motor híbrido.	14
<u>Tabla 3.2.1</u> - Componentes tractor de empuje.	16
<u>Tabla 3.3.1</u> - Datos iniciales de cálculo con tractor cargado y en vacío.....	18
<u>Tabla 3.3.2</u> - Coeficientes de rodadura en función de las superficies.	18
<u>Tabla 3.3.3</u> -Características y requerimiento del motor y baterías.	19
<u>Tabla 3.4.1</u> - Resumen tecnologías motores actuales.	22
<u>Tabla 3.4.2</u> - Comparativa motor térmico y electrificación.	23
<u>Tabla 3.4.1.1</u> - Relación transmisión cargado y en vacío.	25
<u>Tabla 3.4.1.2</u> - Coeficientes de seguridad de par y potencia.	25
<u>Tabla 3.5.1.</u> - Características controlador Schneider.	29
<u>Tabla 3.6.1</u> - Ventajas e inconvenientes de baterías Li-ion.	30
<u>Tabla 3.6.2.</u> - Características baterías SinoPoly.	31
<u>Tabla 3.6.1.1.</u> - ‘Power Budget’.	32
<u>Tabla 3.6.2.1.</u> - Características conversor WEG.	34
<u>Tabla 3.6.2.2.</u> - Características conversor Newmar.	34
<u>Tabla 3.6.3.1.</u> - Características cargador UP Wallabox.	37
<u>Tabla 3.6.3.2.</u> - Características cargador EVR3 ES.	38
<u>Tabla 3.6.4.1.</u> - Características BMS BesTech Power.	38
<u>Tabla 3.7.1.</u> - Características sistema gestión de temperatura Hydac.	40
<u>Tabla 3.8.1.</u> - Características paneles solares IUASOL.	41
<u>Tabla 3.8.2.</u> - Configuración y paneles solares techo AMB de 400 MWh.	42
<u>Tabla 3.8.3.</u> - Configuración y paneles solares techo tractor de remolque.	43
<u>Tabla 3.9.1.</u> - Precios y consumos motor combustión y eléctrico.	44
<u>Tabla 3.9.3.1</u> - Estimación de costos en horizonte optimista.	45
<u>Tabla 3.9.3.1</u> - Estimación de costos en horizonte moderado.	46
<u>Tabla 3.9.3.1</u> - Estimación de costos en horizonte conservador.	47
<u>Tabla 3.10.1.</u> - Producción CO ₂ motor combustión y eléctrico.	48
<u>Tabla 3.10.2.</u> - Producción CO ₂ en función del horizonte.	48

Índice de figuras

<u>Figura 3.1.1</u> - Partes básicas de un sistema propulsivo eléctrico.	15
<u>Figura 3.2.1</u> - Diseño actual y simplificación tractor de empuje.....	16
<u>Figura 3.2.2</u> - Diseño final electrificación.	17
<u>Figura 3.4.1</u> - Motor corriente continua CON escobillas.	20
<u>Figura 3.4.2</u> - Motor corriente continua CON escobillas.	20
<u>Figura 3.4.3</u> - Motor corriente alterna de inducción.	21
<u>Figura 3.4.4</u> - Motor Siemens High Torque SIMOTICS HT.....	23
<u>Figura 3.5.1</u> - Esquema funcionamiento controlador.	26
<u>Figura 3.5.1.1</u> - Esquema cuadrantes controlador.	27
<u>Figura 3.5.2.1</u> - Funcionamiento controlador por control vectorial.	28
<u>Figura 3.5.2.</u> - Controlador Schneider.	29
<u>Figura 3.6.1.</u> - Baterías SinoPoly.	31
<u>Figura 3.6.1.2.</u> - Indicador estado batería.	33
<u>Figura 3.6.2.1.</u> - Conversor WEG.	34
<u>Figura 3.6.2.2.</u> - Conversor Newmar.	34
<u>Figura 3.6.2.3.</u> - Esquema completa conversores.	35
<u>Figura 3.6.3.1.</u> - Ratio de carga baterías Li-ión.	36
<u>Figura 3.6.3.3.</u> - Características Supercargador Tesla.	36
<u>Figura 3.6.3.3.</u> - Cargador UP Wallabox.	37
<u>Figura 3.6.3.4.</u> - Cargador EVR3 ES.	38
<u>Figura 3.6.4.1.</u> - BMS BesTech Power.	38
<u>Figura 3.7.1.</u> - Características descarga baterías a diferentes temperaturas.	39
<u>Figura 3.7.2.</u> - Sistema gestión de temperatura Hydac.	40
<u>Figura 3.7.3.</u> - Display temperaturas por sectores.	40
<u>Figura 3.8.1.</u> - Paneles solares IUASOL.	41
<u>Figura 3.8.2.</u> - Imagen satelital aeropuerto AMB.	42

Capítulo 1:

Antecedentes generales

1.1. Unidades

Magnitud	Unidad	Abreviatura	Var. físicas	Conversión
Masa	tonelada	t	kg	1t = 1000kg
	kilogramo	kg	kg	
Volumen	litro	l	m ³	1 m ³ = 1000 l
Flujo volumétrico	litros-hora	l/h	m ³ /s	
Velocidad	kilómetro-hora	km/h	m/s	
	metro-segundo	m/s	m/s	1 m/s = 3.6 km/h
Energía	Vatio-hora	Wh	kg*m ² /s ²	1Wh = 3600 J
Par / Torque	Newton-metro	Nm	kg*m ² /s ²	1 Nm = 1 J
Potencia	Vatio	W	kg*m ² /s ³	1kW=1.36 hp
	caballo	hp	kg*m ² /s ³	
Frecuencia	Hertzio	Hz	1/s	

Tabla 1.1.1 - Simbología de unidades empleadas en el trabajo.

1.2. Siglas

AC: Corriente Alterna (Alternative Current)

AFD: Drivers de Frecuencia Ajustable (Adjustable Frequency Drivers)

BMS: Sistema de Gestión de Balanceo de Batería (Balance Management System)

CO: Monóxido de Carbono

CO₂: Dióxido de Carbono

DC: Corriente Continua (Direct Current)

IPCC: Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (Intergovernmental Panel on Climate Change)

LiFePo₄: baterías de Litio Fosfato de Hierro (Lithium Iron Phosphate)

MP₁₀: Material Particulado respirable grueso (hasta 10 micras)

MP_{2,5}: Material Particulado respirable fino (hasta 2.5 micras)

NMHC: Hidrocarburos No Metánicos (No Methanic Hydrocarbures)

NO_x: Óxidos de Nitrógeno

SO_x: Óxidos de Azufre

TOG: Gases Orgánicos Totales (Total Organic Gases)

VOC: Compuestos Orgánicos Volátiles (Volatile Organic Compounds)

1.3. Objetivos

1.3.1. General

Estudiar la **viabilidad tecnológica y económica de la electrificación** del tractor de remolque sin barra '**Expediter 160**' fabricado por la empresa 'JBT' destinado a aviones comerciales de tamaño medio de **hasta 300 toneladas** efectuando una propuesta actual y realista de los componentes principales del vehículo tales como motor, controladora, baterías, inversores...

1.3.2. Específicos

Implementar un '**Power Budget**' de las condiciones energéticas más desfavorables y garantizar un funcionamiento **mínimo de un turno de trabajo de 8 horas**. Así mismo calcular los **tiempos de cargas**, tanto rápidas como totales, en función del método usado y de los packs de baterías empleadas a fin de maximizar la disponibilidad del vehículo.

Identificar las posibles zonas de colocación de una **instalación solar fotovoltaica en el aeropuerto Arturo Merino Benítez**, así como calcular las potencias instaladas posibles que permitan alimentar el tractor de remolque con una energía renovable, limpia e inagotable

Ejecutar una **comparación del coste económico y la contaminación** directa de la versión actual térmica, la electrificación y la electrificación usando los paneles solares fotovoltaicos en una **perspectiva de trabajo de 10 años en tres horizontes económicos**: uno optimista, uno moderado y uno conservador en función de las horas de trabajo que se vaya a emplear.

1.4. Justificación

Según los últimos informes del ‘Intergovernmental Panel on Climate Change’ (IPCC) la aviación genera anualmente unos 650 millones de toneladas de CO₂, lo que representa en torno al 2% del total, de los cuales aproximadamente 30 millones¹ -que corresponde al 5%- se generan en los aeropuertos, zonas normalmente cercanas a urbes en las cuales la contaminación ya es crítica y afecta directamente a la población. A estos datos hay que añadirle el inminente crecimiento de la aviación en continentes por ahora menos expandidos tales como Sudamérica, Asia y, en menor medida, África que generarán que estas cantidades y porcentajes aumenten en las próximas décadas.

Centrándose en la contaminación en los aeropuertos que es la que se intentará reducir en este trabajo, sería conveniente diferenciar la fuente de la que proviene. Sin embargo, es complejo realizar una generalización de estos números ya que hay gran cantidad de variables tales como: tipos de aeronaves, distribución de pistas, geografía del terreno, antigüedad y tipo de los vehículos de tierra... que hacen que estos datos sean diferentes para cada aeropuerto. Como ejemplo se adjuntan las gráficas de contaminación de dos aeropuertos obtenidos del “*Estudio Consumo de energía y emisiones asociadas al transporte por avión*” del Grupo de investigación en consumo energético del transporte aéreo de la Universidad Autónoma de Madrid, donde se pueden observar los diferentes principales causantes de la contaminación:

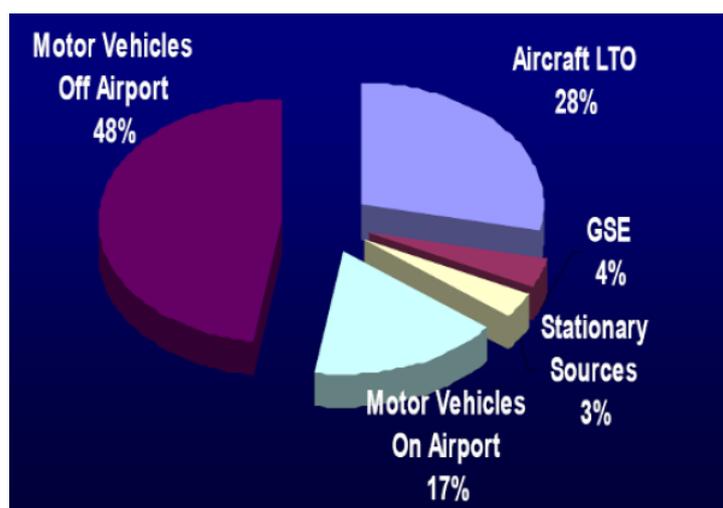


Gráfico 1.4.1 - Contaminación aeropuerto Seattle-Tacoma SEA. Total 1200 kt CO₂.

¹ No existe una metodología común para realizar una estandarización de la medición de las emisiones y es preceptivo, por parte de los aeropuertos, el realizar políticas que requieren participación de las entidades locales y la industria del entorno.

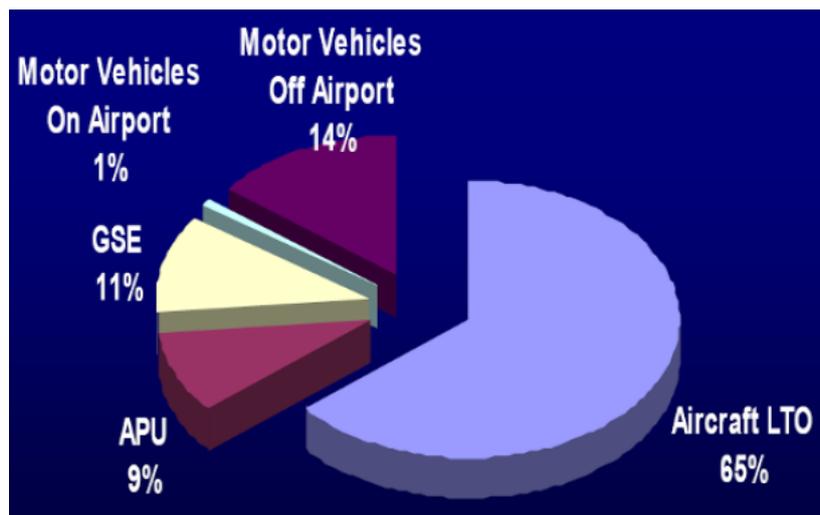


Gráfico 1.4.2 - Contaminación aeropuerto Vancouver YVR. Total 233 kt CO₂.

Centrándose en Santiago de Chile y basándose en los datos de la “Actualización Memoria de Cálculo de Emisiones Aeropuerto Arturo Merino Benítez” del año 2015 Versión C-4, se puede ver la gran cantidad de contaminantes que son liberados al aire por los vehículos terrestres en el aeropuerto Internacional Comodoro Arturo Merino Benítez.

Actividad emisora	Tasa de Emisión (ton/año)								
	CO	THC	NMHC	VOC	TOG	NO _x	SO _x	MP ₁₀	MP _{2.5}
Acceso a Estacionamientos	0,233	0,003	0,003	0,002	0,004	0,009	0,002	0,041	0,005
Acceso Rutas de Embarque	18,102	0,390	0,265	0,267	0,414	1,768	0,095	1,611	0,206
Estacionamiento	0,475	0,105	0,100	0,097	0,105	0,068	0,000	0,003	0,003
Rutas Internas	194,58	37,61	35,04	37,90	41,81	78,06	0,79	32,35	4,069
Total	213,39	38,10	35,41	38,26	42,33	79,91	0,89	34,00	4,28

Tabla 1.4.1 - Emisiones totales AMB por vehículos terrestres en 2015.

Dentro de estos datos es fácil observar que en torno al 90% de la totalidad de los contaminantes actuales son causadas por las rutas internas del aeropuerto entre las cuales se encuentra el movimiento de los tractores de remolque que se estudiarán más en detalle posteriormente.

1.5. Metodología

La principal misión de este trabajo es la electrificación de un tractor de remolque. No se trata del diseño de un nuevo vehículo, sino la adaptación de uno existente a las más modernas y ecológicas tecnologías. Para realizarlo no se modificará el diseño básico ni la estructura externa de manera que se evitará tener que volver a realizar cálculos estructurales, dado su complejidad y su coste tanto en tiempo como en medios.

Así mismo se mantendrá al máximo posible la colocación de elementos principales como el motor, el sistema hidráulico y la transmisión con el fin de que el rediseño sea lo menor posible y conservar parámetros básicos como la distribución de pesos. Las principales características del motor y demás periféricos se igualarán o se mejorarán de manera que el resultado final siempre sea superior al actual.

1.6. Alcance

La conversión total necesita un estudio extremadamente amplio y la realización de gran cantidad de tesis muy específicas tales como mapas de circuitos eléctricos, homologaciones, estudios de vibraciones y fuerzas en la estructuras... por citar algunos de los numerosos ejemplos. Para todo este trabajo se necesitará un equipo multidisciplinario de ingenieros y expertos de muy diversos campos que estudien la viabilidad del proyecto en conjunto, a fin de producir un prototipo óptimo para poder seguir con las pruebas necesarias en el desarrollo del nuevo vehículo.

Este trabajo se ha acotado a un acercamiento inicial a la electrificación, realizando una propuesta tecnológica actual de los principales sistemas necesarios a fin de poder obtener una primera aproximación lo más realista posible a los datos finales económicos, de consumos y emisiones. Es por tanto un documento que podrá ser tomado como punto de partida para futuras investigaciones más profundas, aplicando los cambios y puntualizaciones necesarias. Así mismo, dada la velocidad a la que avanza y mejora la tecnología -sobre todo en el campo de las baterías- es muy probable que en poco tiempo se puedan generar propuestas con la misma base pero con un mayor rendimiento.

Capítulo 2

Estado del Arte

2.1. Comparativa actual

Para la realización de este apartado se ha hecho una búsqueda de las diferentes posibilidades existentes en el mercado actual y se ha obtenido sus características básicas, que se han resumido en esta tabla:

Marca	Modelo	Cilindrada (L)	Par (kN)	Potencia (kW)	Masa tractor (kg)	Masa arrastre (kg)	Vel máx. (km/h)	Consumo (l/h)
TUG	GT50	4,76		126	6.216	21.773	24,1	
	GT110	7,1	1050	200	7.432	35.380	24,1	28
FMC	Expediter400	16	7926	425	20.600	396.000	29	44
	T-500-GVW	9,3	1248	253	29.484		34,4	
Stewart & Stevenson	GT-1628	6,1			12.701	29.072	24,1	
Douglas	DC12-44-400	11,9	403	330		70.000	30	31

Tabla 2.1.1 - Comparativa actual tractores de remolque de motor térmico.

Cabe destacar que en la actualidad pese a existir una creciente gama y diversidad de vehículos de tierra eléctricos tales como tractores de equipajes, escaleras de pasajeros, transvasadores de carga, bandas...no existen tractor de remolques eléctricos para aeronaves de gran ni medio tamaño. Únicamente se han encontrado diseños eléctricos de pequeño tamaño de la marca Kalmar, con autonomías muy reducidas, que han sido resumidos en la siguiente tabla:

Marca	Modelo	Baterías (kWh)	Potencia (kW)	Masa tractor (kg)	Masa arrastre (kg)	Vel máx. (km/h)
Kalmar	TBL50	48	100	6.850	30.000	23
	TBL 180	48	100	8.490	150.000	18

Tabla 2.1.2 - Comparativa actual tractores de remolque de motor eléctrico.

Así mismo, Kalmar también ofrece la otra tendencia que se está usando actualmente que son los tractores de remolque de motor eléctrico con prolongadores de batería térmicos de motor diésel para aumentar la autonomía de trabajo y el peso máximo de aviones con los que pueden trabajar. Por lo tanto, se pueden considerar vehículos híbridos de autonomía extendida.

Marca	Modelo	Baterías (kWh)	Potencia (kW)	Masa tractor (kg)	Masa arrastre (kg)	Vel máx. (km/h)
Kalmar	TBL190	72	100 / 90	6.850	240.000	23
	TBL 800 ²		668 / 175	39.000	500.000	25

Tabla 2.1.3 - Comparativa actual tractores de remolque de motor híbrido.

Según un estudio realizado por Kalmar Motors en cooperación con Lufthansa tras un test de pruebas de seis meses durante el desarrollo del modelo TBL 800 se reducirá el costo de combustible a 17€/h en vez de los 40 €/h de uno convencional y el costo de mantenimiento en 5 €/h (asumiendo un uso anual de 2500 horas) lo que generará un ahorro de 70.000 € por vehículo anuales. A su vez, las emisiones de gases de efecto invernadero también se reducirán, disminuyendo el CO₂ de 355 a 169 toneladas por año.

² El Kalmar TBL 800 fue en 2015 el primer remolcador impulsado por un motor eléctrico capaz de mover aeronaves de fuselaje ancho.

Capítulo 3:

Desarrollo

3.1. Partes de un sistema de propulsión eléctrico

La propulsión eléctrica es un sistema simple y limpio que no produce emisiones directas de gases contaminantes. Sus componentes son pocos y en general bastante económicos, a excepción de las baterías. Su principal ventaja radica en que la conversión de energía eléctrica a cinética es un proceso con muy alta eficiencia, a diferencia de la conversión de energía química a cinética de un motor térmico. Los principales sistemas de un vehículo eléctrico son:

- Motor eléctrico y controlador
- Packs de baterías y cargador
- Otros: transmisión, cargador, sistema de temperatura y convertidores AC/DC, DC/DC y DC/AC (si se usa motor de inducción), etc.

Como se comprueba se eliminan gran cantidad de periféricos existentes en un vehículo convencional como el sistema de distribución de árbol de levas, conducciones de admisión y escape de aire, bombas y sistemas de inyección...consiguiendo un sistema propulsivo más ligero, compacto y con mucho menor mantenimiento. Un ejemplo simplificado de un modelo de vehículo eléctrico sería el siguiente:

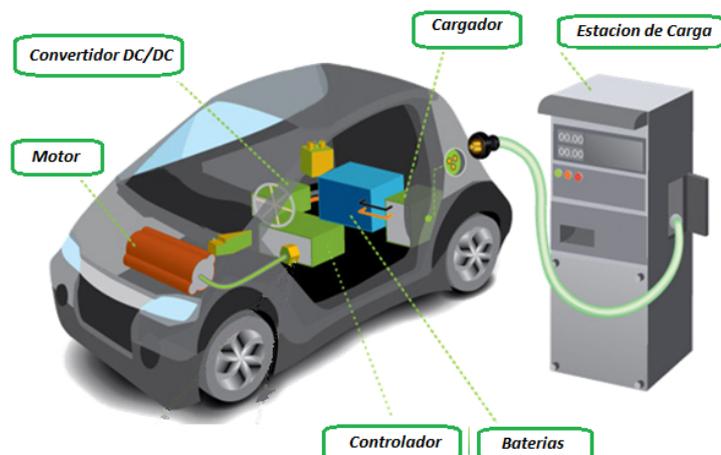


Figura 3.1.1 - Partes básicas de un sistema propulsivo eléctrico.

3.2. Diseño

La electrificación es un proceso por el cual se sustituyen el motor de combustión diésel y todos los elementos periféricos necesarios para su funcionamiento, por un conjunto de propulsión eléctrico intentando alterar lo mínimo posible la estructura y la ubicación de los diversos sistemas del vehículo existente.

Para poder estudiar mejor la colocación de los diversos sistemas, se ha codificado las diferentes estructuras del tractor de remolque según la siguiente imagen:

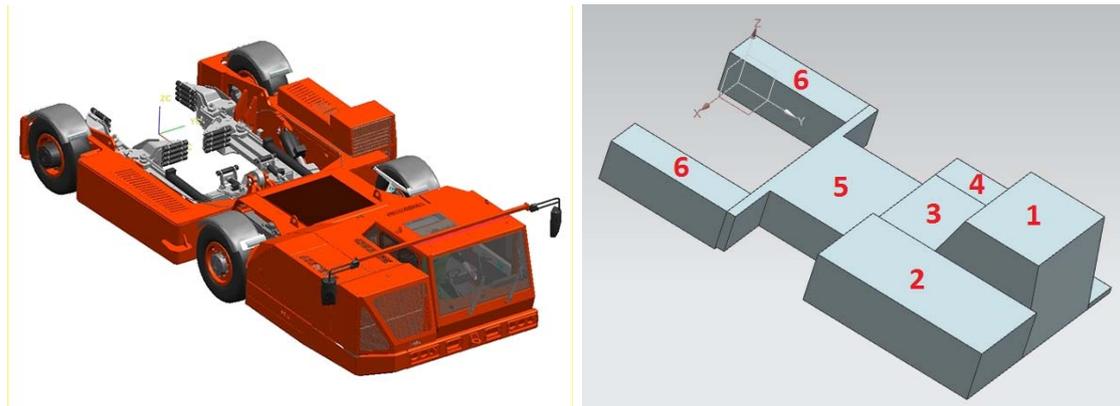


Figura 3.2.1 - Diseño actual y simplificación tractor de empuje.

Code	Uds.	Componente actual	Componente electrificación	Dimensiones (cm)			Vol. (m ³)
				Largo	Alto	Prof.	
1	1	Cabina	Cabina	180	160	190	5,472
2	1	Motor	Motor + Controlador	150	85	290	3,698
3	1	Periféricos motor	Inversores + Cargadores + Baterías (12 V)	180	65	100	1,170
4	1	Sist. Temperatura	Sist. Temperatura	60	65	120	0,468
5	1	Transmisión + Sist. neumático	Transmisión + Baterías + Sist. neumático	200	65	155	2,015
6	2	Peso + Diésel	Baterías	65	70	205	1,866
TOTAL							14,688

Tabla 3.2.1 - Componentes tractor de empuje.

La cabina (código 1) así como el motor (código 2) se mantendrán debido a que son los dos compartimientos de mayor tamaño y su colocación no es posible en otro sitio. Así mismo si se mantiene el motor, la transmisión (código 5) no cambiará de posición, sino simplemente de tamaño y tipo como se explicará posteriormente. El

sistema neumático se electrificará pero no variará de posición dado que ya está en la más adecuada para el enganche del avión.

El espacio trasero de la cabina (código 3) destinado actualmente a otros componentes del motor térmico como la caja de cambios con la versión eléctrica desaparecerán y se podrá utilizar ese espacio para la electrónica del motor eléctrico y las baterías de 12V usadas para los sistemas eléctricos de la cabina del vehículo.

Una de las mayores ventajas de la electrificación es que el peso extra (código 6) añadido, normalmente con bloques de cemento para aumentar la tracción estos vehículos convencionales se pueden sustituir por packs de baterías. Así mismo el tamaño no es un elemento crítico del diseño y existe un volumen considerablemente grande para las baterías. Una gran ventaja teniendo en cuenta que éstas se pueden acomodar en packs y ocupar casi la totalidad de cavidades vacías. Por tanto, el diseño final será parecido al mostrado en la siguiente imagen.

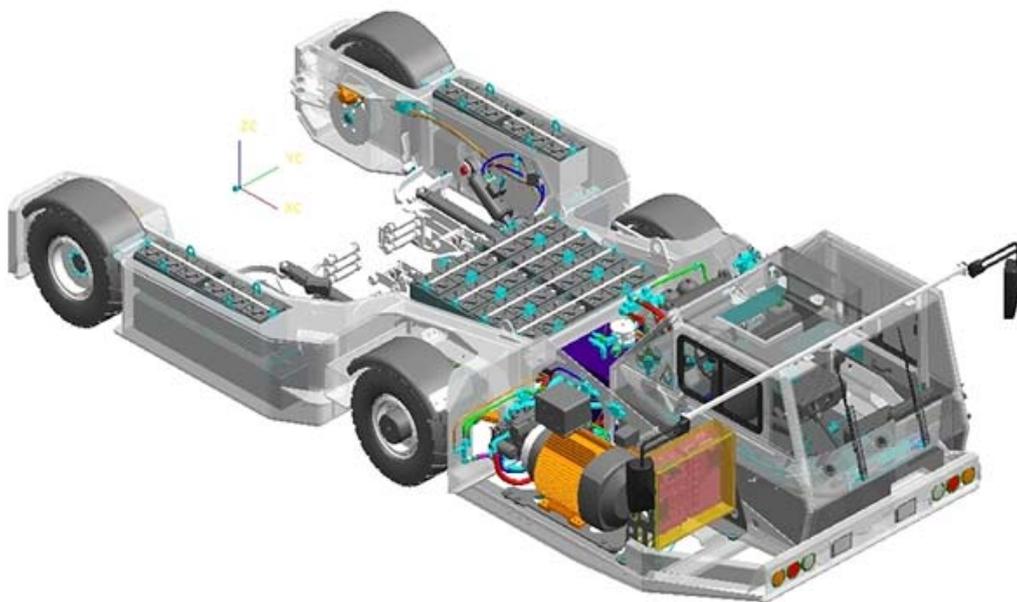


Figura 3.2.2 - Diseño final tras electrificación.

3.3. Cálculos de potencia, par y consumo

La aplicación final del tractor de remolque será determinante para establecer las características necesarias de los diferentes componentes. En los cálculos numéricos físicos de este apartado (detallados en el ‘Anexo1: cálculos Excel’) se ha asumido un ciclo medio de trabajo de 8h del tractor de remolque formado por dos fases: una primera fase cargado donde se arrastra el avión y una segunda fase donde se mueve descargado y corresponde a la distancia entre dos operaciones a realizar. Para realizar estos cálculos físicos básicos se ha partido de los siguientes datos iniciales:

	Tractor en carga	Tractor en vacío
Masa total	320 Ton	20 Ton
Distancia	200 m	500 m
Velocidad máxima	10 km/h	40 km/h
Aceleración	0.20 m/s ²	0.50 m/s ²
Deceleración	-0.35 m/s ²	-0.60 m/s ²
Resistencia a la Rodadura (Crr)³	0.012	0.012

Tabla 3.3.1 - Datos iniciales de cálculo con tractor en carga y en vacío.

Las aceleraciones y deceleraciones son más suaves en el movimiento con carga para evitar daños estructurales en el tren de aterrizaje del avión así como para evitar incomodar a los pasajeros que se encuentren dentro del mismo. Los coeficientes de rodadura se asumen constantes y similares a los de un camión sobre una carretera lisa.

Descripción	Crr
Ruedas de ferrocarril sobre raíles de acero	0,0002 a 0,0010
Neumáticos especiales Michelin para automóvil solar	0,00253
Neumáticos de automóvil de baja resistencia y neumáticos de camión sobre carretera lisa	0,006 a 0,01
Neumáticos de automóvil sobre losas de piedra	0,010 a 0,0154
Neumáticos de automóvil sobre hormigón	0,020
Neumáticos de automóvil sobre alquitrán o asfalto	0,030 a 0,035
Neumáticos de automóvil sobre hierba, barro y arena	0,34

Tabla 3.3.2 - Coeficientes de rodadura en función de las superficies.

³ Cabe recalcar que el Coeficiente de Rodadura se define como la resistencia ejercida por un cuerpo que rueda sobre una superficie, deformándose uno de ellos o ambos. El Coeficiente de Rodadura es similar al de Coeficiente de Rozamiento, pero no hay que confundirlos, puesto que el segundo implica que las superficies resbalan o se deslizan mientras que en el primero no existe resbalamiento sino rodadura, siendo habitualmente mucho inferior el de Rodadura.

Para realizar estos cálculos se han aplicado las siguientes leyes de la física:

- $Potencia = fuerza * velocidad$
- $Par = fuerza * distancia$
- Fórmulas del Movimiento Rectilíneo Uniformemente Acelerado (MRUA)
- $Trabajo = fuerza * desplazamiento$

Y al tratarse de un motor eléctrico se han adoptado las siguientes simplificaciones que no perturban excesivamente el resultado final:

- Aceleración y deceleración continua y constante.
- Desplazamiento a velocidad constante máxima.
- Eficiencias del motor y transmisión independientes del régimen de carga.
- Conservación de la Energía (potencia).

Desplazamiento



Gráfica 3.3.1 - Velocidad, Par y Potencia en un movimiento tipo.

De una forma cuantitativa se puede asemejar el movimiento al gráfico anterior. Como se observa en la deceleración existe una potencia negativa, que gracias a la regeneración del motor que se explicará en el siguiente apartado se podrá aprovechar para recargar las baterías, necesitando la siguiente performance del vehículo:

Potencia real nominal	110 kW
Potencia real máx.	297 kW
Par motor nominal	3.5 kNm
Par nominal real máx.	7.1 kNm
Consumo ciclo	27 kWh
Capacidad Baterías 8h	215 kW

Tabla 3.3.3 - Performance requerida del motor y baterías.

3.4. Motor eléctrico

El motor es la parte principal que generará el movimiento del vehículo. Según los cálculos anteriores, para esta aplicación se necesitará un motor con gran potencia pero sobre todo con gran par motor. Hoy en día existen los siguientes tipos de motores:

- **DC Brushed Motor:** Los motores CON escobillas de corriente continua son motores conmutados mecánicamente, que simplemente necesitan un interruptor ‘chopper’⁴ para controlar el torque. Al ser de imanes permanentes el costo es muy elevado en motores para tracción, por ello la mayoría de motores son conjuntos en serie o en paralelo con bobinado en rotor y estator.

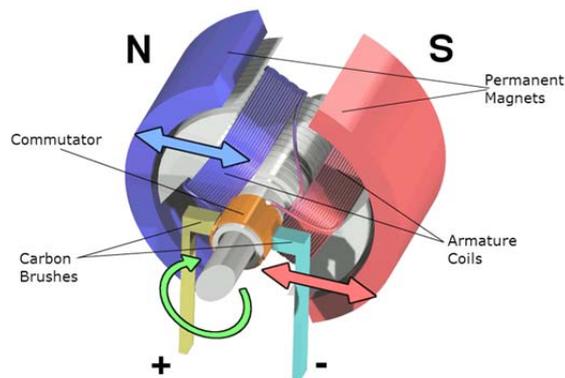


Figura 3.4.1 - Motor corriente continua CON escobillas.

- **DC Brushless Motor:** Los motores SIN escobillas de corriente continua son motores conmutados eléctricamente por un inversor y poseen imanes permanentes en el rotor y bobinado en el estator.

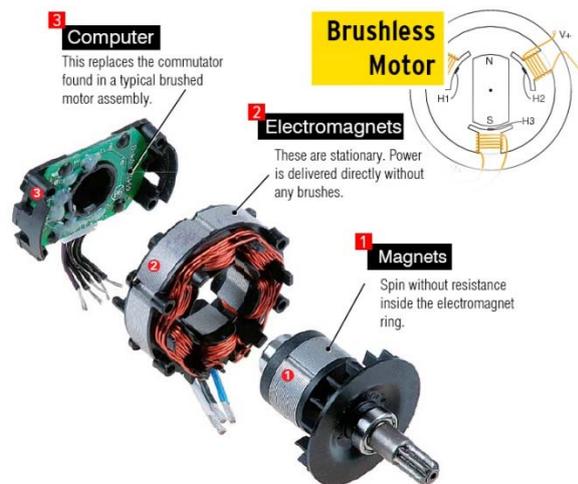


Figura 3.4.2 - Motor corriente continua SIN escobillas.

⁴ El interruptor ‘chopper’ es un Interruptor electrónico que se usa para interrumpir una señal bajo el control de otra.

- AC Motor: Los motores de inducción de corriente alterna son motores conmutados eléctricamente por un inversor como los anteriores, pero a diferencia de estos tienen un rotor de inducción y bobinado en el estator.

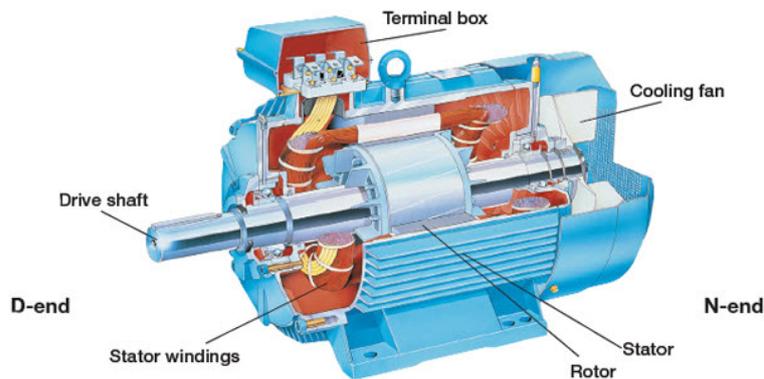


Figura 3.4.3 - Motor corriente alterna de inducción.

Para determinar el motor más adecuado para este sistema, se realizará una comparación en diferentes aspectos que después determinarán las características finales del tractor de remolque y se resumirán en una tabla 3.4.1.

Eficiencia:

- **CON escobillas DC:** Motor ~80% + DC controlador: ~94% → NET 75% ±.
- **SIN escobillas DC:** Motor ~93% + Inversor ~97% → NET 90% ±.
- **Inducción:** Motor ~92% + Inversor ~95% → NET 87% ±.

Mantenimiento:

- **CON escobillas DC:** Sustitución habitual de las escobillas y periódica de los rodamientos.
- **SIN escobillas DC:** Sustitución periódica de los rodamientos.
- **Inducción:** Sustitución periódica de los rodamientos.

Coste específico (por kW), incluyendo inversor

- **CON escobillas DC:** Bajo - El motor y el controlador son generalmente baratos.
- **SIN escobillas DC:** **Muy Alto** - Los imanes permanentes de alta potencia son muy caros (~50 dólares por kg).
- **Inducción:** Moderado - El inversor añade coste, pero el motor es barato. No tiene imanes.

Refrigeración:

- **CON escobillas DC:** El bobinado en el rotor y estator hace muy complicada la refrigeración para altas potencias.
- **SIN escobillas DC:** El bobinado en el estator hace solo posible la refrigeración en una dirección. Los imanes en el rotor generan calor por corriente inducida.
- **Inducción:** El bobinado en el estator hace solo posible la refrigeración en una dirección. Las corrientes inducidas en el rotor pueden requerir refrigeración de agua/aceite en aplicaciones de alta potencia.

Par motor/ velocidad

- **CON escobillas DC:** Teóricamente infinito par motor a velocidad cero, en la práctica el torque aumente con velocidad. Normalmente en automoción se necesita caja de cambios de 3-4 velocidades para cubrir todo el rango de velocidades adecuadamente.
- **SIN escobillas DC:** El torque constante hasta la velocidad nominal y la potencia constante hasta la velocidad máxima. Es viable una aplicación de una sola marcha para la automoción.
- **Inducción:** El torque constante hasta la velocidad nominal y la potencia constante hasta la velocidad máxima. Es viable una aplicación de una sola marcha para la automoción. Tiene un pequeño tiempo retardo (~ms) al aplicar la corriente. Gran rango de velocidades de funcionamiento.

Otros:

- **CON escobillas DC:** A altos voltajes genera problemas con el conmutador (normalmente usados a 24-48V). El freno regenerativo es difícil de introducir porque requiere muy complejo control de velocidad y transmisión.
- **SIN escobillas DC:** El gran coste de los imanes (sobre todo los muy potentes) y de montaje los hacen ideales para bajos voltajes. Al aumentar voltaje las pérdidas aumentan rápidamente por $I_{inducida}$. El freno regenerativo es muy barato y fácil.
- **Inducción:** El motor relativamente barato de producir y la electrónica también. Muy usados en los últimos 20 años, lo que genera disminución de precios. El freno regenerativo es muy barato y fácil. Normalmente son motores ligeros.

	CON escobillas DC	SIN escobillas DC	Inducción
Eficiencia	~NET=75%	~NET=90%	~NET=87%
Mantenimiento	Escobillas y rodamientos	Rodamientos	Rodamientos
Coste específico	Bajo	Muy Alto	Moderado
Refrigeración	Compleja	Fácil	Fácil
Torque/velocidad	Caja de cambios	Única marcha	Única marcha
Otros	Muy bajos Voltajes	Bajo Voltaje Freno regenerativo	Cualquier voltaje Freno regenerativo

Tabla 3.4.1 - Resumen tecnologías motores actuales.

Como es fácil observar tras esta comparativa, rápidamente se descartan los motores con escobillas de corriente continua por numerosas causas como su baja eficiencia, su gran mantenimiento y su mala aplicación para altos voltajes y potencias. Sin embargo la elección se dificulta entre las otras dos posibilidades y como ejemplo el parque automovilístico actual donde conviven ambas tecnologías de motores.

En este estudio se ha escogido un motor de inducción de la marca Siemens por ser una marca reconocida y con gran trayectoria en la innovación de motores eléctricos en los últimos años. Otra razón decisiva ha sido la gama de motores de ‘High Torque SIMOTICS HT’ que son idóneos para la aplicación requerida pues ofrecen una buena relación potencia/peso con unos valores muy altos de par motor a un precio asequible.

	Actual térmico	Electrificación
Motor	Deutz BF6M1013C	1FW4401-1HE 80-1AA0
Potencia	165 kW	510 kW
Par	743 kN	8125 kN
Eficiencia	35 - 45 %	92 - 97.30 %



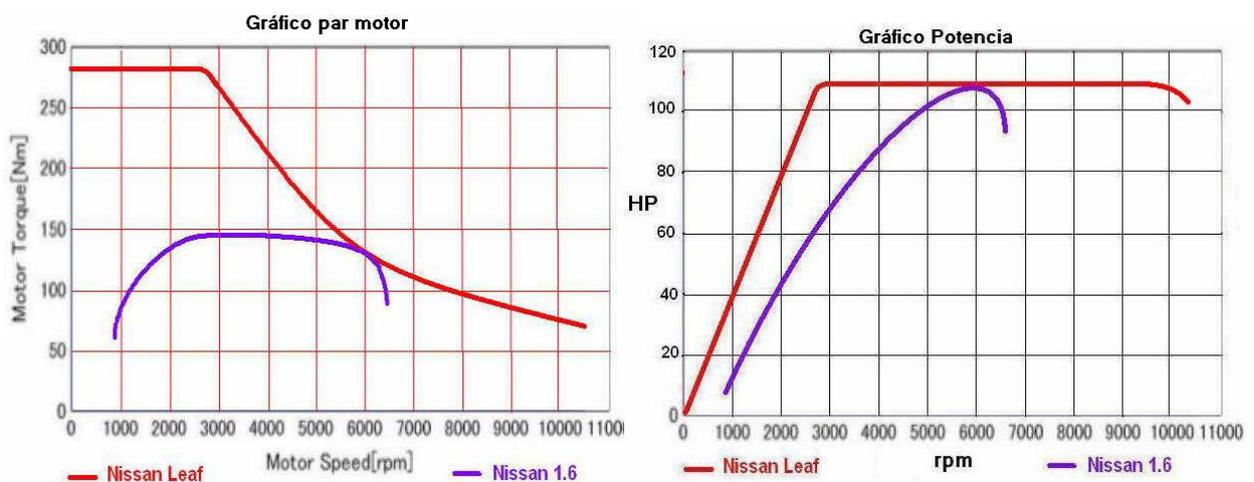
Tabla 3.4.2 - Comparativa motor térmico y electrificación.

Figura 3.4.4 - Motor Siemens High Torque SIMOTICS HT

3.4.1. Transmisión

La transmisión no es una parte del motor, sin embargo sí que dependerá del tipo de motor que se emplee. Los motores térmicos actuales requieren de una compleja caja de 4 ó 5 cambios para optimizar el par producido en el motor y adecuarlo a la velocidad en la que se necesite; a la vez que piñones extras para la inversión de giro o marcha atrás. El par máximo normalmente se encuentra a bajas revoluciones mientras que la máxima potencia se entrega a un régimen más alto.

En el caso de los motores eléctricos es mucho más simple puesto que éstos tienen unas curvas de par y potencia más constantes. El par máximo se entrega desde el inicio del movimiento -algo muy positivo en esta aplicación pues será cuando se empiece a mover cargado con el avión- y decae progresivamente; mientras que la potencia aumenta rectilíneamente hasta un máximo que es casi invariante, como podemos observar en la siguiente gráfica:



Gráfica 3.4.1.1 - Comparativa par y potencia motor térmico y eléctrico.

Por estas características es que los motores eléctricos no necesitan caja de cambios, sino simplemente una reductora que adecúe las vueltas del motor a las que se deseen en la rueda. Para esta aplicación en concreto, al tratarse de dos situaciones tan extremas -cargado y en vacío- se usará una doble reductora, con una relación de transmisión para cada función que se desea desempeñar. A su vez, el embrague y todo el mantenimiento que éste genera, también desaparece, reduciendo el peso, el tamaño y el costo de mantenimiento de la transmisión.

	Relación	Vel. nominal
Cargado	1:8	14.2 km/h
En vacío	1:2.5	45. km/h

Tabla 3.4.1.1 - Relación transmisión cargado y en vacío.

Cabe destacar que no se está proponiendo el uso de una caja de cambios de dos velocidades, sino el uso de dos reductoras diferentes. La diferencia es que la primera de ellas está diseñada para cambiar la marcha durante el movimiento y la segunda se preseleccionará antes del inicio de la maniobra y determinará las características que se tendrá medidas en rueda.

Una vez elegidas las relaciones de transmisión más adecuadas para las velocidades y pares que deseamos en nuestro tractor de remolque, se puede comprobar que el motor elegido previamente es suficiente. Como se demuestra en la siguiente tabla los coeficientes de sobredimensionamiento son siempre superiores a 1,7 veces el par pico requerido y 2,6 veces la potencia pico. Con estos márgenes de seguridad aseguramos un correcto funcionamiento dentro de los valores recomendados del motor en su totalidad del rango de funcionamiento. Así mismo es importante observar que los valores pico demandados siempre son menores que los valores nominales ofrecidos por el motor.

Potencia real	510 kW	Par real	7,6 kN
Potencia máx. pick 120s	765 kW	Par máx. pick 120s	11,4 kN
Potencia nominal	110 kW	Par nominal	3,5 kN
Coef. sobredimensionado	4,6	Coef. sobredimensionado	3,5
Potencia pick	297 kW	Par pick	7,1 kN
Coef. sobredimensionado	2,6	Coef. sobredimensionado	1,7

Tabla 3.4.1.2 - Coeficientes de seguridad de par y potencia.

3.5. Controlador

El controlador es el componente central de electrónica de un sistema propulsivo eléctrico y debe permitir controlar la velocidad, el par y la potencia del motor en todo momento en función de las capacidades disponibles y las demandadas por el usuario. La tecnología actual ha permitido controlar los motores AC de una forma precisa, barata y sencilla, añadiendo a éstos una ventaja más respecto a los DC. Actualmente hay diferentes métodos de control:

- Control por variación de voltaje
- Control por variación de frecuencia
- Control por variación de la resistencia del rotor
- Control de velocidad tipo V/f constante

En esta electrificación se propondrá el uso del último tipo de los mencionados al tratarse del sistema más eficiente y preciso que existe en el mercado. Su función principal es el control de frecuencia de alimentación suministrada al motor, por lo que también son conocidos como drivers de frecuencia ajustable (AFD), drivers de CA, microdrivers o inversores. El principio por el cual funcionan es la siguiente ley:

$$RPM = 60 \times \frac{f}{p}$$

- RPM = Revoluciones por minuto,
- f = frecuencia de suministro AC (Hercio),
- p = Número de pares de polos

Por lo tanto, la función principal será convertir la onda sinusoidal de 60 Hz de la corriente alterna en una frecuencia que será controlada para variar finalmente la velocidad de giro como se puede observar en el siguiente dibujo:

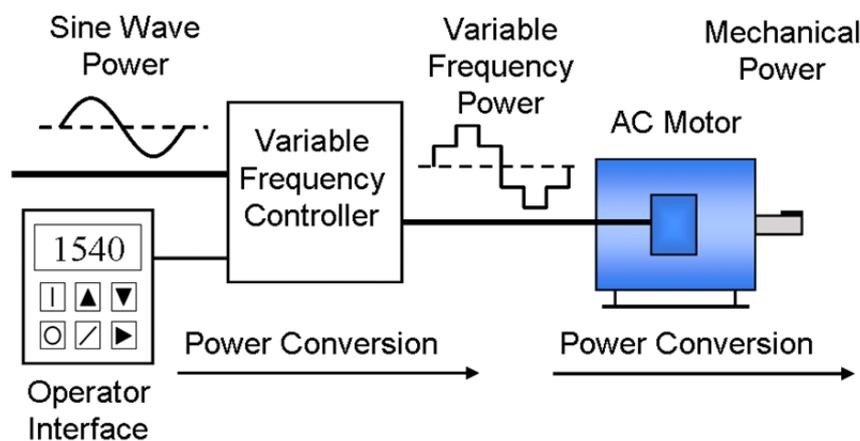


Figura 3.5.1 - Esquema funcionamiento controlador.

En resumen, un variador de velocidad permitirá control más preciso según las características que necesitará el motor dependiendo de cada aplicación, logrando una reducción de la energía consumida para dicho trabajo. Según un estudio⁵, en USA se podría ahorrar hasta un 18% de la energía usada hoy en día en los aproximadamente 40 millones de motores con una correcta utilización de los variadores de velocidad por frecuencia.

3.5.1. Freno regenerativo

Otra función muy importante del variador es la aplicación del freno regenerativo, un proceso por el cual se aprovecha la energía de la frenada usando el motor como generador para almacenar energía en las baterías. Por lo tanto, se necesitará que el variador que se va a emplear pueda funcionar en los cuatro cuadrantes de trabajo:

- Cuadrante I: impulsando, aceleración hacia delante con velocidad y torque positivos (movimiento hacia delante).
- Cuadrante II: generando o frenando, deceleración hacia delante con velocidad positiva y torque negativo (frenado de movimiento hacia delante).
- Cuadrante III: impulsando, aceleración hacia detrás con velocidad y torque negativos (movimiento hacia detrás).
- Cuadrante IV: generando o frenando, deceleración hacia detrás con velocidad negativa y torque positivo (frenada de movimiento hacia detrás).

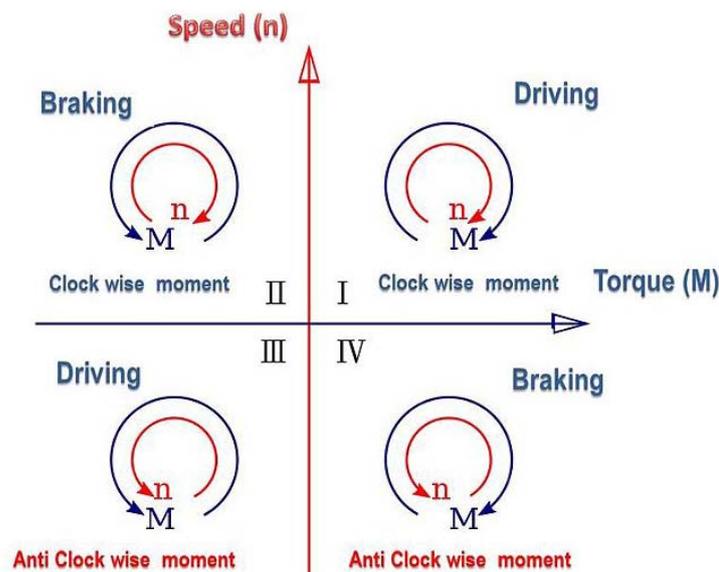


Figura 3.5.1.1 - Esquema cuadrantes controlador.

⁵ Estudio publicado en Bose, B. K. (Feb 2009). "Power Electronics and Motor Drives Recent Progress and Perspective". IEEE Transactions on Industrial Electronics.

3.5.2. Control vectorial

El Control Vectorial es un Control Centrado en el Flujo (Flux Oriented Control) basado en la diferenciación de los componentes del vector corriente, que se usarán para:

- Generar Par
- Generar corriente inducida en el rotor (y a su vez flujo en el rotor).

En un sistema trifásico tenemos tres vectores de corriente, uno por cada fase, que llamaremos ' I_V ', ' I_U ' e ' I_W '. La suma genera la corriente resultante del estator ' I_{Stator} ' que es función del tiempo. Si descomponemos⁶ este vector en sus dos ejes obtenemos una proyección sobre el eje real llamada ' I_a ' y una proyección sobre el eje imaginario ' I_b '.

El flujo del rotor intentará superponerse al flujo del estator que esta desplazado un ángulo llamado ' s ' generando el movimiento circular característico del motor de inducción. Este efecto se puede plasmar en un gráfico si rotamos la base inicial y dibujamos el vector corriente del Rotor ' I_{Rotor} ' con sus componentes ' I_q ' e ' I_d ' semejante a cómo se ha realizado en el caso del estator. De este modo hemos convertido las tres corrientes trifásicas iniciales a dos especiales:

- La corriente de flujo ' I_d ': siempre alineada con el flujo del rotor
- Y la corriente de par ' I_q ': ortogonal a la misma

De este modo el controlador podrá calcular instantáneamente la corriente dedicada a generar movimiento en el motor y la dedicada a generar par motor y su aplicación será la necesaria a cada situación. Así mismo al inicio del movimiento se podrán obtener pares constantes y altos, algo imposible en un motor de combustión.

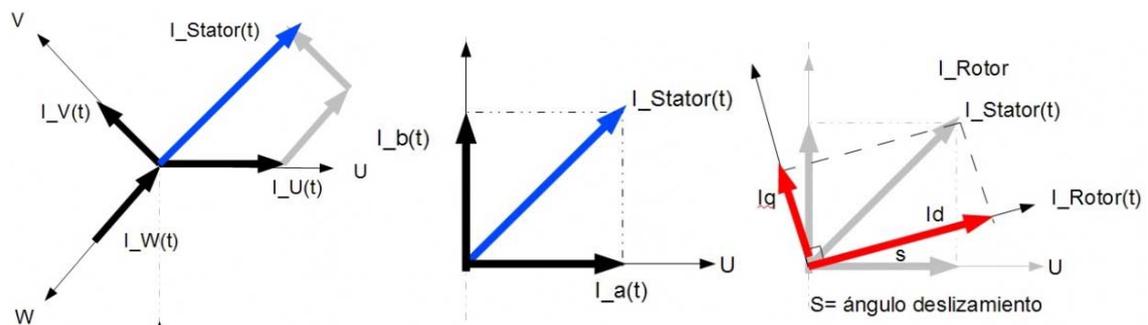


Figura 3.5.2.1 - Funcionamiento controlador por control vectorial.

⁶ Aplicando la Transformada de Clarke

Se ha elegido este convertor al tratarse de un modelo que aplica el control vectorial para motores de corriente alterna trifásicos de hasta 530kW, suficiente para el control del motor elegido.

Marca	Schneider
Modelo	ATV 71HC50N4
Corriente nominal	876 A
Tensión alimentación	380 V
Corriente máx. (60s)	1411 A
Potencia	530 kW
Coef. Sobredimensio.	1.04
Potencia aparente	576.6 kVA
Dimensiones (mm)	1120*1390*377
Peso	300 kg



Tabla 3.5.1. - Características controlador Schneider.

Figura 3.5.2. - Controlador Schneider.

Otra de las causas por las cuales se ha optado por la marca Schneider es por la gran cantidad de extras de seguridad que se le pueden añadir al controlador deseado, haciendo de éste un elemento aún más versátil. Para esta aplicación se propondrá el uso de las denominadas resistencias de frenado, que permiten disipar la energía de frenado hasta 150 kW. El frenado por tanto del vehículo quedaría como elemento triplicado, pudiendo usarse los tres tipos a la vez en caso de emergencia, pero por razones energéticas siempre usándolos en el siguiente orden:

1. Freno regenerativo
2. Freno mecánico de discos.
3. Freno resistivo del controlador.

Para el operario el frenado se mantendrá en el pedal habitual, sin embargo el controlador será capaz de determinar la intensidad de la señal proporcional a la fuerza ejercida por el conductor, decidiendo cuál o cuáles de los sistemas de frenado serán los necesarios. La redundancia de este sistema es una herramienta más de seguridad contra fallos inesperados que podrían afectar a cualquiera de los 3 sistemas de frenados, haciendo por tanto el vehículo más seguro.

3.6. Packs de Baterías

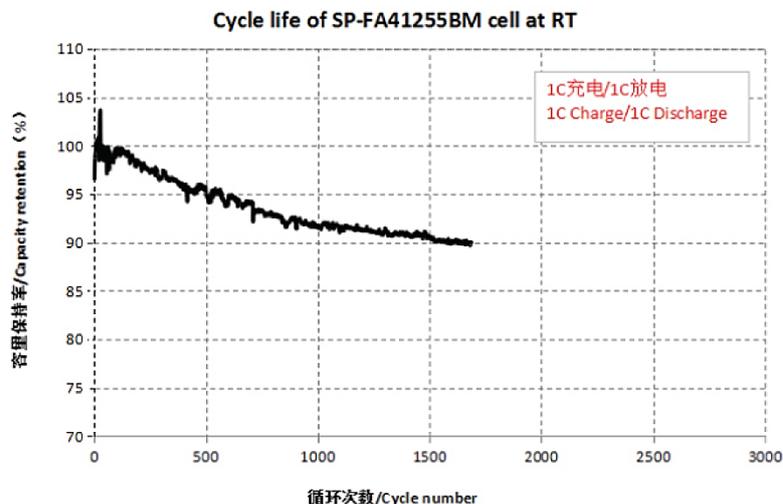
Las baterías son probablemente la parte más crítica del sistema pues son las que aportarán la energía necesaria durante las horas de trabajo de todos los demás sistemas del vehículo. Sus principales requerimientos son una alta capacidad de almacenamiento de energía, una rápida carga y un adecuado rendimiento tras cientos de ciclos de uso. También económicamente suponen la mayor parte del presupuesto, por ello su conveniente elección será determinante en las características y el precio final.

Las baterías de iones Litio desarrolladas desde la década de 1990 son las más adecuadas para aplicaciones propulsivas en vehículos eléctricos debidos a su alta capacidad y densidad energéticas y sus altos ratios de carga y descarga.

Ventajas	Inconvenientes
Elevada densidad de energía	Duración media (4 años o ~400 ciclos)
Gran capacidad de descarga	Alto coste
Mínimo efecto memoria	Sobrecalentamiento
Descarga lineal	Mal comportamiento en frío

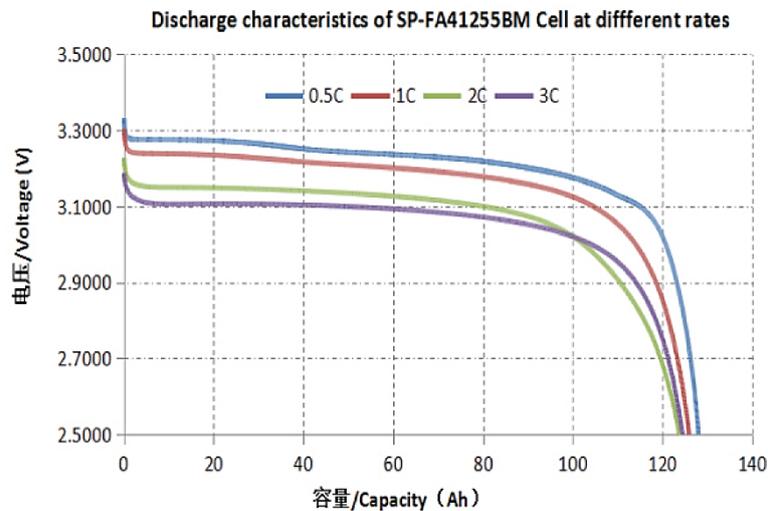
Tabla 3.6.1 - Ventajas e inconvenientes de baterías Li-ion.

Dentro de las baterías Li-Ion, las baterías denominadas Litio Fosfato de Hierro (LiFePo4) son baterías de Li-Ion con un cátodo de fosfato de hierro-litio. La principal ventaja de estas baterías es su alta durabilidad, sobrepasando los 3000 ciclos de vida completa manteniendo más del 80% de su vida útil (hasta 10 veces más duraderas que las convencionales de Li-Ión) como se puede observar en el siguiente gráfico:



Gráfica 3.6.1 - Vida útil y ciclos de carga de baterías LiFePo4.

Una ventaja más de estas baterías es la constancia del voltaje que presentan en los ciclos de descarga independientemente del régimen, manteniéndose estables cerca del 80% de su capacidad.



Gráfica 3.6.2. - Características de descarga de baterías LiFePo4.

Otras mejoras también importantes de estas baterías es que no requieren ningún tipo de mantenimiento en su vida y su seguridad es más alta puesto que son más difíciles de incendiar o hacer explotar que las de litio convencionales (ni con sobrecargas) a la vez que no contienen metales tóxicos ni contenido acuoso. Por la otra parte, son ligeramente más pesadas que las de litio y necesitan protección de un Balance Management System (BMS) que homogenice el voltaje tanto en la descarga como en la carga.

Marca	SinoPoly	
Modelo	SP-FA41255 BM	
Capacidad nominal	125 Ah	
Voltaje nominal	3.2 V	
Peso	3.4 kg	
Vida útil (80% capacidad)	> 3000 ciclos	
Autodescarga	< 4.5%/mes	
Dimensiones	170*455*40 mm	
Carga	Corriente nominal	0.5 C
	Máx. corriente	2 C
Descarga	Corriente nominal	1 C
	Máx. corriente	3 C



Tabla 3.6.2. - Características baterías SinoPoly.

Figura 3.6.1. - Baterías SinoPoly

3.6.1. Consumos totales

El mayor miedo de cualquier usuario ante el uso de los vehículos eléctricos es su autonomía y su posible agotamiento de la batería en medio de una operación, que en este caso sería de muy alta peligrosidad ya que se tendría un vehículo parado en medio de la plataforma que podría generar colisiones con otros vehículos de tierra u otros aviones.

Para evitar este problema se ha implementado un '*Power Budget*' en el que se tendrán en cuenta los casos más desfavorables de funcionamiento de los diversos sistemas del tractor de remolque en los que se asegurará su ejercicio durante, al menos, 8 horas de funcionamiento.

Componente	Uds.	Condiciones desfavorables	Gasto máx. (kWh)
Motor	1	Máxima carga	26
Controlador	1	Calor extremo	3
Sist. Gestión Temp	1	Calor extremo	3
Sistema iluminación		Noche	2
Convertidores	3	Calor extremo	2
A/C (opcional)	1	Calor extremo	3
Sist. Hidráulico	1	Carga avión	4
Otros	1		3
TOTAL			46

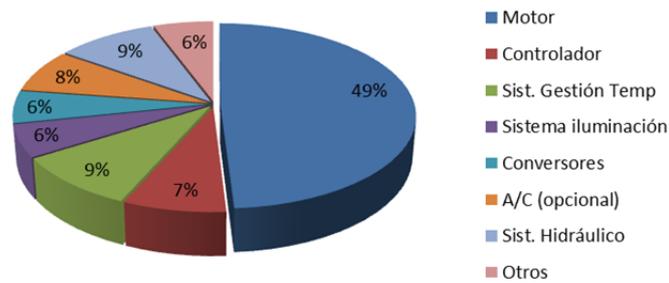
Tabla 3.6.1.1. - 'Power Budget'.

Cabe destacar que las condiciones desfavorables en algunos casos son incompatibles como el caso de calor extremo y noche o son sólo gastos puntuales como el uso del sistema hidráulico para la carga del avión. Sin embargo para la implementación de este '*Power Budget*' se ha calculado los consumos en base al total por medidas de seguridad.

Un turno habitual de 8 horas sin interrupción por tanto generaría un consumo total de aproximadamente 400kW/h. Como medida de sobredimensionamiento se ha propuesto un pack de baterías de 500 kW/h que cómodamente permiten realizar el trabajo demandado sin realizar ninguna carga intermedia. Así mismo se ha añadido este factor de sobredimensionamiento para que tras el paso de ciclos, el acortamiento de la vida útil de las baterías no afecte el correcto funcionamiento del vehículo.

Otro factor importante a calcular es el índice máximo de descarga que en este caso de 0.08 C, un valor muy bajo que no deteriorará las baterías ni las sobrecalentará. Así mismo al tratarse de baterías sin efecto memoria, cualquier momento de no uso se puede emplear para una recarga parcial sin reducir la capacidad de las mismas.

Gasto energético (kWh)



Gráfica 3.6.1.1. - Gasto energéticos en porcentaje.

Como se puede observar en el gráfico anterior la mitad de la energía consumida es directamente gastada en la propulsión del motor de inducción. Un 25% más correspondería a otros gastos tales como la iluminación, el sistema hidráulico, el sistema de gestión de temperatura o el A/C mientras que el último cuarto se debe a pérdidas disipadas de calor en los componentes electrónicos: convertidores, controlador y otros.

Para asegurar que el operario disponga de la suficiente información de la batería, se sustituirá el indicador de combustible por una pequeña pantalla similar a la mostrada en la siguiente imagen que informará continuamente del estado de energía remanente en la batería así como del tiempo restante de funcionamiento. También notificará los periodos de carga y los tiempos de carga necesarios en función del método de carga.



Figura 3.6.1.2. - Indicador estado batería.

3.6.2. Conversores

La conversión de energía eléctrica es una parte necesaria dentro de cualquier vehículo dado que los diversos componentes necesitan diferentes tipos de corriente - alterna o continua- así como diferentes voltajes. Sin embargo, estos cambios producen pérdidas por lo que deben ser minimizados y optimizados. Para este vehículo se necesitarán 3 conversores, cada uno de ellos para una aplicación determinada:

- Conversor DC/AC: será el encargado de convertir la corriente continua (DC) de la batería a corriente alterna trifásica (AC) de 380V que necesita el motor.

Marca	WEG
Modelo	CTW-A-04
Corriente nominal	1000 A
Tensión alimentación	48 V
Tensión Salida	400 V
Potencia disipada	1.8 kW
Dimensiones	925*65*535 mm
Peso	140 kg



Tabla 3.6.2.1. - Características conversor WEG.

Figura 3.6.2.1. - Conversor WEG.

- Conversor DC/DC: su función será convertir la corriente continua (DC) de 48V de la batería principal a 12V para que los sistemas secundarios y auxiliares puedan funcionar correctamente tales como iluminación, aire acondicionado, tableros de información de la cabina, etc.

Marca	Newmar
Modelo	36-12-35ISP
Corriente nominal	20 A
Corriente sobrecarga	37 A
Tensión alimentación	20-65 V
Tensión Salida	12.6 V
Eficiencia	> 85%
Dimensiones (mm)	152*173*356
Peso	5.5 kg



Tabla 3.6.2.2. - Características conversor Newmar.

Figura 3.6.2.2. - Conversor Newmar.

- **Convertidor AC/DC:** será el empleado para convertir la corriente alterna trifásica (AC) de 220V de la red a corriente continua (DC) a 48V como se almacenará en las baterías. Este convertidor será el conocido como cargador y será explicado con detalle en el siguiente apartado.

Por lo tanto el esquema final del vehículo será similar al que se puede observar en el siguiente dibujo, con los diferentes convertidores:

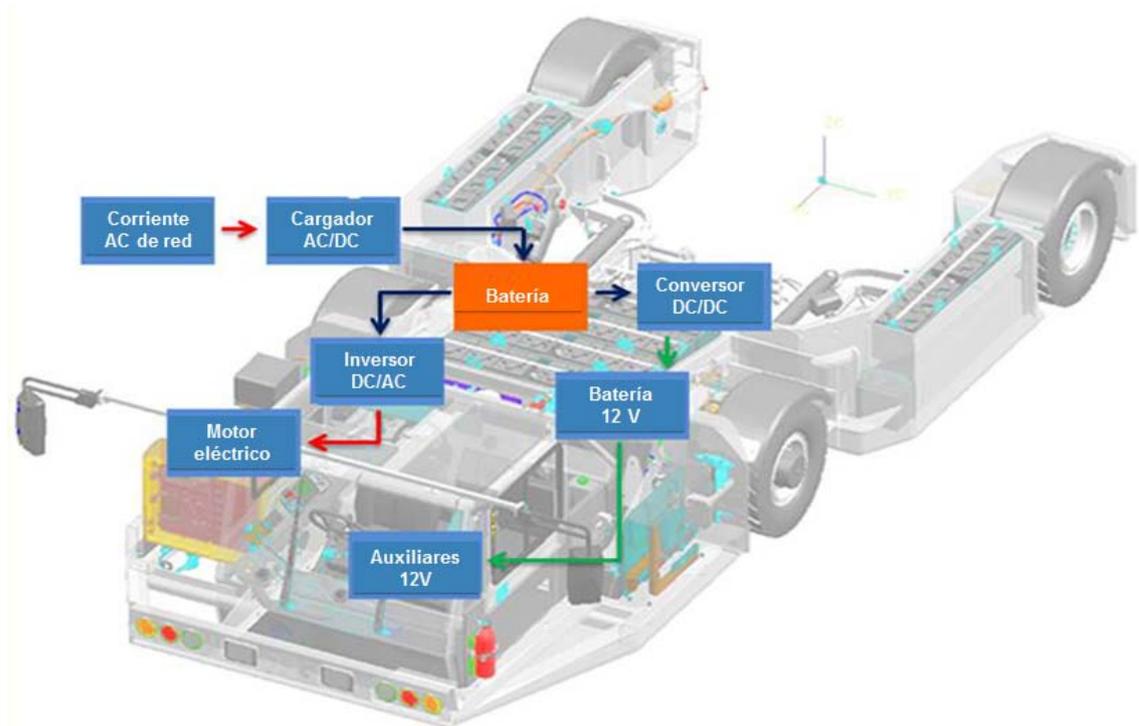


Figura 3.6.2.3. - Esquema completa convertidores.

3.6.3. Carga

La carga es sin duda la acción decisiva de cualquier vehículo eléctrico pues determinará el tiempo que se deberá tener inhabilitado, por tanto la misión será minimizarlo lo máximo posible sin comprometer la vida útil de las baterías que se verían afectadas por cargas excesivamente rápidas. Para poder cumplir estos dos requisitos se definirán tres tipos de cargas:

- Carga rápida: será la que permita el máximo funcionamiento del tractor de remolque. Para implementarlo se necesitará una estación de abastecimiento especialmente configurada.

Las baterías escogidas soportan cargas de hasta $2C^7$, sin embargo no se superará la barrera de $1,5C$ para asegurar una longeva capacidad de almacenamiento. El problema de esta carga es que sólo es aplicable entre el 10% y el 80%, por lo que trabajar en esta parte será la opción más recomendable, como se puede observar en la siguiente gráfica:

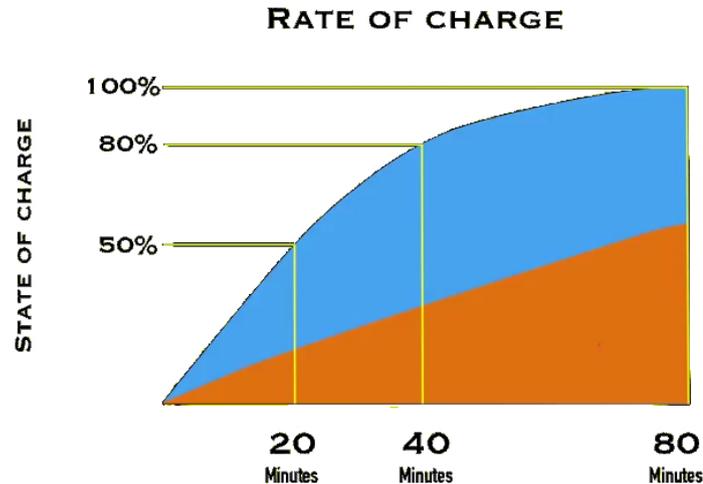


Figura 3.6.3.1. - Ratio de carga baterías Li-ión.

La carga, por tanto, se realizará mediante 4 cargadores de 120 kW, similares a los instalados por la marca Tesla en sus supercargadores que producirán una potencia pico de 480 kW (aproximadamente $1,2C$). El tiempo aproximado de carga será 40 minutos para recargar el 80 % de la batería, lo que permitirá cómodamente otras 8 horas de funcionamiento ininterrumpido.

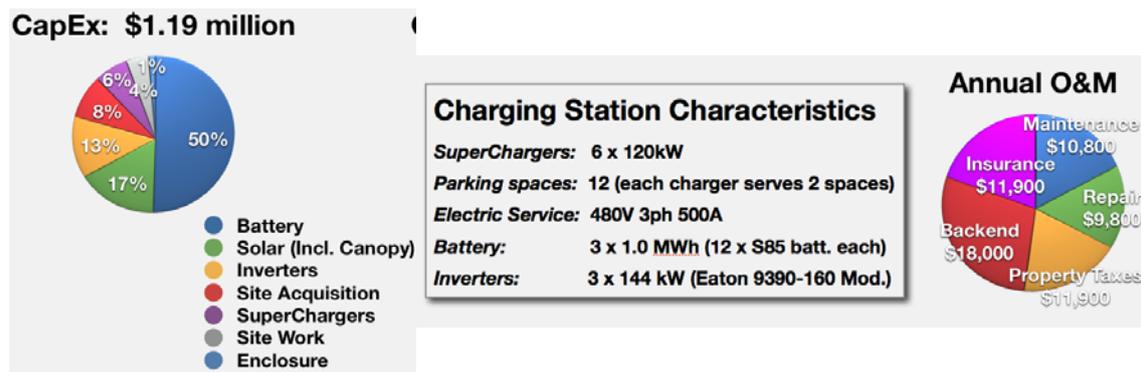


Figura 3.6.3.3. - Características⁸ Supercargador Tesla.

⁷ Un C es una unidad adimensional que significa el tamaño de total de la batería. Por ejemplo una descarga de una batería de 100kW a $2C$ significaría un consumo de 200kW y una descarga a $0,5C$ significaría un consumo de 50 kW.

⁸ Publicado en “Tesla’s Supercharger – The Cost of Giving Away Free Energy” por Randy Carlson en la web seekingalpha.com

Por lo tanto, una estación de recarga de estas dimensiones producirá servicio para hasta 8 vehículos siempre y cuando exista una rigurosa planificación de las horas de utilización y carga de cada vehículo. El precio de una instalación con 6 puntos de recarga -de los cuales se planea el uso continuo de 4 y 2 para otras aplicaciones o en caso de avería de alguno- es aproximadamente de medio millón de dólares, ya que respecto a la imagen posterior no se emplearán bancos de baterías (50%) ni se necesitará adquirir el sitio (8%) en referencia a la imagen anterior.

Estas estaciones tienen la ventaja de necesitar escaso o nulo mantenimiento y su mayor coste es la inversión inicial, que hay que realizar para acondicionar la instalación eléctrica de todo el aeropuerto de tal manera que se cumplan las medidas de seguridad necesarias para una aplicación que supera 1 GW de potencia.

- Carga lenta: se producirá mediante 4 cargadores de 25 kW y conseguirá una carga total en 8 horas. Esta carga será recomendable cuando el vehículo vaya a estar inutilizado durante un turno de trabajo y se desee realizar una carga que deteriore lo mínimo posible para las baterías.

Marca	UP Wallbox
Modelo	IEC 62196
Toma de Salida	IEC 62196 hembra
Intensidad de recarga	6 - 32 A
Potencia de Recarga	1,4 kW- 22kW
Velocidad Variable	Sí
Protección	IP 54 / IK 10
Dimensiones caja	320*210*138 mm
Peso	5 kg
Eficiencia	hasta 97%



Tabla 3.6.3.1. - Características cargador UP Wallabox.

Figura 3.6.3.3. - Cargador UP Wallabox.

- Carga desde GPU: mediante un cargador portátil se podrá cargar el tractor de remolque desde un generador de tierra. Sin embargo este método nunca será elegido como primera opción debido a la baja eficiencia de la energía producida por un GPU y, por tanto, sólo se usará como método de emergencia en caso de no disponer de ninguna de las dos cargas explicadas anteriormente. Su velocidad será condicionado por la GPU, pero al máximo igual a la de la carga lenta.

Marca	EVR3 ES
Modelo	ES-22CE32MF/7D
Intensidad de recarga	4 - 32 A
Voltaje	400V (3-phase)
Potencia de carga máx.	hasta 22 kW
Dimensiones	200*120*90 mm
Velocidad Variable	Sí
Temp. funcionamiento	-25 °C hasta +40 °C
Peso	5.1 kg



Tabla 3.6.3.2. - Características cargador EVR3 ES.

Figura 3.6.3.4. - Cargador EVR3 ES.

3.6.4. BMS

El Balance Management System (también conocido como BMS o Sistema de Gestión de Balanceo de Baterías) es un pequeño dispositivo electrónico cuya función principal es la de monitorear constantemente el voltaje de todas y cada una de las celdas existentes en el pack de baterías para mantener un voltaje constante y uniforme en todas ellas. El BMS no es necesario para pequeñas instalaciones donde la cantidad de celdas es reducida y los ratios de carga y descarga son bajos, como por ejemplo, un ordenador portátil; pero se vuelve de vital importancia para aumentar la vida útil de las baterías en aplicaciones de vehículos eléctricos donde se sobrepasan las 1200 celdas con altas intensidades de carga y descarga.

Marca	BesTech Power
Modelo	HCX-D170V1
Tipo	LiFePO4
Voltaje	54 V
I_{max} carga	200 A
I_{max} descarga	500 A
I consumo	≤ 200μA
I pico	2000 A
Dimensiones	214*143*37 mm
Celdas	3 hasta 96
Eficiencia	hasta 97%

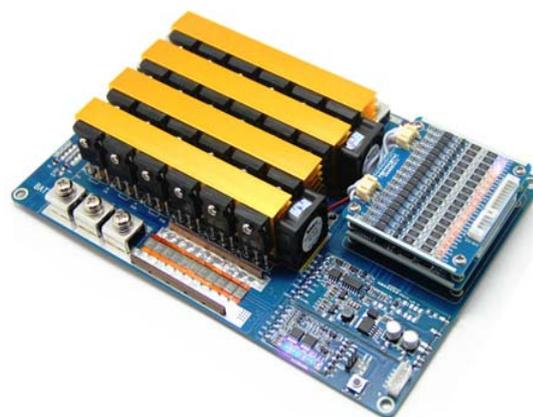


Tabla 3.6.4.1. - Características BMS BesTech Power

Figura 3.6.4.1. - BMS BesTech Power

3.7. Sistema Gestión temperatura

El Sistema de Gestión de temperatura pese a no ser sistema principal de la propulsión, es de vital importancia debido a que es el encargado de mantener la temperatura adecuada en todos los sistemas del vehículo.

Cabe destacar que no se trata simplemente de un sistema de refrigeración para disipar el calor sobrante, sino que debe ser un sistema que consiga mantener cada dispositivo dentro de los rangos adecuados de funcionamiento optimizando los flujos de líquido refrigerante para aumentar la eficiencia global.

El controlador de temperatura digital es un conjunto de software y hardware que deberá disipar el calor del el motor, el inversor y los convertidores que estarán continuamente necesitando refrigeración para evitar sobrecalentamientos. Por otra parte, también será el encargado de mantener una temperatura constante y confortable en el habitáculo del operador así como en las baterías, que como se puede ver en el siguiente gráfico es necesaria para aumentar el rendimiento de las baterías, principalmente en los casos de bajas temperaturas externas.

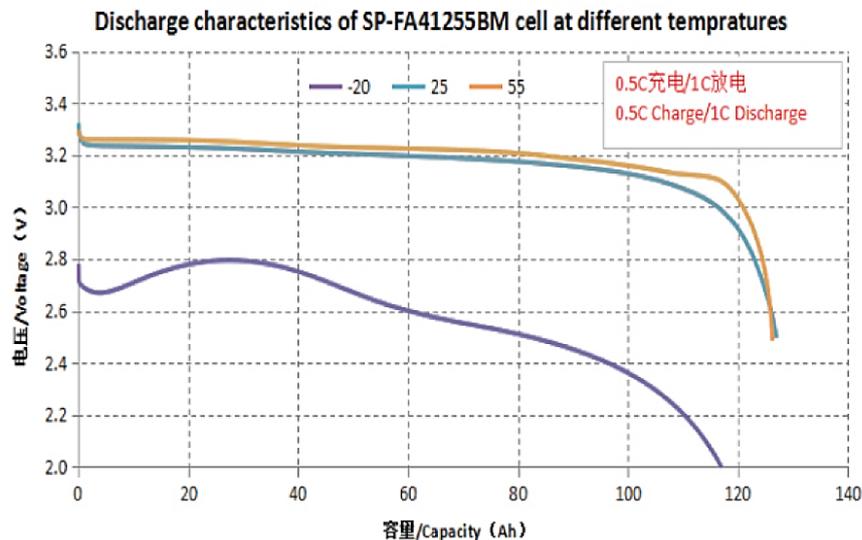


Figura 3.7.1. - Características descarga baterías LiFePo4 a diferentes temperaturas.

Las baterías son por tanto el elemento que más sufrirá si trabaja fuera del rango adecuado y su control de temperatura aumentará la eficiencia así como evitara posibles explosiones. El momento más crítico en esta aplicación será durante la carga debido a la gran intensidad de carga principalmente en las cargas rápidas.

Así mismo este dispositivo tendrá la función de precalentamiento unos 20 minutos antes del inicio del uso para que la temperatura de las baterías sea la adecuada desde el inicio del funcionamiento siempre y funcionará gracias a las resistencias que rodean los packs de baterías que son alimentadas directamente de la red (si está conectado a un cargador) o de las propias baterías.

Marca	Hydac
Modelo	D4
Capacidad refrig.	7.5 kW
Condensador	Aire/Agua
Refrigerante	Agua desionizada
Presión Salida	3 bar
Flujo	40 l/min
Potencia disipada	kW
Dimensiones	601*601*1361 mm
Peso	160 kg



Tabla 3.7.1. - Características sistema gestión de temperatura Hydac.

Figura 3.7.2. - Sistema gestión de temperatura Hydac.

Por tanto, el monitoreo continuo de las temperaturas de cada uno de los sectores será un dato de gran relevancia que el operario deberá poder controlar continuamente y será mostrado continuamente en un panel luminoso de la cabina donde se mostrará la temperatura actual y el rango de temperaturas aceptables. Cualquier valor anómalo será avisado con alarmas lumínicas y sonoras que avisarán el malfuncionamiento y deberá ser retirado el tractor de remolque para su reparación.



Figura 3.7.3. - Display temperaturas por sectores.

3.8. Instalación de Paneles solares

El aprovechamiento de la energía solar no es ninguna novedad, sin embargo su implementación en el sector aeronáutico todavía no es habitual. En este apartado, sin entrar en gran profundidad técnica ni operacional, se propondrá su utilización para minimizar aún más el efecto medioambiental de este vehículo.

Chile debido a su peculiar geografía dispone de muy diversos climas e índices de irradiancia solar (W/m²). En el caso en Santiago de Chile, se tienen niveles considerablemente altos equiparables a países ecuatoriales. Para su implementación se emplearán el siguiente tipo de paneles:

Marca	IUASOL
Modelo	PV-01-260
Potencia Nominal	260 W
Tensión en máx. potencia	31.1 V
Corriente en máx. potencia	8.36 A
Eficiencia	15.7 %
Dimensiones (mm)	993*46,2*1,668
Peso	19 kg



Tabla 3.8.1. - Características paneles solares IUASOL.

Figura 3.8.1. - Paneles solares IUASOL.

Para el cálculo de este apartado se ha utilizado la aplicación online ‘Explorador Solar’⁹ perteneciente al Ministerio de Energía del Gobierno de Chile que provee de un informe detallado de la información solar y la producción de una hipotética planta fotovoltaica en la ubicación deseada con los parámetros introducidos por el usuario.

Empleando fotografías aéreas se puede calcular que la superficie del edificio principal del aeropuerto Arturo Merino Benítez supera ligeramente los 52.000 m², de los cuales se asumirá una superficie útil del 80% de aproximadamente 40.000 m². También son considerables los más de 20000 m² útiles disponibles en la zona techada del aparcamiento así como los nuevos edificios que se van a construir según el proyecto de la ampliación del Terminal Internacional ‘Pudahuel 2020’¹⁰.

⁹ Disponible en la web <http://www.minenergia.cl/exploradorsolar/>

¹⁰ Toda la información en <https://www.nuevopudahuel.cl/TerminalInternacional/fases>

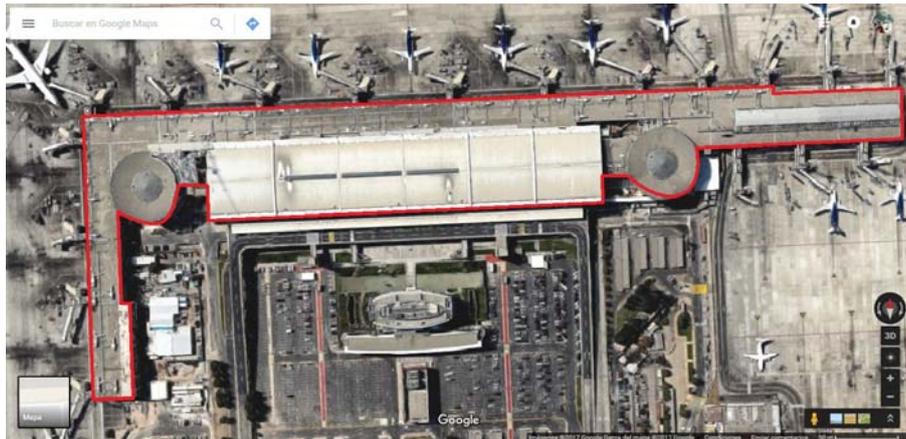


Figura 3.8.2. - Imagen satelital aeropuerto AMB

En base a los cálculos realizados previamente, se tiene un consumo promedio anual de unos 400 MW, que en la configuración óptima de colocación se producirían con 1500 m² de techo. Por tanto, si se cubriese la totalidad de la superficie del edificio de la terminal se podrían alimentar completamente a unos 26 tractores de remolque¹¹.

Configuración	Fijo Inclinado
Inclinación	28°
Azimut	-5°
Coef. Temperatura	-0.45 %/°C
Ef. Inversor	96.0 %
Pérdidas	14 %
Capacidad Instalada	250 kW
Total Diario	1.1 MWh
Total Anual	402.2 MWh
Factor de Planta	18.4 %
Superficie	1500m ²

Tabla 3.8.2. - Configuración y paneles solares techo AMB de 400 MWh.

Por otra parte se ha calculado la posibilidad de colocación de paneles en la parte superior del propio tractor de remolque donde se dispone de una superficie aproximada de 15 m². Como se puede ver dado que la colocación es menos eficiente, pues están horizontales, y la superficie es muy reducida se estaría produciendo como máximo 3.4 MWh, una producción de en torno al 1% del consumo total.

¹¹ En base a cálculos de utilización máxima, trabajando 21h diarias los 365 días del año (definido posteriormente como horizonte optimista).

Otro dato importante es que estos paneles, a diferencia de los del techo de la terminal, estarían continuamente afectados por sombras generadas por edificios, el avión y otros objetos del aeropuerto. Sin embargo su instalación no altera notoriamente el precio final del vehículo y puede ser útil para contrarrestar el fenómeno de la autodescarga de las baterías si se mantiene inmovilizado por un largo periodo el vehículo.

Configuración	Fijo Horizontal
Inclinación	0°
Azimut	0°
Coef. Temperatura	-0.45 %/°C
Ef. Inversor	96.0 %
Pérdidas	14 %
Capacidad Instalada	2.4 kW
Total Diario	9 kWh
Total Anual	3.4 MWh
Factor de Planta	16.2 %
Superficie	15m ²

Tabla 3.8.3. - Configuración y paneles solares techo tractor de remolque

Por tanto, el uso de paneles solares fotovoltaicos directamente colocados en el tractor de remolque no afectará notablemente a aumentar la autonomía. Así mismo su colocación sería un factor de riesgo dada su fragilidad y se aumentarían los daños involuntarios en los mismos debido a golpes o ralladuras, creando un costo de mantenimiento superior al deseado. Es por estas causas por las que sólo se utilizará un panel solar en la parte superior de la cabina que sirva directamente a la batería de 12V y en caso de emergencia sirva para las comunicaciones con la torre de control.

3.9. Estimación de costos

La viabilidad económica es probablemente la más importante para un sector como el aeroespacial, que en los últimos años está implementando estrategias ‘low cost’ cada vez más agresivas y por tanto cualquier reducción de costos que se pueda proporcionar será altamente beneficioso para las compañías. Para realizar esta comparativa se han diferenciado tres posibles escenarios:

- **Térmico:** compra y utilización del vehículo con motor de combustión diésel tal y como se utiliza hoy en día durante 10 años con un funcionamiento de 23 horas máximas diarias, teniendo en cuenta un repostaje de unos 300 litros cada turno.
- **Eléctrico:** compra del vehículo electrificado y la utilización durante 10 años con un funcionamiento de 21 horas diarias, con una carga rápida al finalizar cada turno de trabajo. A este costo se le ha añadido un cambio de batería tras 5 años de funcionamiento (dado que se estaría en el límite de 3000 ciclos de vida completa y la capacidad total de las baterías se habría reducido al 80%¹²).
- **Eléctrico Solar:** mismo caso que el anterior pero obteniendo la electricidad de la colocación de 1500 m² de paneles solares en el techo del edificio principal. El costo de los mismos a la hora de los cálculos se ha definido como el 70% de la inversión total, dado que su duración de esos paneles es superior a los 25 años.

Los datos asumidos de precios y consumos son los siguientes:

Consumo combustible	40 l/h
Consumo energía	50 kW/h
Precio combustible	0,7 €/l
Precio energía	0,14 €/Kwh

Tabla 3.9.1. - Precios y consumos motor combustión y eléctrico.

Así mismo se han tomado tres posibles horizontes en función del funcionamiento máximo que se puede obtener con el tractor de remolque térmico:

- Horizonte optimista: funcionamiento al 100%
- Horizonte optimista: funcionamiento al 70%
- Horizonte optimista: funcionamiento al 50%

¹² Se podría seguir utilizando sin problemas de seguridad si se quiere reducir el presupuesto y podría seguir garantizando el funcionamiento de 8 horas posiblemente más ciclos.

3.9.1. Horizonte optimista

Para el presupuesto del motor de combustión diésel se ha tenido en cuenta el precio de compra de un vehículo nuevo, el combustible gastado y el precio del mantenimiento acorde a los manuales, a precios de mantenimiento de esos motores y a estudios¹³ realizados en camiones de motores similares.

	Térmico	Eléctrico	Ratio	Eléctrico SOLAR	Ratio
Funcionamiento (años)	10	10	1,00	10	1,00
Horas / día	23	21	0,91	21	0,91
Horas totales	83.950	76.650	0,91	76.650	0,91
Consumo anual	335.800 l	383.250 kW		383.250 kW	

	Térmico	%	Eléctrico	%	Ratio	Eléctrico SOLAR	%	Ratio
Coste vehículo	250.000 €	7,7%	700.000 €	37,7%	2,80	700.000 €	44,7%	2,80
Cambio baterías	- €	0,0%	200.000 €	10,8%	-	200.000 €	12,8%	-
Paneles solares (250kW)	- €	0,0%	- €	0,0%	-	245.000 €	15,7%	-
Cargador	- €	0,0%	120.000 €	6,5%	-	120.000 €	7,7%	-
Combustible / Energía	2.350.600 €	72,3%	536.550 €	28,9%	0,23	- €	0,0%	-
Cambio aceite	100.000 €	3,1%	- €	0,0%	-	- €	0,0%	-
Neumáticos	150.000 €	4,6%	150.000 €	8,1%	1,00	150.000 €	9,6%	1,00
Otros Mantenimiento	400.000 €	12,3%	150.000 €	8,1%	0,38	150.000 €	9,6%	0,38
TOTAL	3.250.600 €		1.856.550 €			1.565.000 €		

Coste / hora	38.72 €	24.22 €	20.42 €
---------------------	----------------	----------------	----------------

Tabla 3.9.1.1 - Estimación de costos en horizonte optimista.

Primero que todo se ha calculado una amortización de todos los productos en 10 años, con una utilización máxima de 23 horas al día en uno térmico y 21 horas al día en uno eléctrico. La diferencia radica en la necesidad de 3 cargas de aproximadamente 45 minutos en el eléctrico respecto al repostaje de combustible aproximado de 15 minutos. Por tanto al máximo de utilización tras la electrificación se podrá trabajar el 91% del tiempo en comparación con uno convencional.

¹³ “Observatorio de costes del transporte de mercancías por carretera” realizado por el Ministerio de Fomento de España.

3.9.2. Horizonte moderado

Para el horizonte moderado se ha reducido la utilización máxima al 70%, lo que crea que ahora el funcionamiento máximo de ambos vehículos -térmico y eléctrico- sean iguales a 16 horas al día. Los costos de mantenimiento también se reducen proporcionalmente a su funcionamiento.

	Térmico	Eléctrico	Ratio	Eléctrico SOLAR	Ratio
Funcionamiento (años)	10	10	1,00	10	1,00
Horas / día	16	16	1,00	16	1,00
Horas totales	58.765	58.765	1,00	58.765	1,00
Consumo anual	235.060 l	293.825 kW		239.825 kW	

	Térmico	%	Eléctrico	%	Ratio	Eléctrico SOLAR	%	Ratio
Coste vehículo	250.000 €	10,6%	700.000 €	42,6%	2,80	700.000 €	47,5%	2,80
Cambio baterías	- €	0,0%	200.000 €	12,2%	-	200.000 €	13,6%	-
Paneles solares (250kW)	- €	0,0%	- €	0,0%	-	245.000 €	16,6%	-
Cargador	- €	0,0%	120.000 €	7,3%	-	120.000 €	8,1%	-
Combustible / Energía	1.645.420€	70,0%	411.355 €	25,1%	0,25	- €	0,0%	-
Cambio aceite	70.000 €	3,0%	- €	0,0%	-	- €	0,0%	-
Neumáticos	105.000 €	4,5%	105.000 €	6,4%	1,00	105.000 €	7,1%	1,00
Otros Mantenimiento	280.000 €	11,9%	105.000 €	6,4%	0,38	105.000 €	7,1%	0,38
TOTAL	2.350.420 €		1.641.355 €			1.475.000,00 €		

Coste / hora	40.00 €	27.93 €	25.10 €
---------------------	---------	---------	---------

Tabla 3.9.2.1 - Estimación de costos en horizonte moderado.

Al aplicar en este horizonte una tasa de no utilización o fallo del 30%, las diferencias en precios por hora se reducen. Sin embargo el sistema térmico sigue produciendo un ahorro del 29% y el térmico solar un ahorro de 37%. Como en los otros horizontes la reducción más significativa es el precio del combustible, que se reduce considerablemente. No obstante, el gran inconveniente es posiblemente la inversión inicial de la electrificación, los cargadores y los paneles solares superan el millón de euros.

3.9.3. Horizonte conservador

En el horizonte conservador sólo 12 horas al día sería empleado el vehículo, lo que corresponde al 50% de su utilización máxima. Este panorama sería el frecuente en pequeños aeródromos o pequeñas compañías aéreas con baja carga de trabajo, no existente en grandes aeropuertos como Arturo Merino Benítez habitualmente.

	Térmico	Eléctrico	Ratio	Eléctrico SOLAR	Ratio
Funcionamiento (años)	10	10	1,00	10	1,00
Horas / día	12	12	1,00	12	1,00
Horas totales	41.975	41.975	1,00	41.975	1,00
Consumo anual	167.900 l	209.875 kW		209.875 kW	

	Térmico	%	Eléctrico	%	Ratio	Eléctrico SOLAR	%	Ratio
Coste vehículo	250.000 €	14,3%	700.000 €	55,4%	2,80	700.000 €	57,6%	2,80
Cambio baterías	- €	0,0%	- €	0,0%	-	- €	0,0%	-
Paneles solares (250kW)	- €	0,0%	- €	0,0%	-	245.000 €	20,2%	-
Cargador	- €	0,0%	120.000 €	9,5%	-	120.000 €	9,9%	-
Combustible / Energía	1.175.300 €	67,1%	293.825 €	23,2%	0,25	- €	0,0%	-
Cambio aceite	50.000 €	2,9%	- €	0,0%	-	- €	0,0%	-
Neumáticos	75.000 €	4,3%	75.000 €	5,9%	1,00	75.000 €	6,2%	1,00
Otros Mantenimiento	200.000 €	11,4%	75.000 €	5,9%	0,38	75.000 €	6,2%	0,38
TOTAL	1.750.300 €		1.263.825 €			1.215.000 €		

Coste / hora	41.70 €	30.11 €	28.95 €
---------------------	---------	---------	---------

Tabla 3.9.3.1 - Estimación de costos en horizonte conservador.

Los beneficios en este horizonte son los más ajustados, sin embargo se produce un ahorro del 28% y del 31% al implementar la versión eléctrica y eléctrica solar respectivamente. La principal diferencia de este horizonte es que debido a que no se han alcanzado los ciclos suficientes de las baterías su cambio no será necesario en el caso de la electrificación. Además en este tipo de actividad probablemente se haya empleado habitualmente la carga lenta, hecho que garantiza aún más el estado correcto de las baterías.

3.10. Emisiones contaminantes

Para la realización de este apartado se ha mantenido la diferenciación propuesta en el apartado anterior y se ha calculado las emisiones de CO₂ tanto directas (en el caso del motor térmico) como indirectas (en el caso del eléctrico).

Motor eléctrico	0,409 kg CO ₂ / 1KW
Motor térmico (diésel)	2,63 kg CO ₂ / 1l

Tabla 3.10.1. - Producción CO₂ motor combustión y eléctrico.

Las emisiones del motor térmico se han obtenido por estequiometría de la combustión del diésel (asumiendo que se trata de una cadena de C₁₂H₂₃) mientras que las de la electricidad se han tomado de una base de datos de la “*International Energy Agency (IEA)*” para el caso de Chile. Estos datos varían considerablemente en función de las tecnologías usadas en cada país para la producción eléctrica y el calor generado a partir de combustibles fósiles, nuclear, hidráulico (sin almacenamiento por bombeo), geotérmico, solar y biomasa, obteniendo:

Emisiones CO₂ (ton/año)	Térmico	Eléctrico	Eléctrico SOLAR
Horizonte optimista	883,15	171,68	0
Horizonte moderado	618,21	120,17	0
Horizonte conservador	441,58	85,84	0

Tabla 3.10.2. - Producción CO₂ en función del horizonte.

La reducción de CO₂ es superior al 80% en el caso del eléctrico y total si se genera la energía a partir de paneles solares fotovoltaicos. Para los otros contaminantes tales como CO, THC, NO_x, SO_x, MP₁₀, MP_{2.5}... se espera una reducción parecida, pues desaparece la combustión del motor diesel, que es altamente contaminante. Así mismo se reduce la contaminación en el aeropuerto y sus proximidades, una zona ya críticamente saturada de gases contaminantes.

También cabe recalcar que implementando la electrificación se reduce la contaminación indirecta debida a la producción y transporte hasta el aeropuerto del combustible gastado por los diferentes tractores de remolque de los cuales disponga el aeropuerto. Este aislamiento del consumo de combustible y energía con la versión solar a su vez evitará las variaciones de precios debidas a fluctuaciones del petróleo, manteniendo los costes de operación mucho más bajos y estables durante los años.

Capítulo 4

Conclusiones

Las alternativas a los combustibles ya han llegado al sector aeroportuario y en los próximos años se verán los resultados de los numerosos estudios que hay hoy en día en laboratorios, centros de desarrollo y universidades. La **tecnología ya no es un limitante** para la propulsión eléctrica de vehículos pesados como los tractores de empuje y su electrificación es completamente viable.

Ni los motores ni las baterías son ya factores restrictivos en la electrificación de los vehículos terrestres y a la velocidad a la que están mejorando la performance de éstos, será rápidamente superada por las nuevas generaciones de baterías y demás elementos; cada vez con mayores rendimientos y menores tamaños y pesos. Aunque la aplicación final dependerá de las inversiones de los diferentes aeropuertos y la viabilidad económica de los nuevos modelos propuestos por la industria.

Otro factor crítico serán las ayudas económicas que proporcionen los estados para este campo, que ayudarán a la reducción de la inversión inicial normalmente muy alta ya que, no solo implica el cambio del vehículo, sino la instalación de cargadores, la formación al personal y la puesta en marcha de todo el nuevo sistema técnico-organizativo. Pero sólo aplicando esta tecnología se conseguirá la reducción de emisiones nocivas en el lado tierra del sector aeroespacial.

Así mismo otro factor contaminante como es el caso del **ruido se disminuirá significativamente**. Rebajando la generación de ruido en los aeropuertos se producirá un impacto positivo en el ambiente general del aeropuerto, que repercutirá de forma directa tanto en la salud laboral de los operarios, como en la comodidad y tranquilidad de los pasajeros que tengan que transitar por la zona de la plataforma a la hora del abordaje o la bajada del avión.

En resumen, implementando el sistema eléctrico casi el **75% de la energía es usado de una manera eficiente**; un dato muy superior al de un motor térmico, que en el mejor de los casos, no aprovecha más del 30-35% de la energía proveniente de la gasolina. A su vez, los motores eléctricos tienen numerosas ventajas respecto a los térmicos, como su alto par y potencia desde el inicio del movimiento, un bajo costo de

mantenimiento, mayor seguridad y la ausencia de consumo en las esperas donde los motores convencionales funcionarían en ralentí.

El único inconveniente es la baja densidad energética de las baterías que obligan a cargar más de 4 toneladas de baterías. Sin embargo para la aplicación de un tractor de remolque el peso adicional no es un problema sino una ventaja dado que ayuda a mejorar la tracción en el momento de la carga, evitando el deslizamiento de las ruedas propulsivas.

El ahorro final será fuertemente dependiente del porcentaje de utilización que se le dé al vehículo, **llegando a un ahorro económico del 47%** del horizonte optimista como de se puede observar en la tabla siguiente. Sin embargo, es importante ver que su ahorro es independiente del horizonte por lo que su aplicación siempre será beneficiosa desde el punto de vista monetario. Así mismo, la reducción de los gases contaminantes es una fuerte ventaja de estos vehículos y más si se complementa con la **instalación solar fotovoltaica que permitiría la implementación de un tractor de empuje neutral en emisiones de gases contaminantes y de efecto invernadero.**

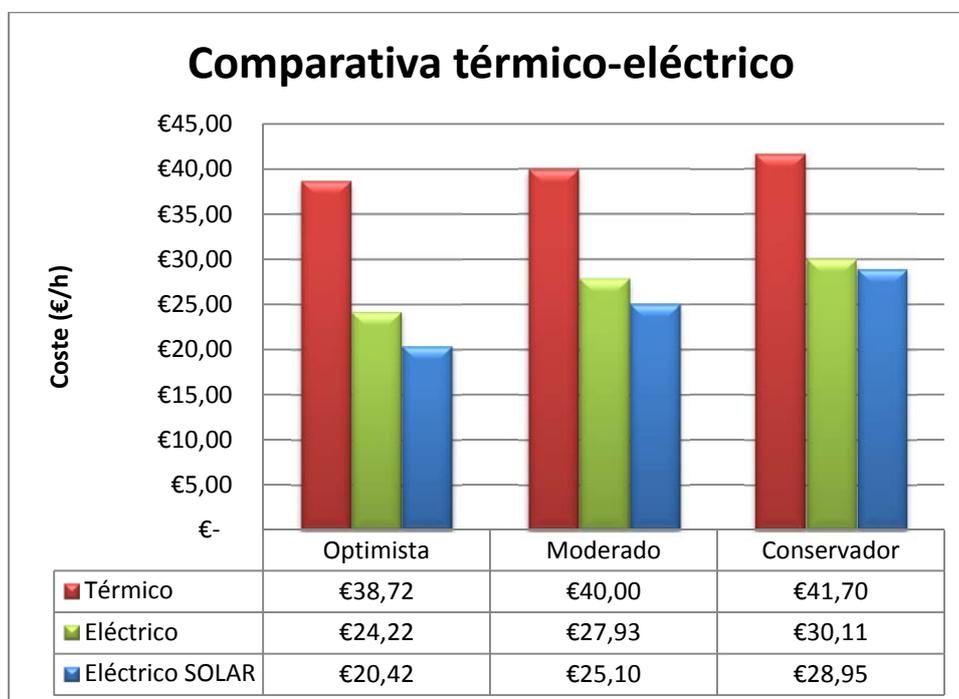


Figura 4.1 - Comparativa costos por hora.

4.1. Posibles continuaciones del trabajo

4.1.1. Viabilidad carreteo extendido

Las tendencias de minimizar consumos es algo ya conocido y aplicado en el sector aeronáutico desde hace años y uno de los mejores ejemplos es la reducción en la fase de carreteo tanto previa al despegue como posterior al aterrizaje. Las nuevas aeronaves ya permiten en condiciones favorables pasar del '*Total Engine Taxi*' (carreteo con total uso de motores) al '*Single Engine Taxi*' (carreteo con un único motores). El paso siguiente parece ser el uso de diferentes tipos de tractores de remolque para realizar estas operaciones en tierra, donde el avión solamente necesitaría el uso de la APU para proveer energía y aire a la aeronave, disminuyendo notablemente el consumo, aunque aumentando la complejidad del tráfico en tierra.

4.1.2. Viabilidad otros tamaños

Aunque los componentes básicos y la tecnología aplicada serían similares, otra interesante investigación sería la viabilidad tanto económica como operacional a diferentes familias de tractores de remolque para aeronaves ligeras y aeronaves más pesadas. El estudio de tractores de remolque con barra (*towared*) también podría generar una importante disminución del consumo de combustibles fósiles y contaminación en el entorno del aeropuerto.

4.1.3. Abastecimiento de energía al avión

El banco de baterías del tractor de empuje podría alimentar directamente de energía eléctrica al avión. Aunque su uso no sería habitual dado el alto consumo eléctrico de los aviones, sería una solución en casos de emergencias como fallos de los generadores o de la APU. El estudio, por tanto, comprendería los convertidores y dispositivos necesarios para poder realizar este abastecimiento de forma eficaz y segura sin dañar las baterías.

Capítulo 5

Bibliografía

5.1. Publicaciones y Artículos

[1] **ALFARO J.S.** (Dirección General de Aeronáutica Civil Chile). “*Informe Anual 2015. Niveles de ruido aeropuerto Arturo Merino Benítez*”. 2015. 21 p.

[2] **CARLSON R.** “*Tesla’s Supercharger - The Cost of Giving Away Free Energy.*”

[3] **DÍAZ M.S., ESCÁRATE R.N.** (Responsables de Elaboración Asesoría Algoritmos). “*MCA 022/A1-16 Actualización memoria de cálculo de emisiones aeropuerto Arturo Merino Benítez*”. 2015. 64 p.

[4] **DIRECCIÓN GENERAL DE TRANSPORTE TERRESTRE.** (Ministerio de Fomento de España). “*Observatorio de costes del transporte de mercancías por carretera*”. Enero 2016. 79 p.

[5] **FLEUTI E.** (Head of Environment / Services Aircraft). “*Ground Handling Emissions Methodology and Emission Factors Zurich Airport*”. 2014. 20 p.

[6] **GAGO B.G.** (Universidad de Valladolid. Escuela de Ingenierías Industriales). “*Sistema eléctrico de los aviones*”. Junio 2016. 145 p.

[7] **ITHAN M.I., SELDERBEEK T., BEELAERTS VAN BLOKLAND W.W.A., LODEWIJKS G.** (Department Maritime & Transport Technology, Technology University of Delft). “*Aircraft Taxiing Strategy Optimization*”. 2013.

[8] **JENSEN L., YUTKO B.** “*Fuel Burn Reduction: How Airlines Can Shave Costs*”. 2014. 10 p.

[9] **JUNG Y.** (NASA Ames Research Center). “*Fuel Consumption and Emissions from Airport Taxi Operations*”. Septiembre 2010

[10] **LEDGER J.** (Saft Corporate Communications and Institutional Relations Director). “*Saft Li-ion battery system powers Kalmar Motor’s world-first hybrid electric tractor for wide body aircraft*”. Octubre 2014.

[11] RAVIZZA S., CHEN J., ATKIN J.A., BURKE E., STEWART P. “*The trade-off between taxi time and fuel consumption in airport ground movement.*” Febrero 2013.

[12] UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID. (Grupo de investigación en consumo energético del transporte aéreo). “*Energy consumption and emissions associated with transportation by aeroplane*”. 128 p.

5.2. Libros

[13] PAYRI F., DESANTES J.M. (Universitat Politècnica de València). “*Motores de Combustión Interna Alternativos*”. Editorial Reverté. 2011. 1016 p.

[14] TIPLER P., MOSCA G. “*Física para Científicos e Ingenieros*”. 4ª edición. 605 p.

5.3. Fichas técnicas (adjuntas en Anexos)

<u>Baterías</u>	SinoPoly	SP - FA21255BM - 125Ah
		SP - LFP300AHA
<u>Tractor de remolque</u>	Panasonic	NCR18650B
		Douglas
	TUG	GT50
		GT110
		JBT
	Kalmar	Expediter 310
		Expediter 600
		TBL 50
TBL 180		
<u>Gestión Temp.</u>	Hydac	TBL 90
		TBL 800
<u>Cargador</u>	e-Station	D4
	UP Wallbox	EVR3
<u>Controlador</u>	Schneider	Tipo 2 32 Amp
		ATV 71-HC50N4

<u>Motor</u>	Siemens	High Torque SIMOTICS HT Series
	Deutz	BF6M1013C
<u>Conversor</u>	WEG	CTW04 DC Converter
	NEWMAR	Isolated - ISP Series
<u>Panel solar</u>	IUASOL	PV-01-245/260
	Solartec	S60PC

5.4. Links¹⁴

Webs principales marcas de Tractores de remolque

<http://www.lektro.com/>
<http://kalmarmotor.com/en/start/>
<https://www.tld-group.com/es/>
<http://www.makcontrols.com/>
<http://www.trepel.com/>
<http://www.goldhofer.de/en/anhaenger.html>

Tiendas online de venta

<http://www.evwest.com/catalog/index.php>
<http://www.batterybms.com/>
<http://www.electricmotorsport.com/>

Otros

<http://www.enap.cl/pag/53/784/informe-precios>
<http://www.iea.org/publications/freepublications/>
<https://www.sunearthtools.com/es/tools/CO2-emissions-calculator.php>
<https://inverterdrive.com/HowTo/inv/>

¹⁴ Se ha comprobado el correcto funcionamiento de todos los links a fecha 31-05-2017.

Anexos

Anexo 1: cálculos Excel

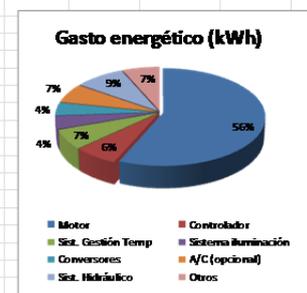
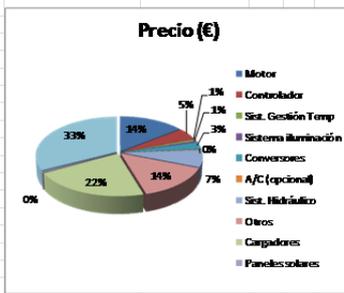
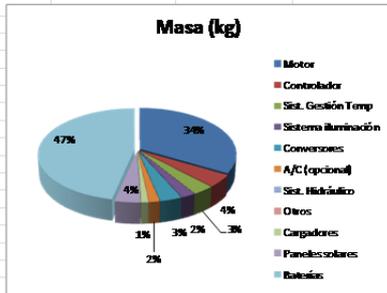
Hoja 1: Cálculos de Potencia, Par y Consumo¹⁵

Tractor + Avión											
		Aceleración + Vel cte + Deceleración		Par		Energía		Baterías		Motor	
Masa Avión (ton)	300	Velocidad inicial (km/h)	0	Radio rueda (m)	0,50	Distancia total (m)	200	Capacidad Pack (kWh)	500	Potencia real (kW)	510
Masa Tractor (ton)	20	Velocidad inicial (m/s)	0	Radio motor (m)	0,076	Trabajo (MJ)	7,57	Coef sobredimensionado	2,3	Potencia max 120s (kW)	760
Total Masa (ton)	320	Velocidad constante (km/h)	39			Trabajo (W)	2,10			Potencia nominal (kW)	1100
Peso (kN)	3136	Velocidad constante (m/s)	2,78	Par rueda (kNm)	50,82	Consumo real carga (kWh)	42,01	Voltaje nominal (V)	1,2	Coef sobredimensionado	4,6
Resistencia Rodadura (mu)	0,012	Velocidad media acef (m/s)	1,39	Par motor máx (kNm)	6,35	Consumo real ciclo (kWh)	26,69	Capacidad (Ah)	125	Potencia pico (kW)	297,2
Fza rozamiento (kN)	37,63	Velocidad final (km/h)	0	Efic transmisión (%)	90	Operaciones máx/hora	20,0			Coef sobredimensionado	2,6
Aceleración (m/s ²)	0,20	Velocidad final (m/s)	0	Par motor real máx (kNm)	7,06			Número celdas	1250		
Fza aceleración (kN)	64,00	Tiempo aceleración (s)	13,89	Eficiencia regenerativo (%)	95	Consumo ciclo (kWh)	26,69	Dens Gravimétrica (Wh/kg)	118	Par real (kN)	81,1
Fza Total aceleración (kN)	101,63	Tiempo vel cte (s)	61,09	Velocidad ang motor (rpm)	400	Capacidad Baterías 8h (kWh)	213,31	Dens Volumétrica (Wh/L)	228	Par max Pico 120s (kN)	122
Deceleración (m/s ²)	-0,26	Tiempo deceleración (s)	7,94	Velocidad ang motor (rad/s)	62,85			Precio (Wh/Dólar)	2,2	Par nominal (kN)	3,5
Fza deceleración (kN)	-112,00	Tiempo total (s)	82,91	Transmisión	8			Masa total (kg)	4237	Coef sobredimensionado	3,9
Fza Total deceleración (kN)	-74,37	Tiempo total (min)	1,38	Velocidad ang rueda (rad/s)	7,85			Volumen total (m ³)	2,193	Par pico (kN)	21,1
Potencia teórica max (kW)	282,31	Distancia aceleración (m)	19,29	Velocidad ang rueda (m/s)	3,93			Precio total (Dólares)	227273	Coef sobredimensionado	1,7
Eficiencia motor (%)	95	Distancia vel cte (m)	189,69	Velocidad rueda máx (km/h)	14,14						
Potencia real max (kW)	297,17	Distancia deceleración (m)	11,02								
Potencia real nominal (kW)	110,035										

En vacío									
		Aceleración + Vel cte + Deceleración		Par		Energía		Displazamiento	
Masa Tractor (ton)	20	Velocidad inicial (km/h)	0	Radio rueda (m)	0,50	Distancia total (m)	500		
Total Masa (ton)	20	Velocidad inicial (m/s)	0	Radio motor (m)	0,076	Trabajo (MJ)	1,27		
Peso (kN)	196,00	Velocidad constante (km/h)	49			Trabajo (W)	0,35		
Coef Rodadura (mu)	0,012	Velocidad constante (m/s)	11,11	Par rueda (kNm)	6,18	Consumo real vacío (kWh)	7,05		
Fza rozamiento (kN)	2,35	Velocidad media acef (m/s)	5,56	Par motor máx (kNm)	2,47				
Aceleración (m/s ²)	0,50	Velocidad final (km/h)	0	Efic transmisión (%)	90				
Fza aceleración (kN)	10,00	Velocidad final (m/s)	0	Par motor real máx (kNm)	2,74				
Fza Total aceleración (kN)	12,35	Tiempo aceleración (s)	22,22	Eficiencia regenerativo (%)	90				
Deceleración (m/s ²)	-0,50	Tiempo vel cte (s)	22,78	Velocidad ang motor (rpm)	600				
Fza deceleración (kN)	-10,00	Tiempo deceleración (s)	22,22	Velocidad ang motor (rad/s)	62,8185				
Fza Total deceleración (kN)	-7,65	Tiempo total (s)	67,22	Transmisión	2,5				
Potencia teórica max (kW)	137,24	Tiempo total (min)	1,12	Velocidad ang rueda (rad/s)	25,13274				
Eficiencia motor (%)	97,20	Distancia aceleración (m)	123,46	Velocidad ang rueda (m/s)	12,56627				
Potencia real max (kW)	141,20	Distancia vel cte (m)	253,09	Velocidad rueda máx (km/h)	45,2389				
Potencia real nominal (kW)	25,8861	Distancia deceleración (m)	123,46						

Hoja 2: 'Power Budget', costos y masa total

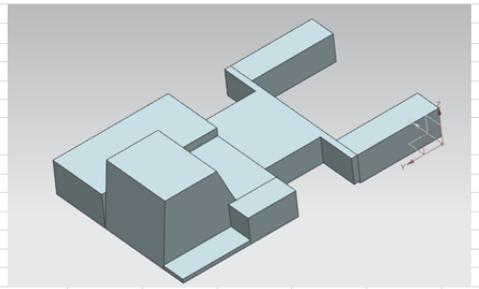
Componente	Unidades	Cond. desfavorable	Modelo	Gasto real (kWh)	Dimensiones (mm)			Masa (kg)	Precio (€)	
					Large	Alto	Profund			
Motor	1	Máxima carga	1FW401-1HER0-1AA0	26	900	1180	1890	2,00	3040	100.000 €
Controlador	1	Calor extremo		3	1120	1390	377	0,59	400	35.000 €
Sist. Gestión Temp	1	Calor extremo	Hydac-D4	3	601	601	1361	0,49	300	5.000 €
Sistema Iluminación		Noche		2				200	5.000 €	
Convertidores	3	Calor extremo		2	925	68	935	0,18	300	20.000 €
A/C (opcional)	1	Calor extremo	Denso	3				150	1.000 €	
Sist. Hidráulico	1	Carga avión		4					50.000 €	
Otros	1			3					100.000 €	
Cargadores								100	150.000 €	
Paneles solares	10	Noche	IUSASOL-PV-01-245/360		993	1,7	46		350	3.000 €
Baterías	1250	Frio extremo	SP-FA412558M		170	255	40,5	2,19	4237	227.273 €
				46				5,4	9077	696.273 €



¹⁵ En color amarillo se encuentran los datos que han sido introducidos para los cálculos.

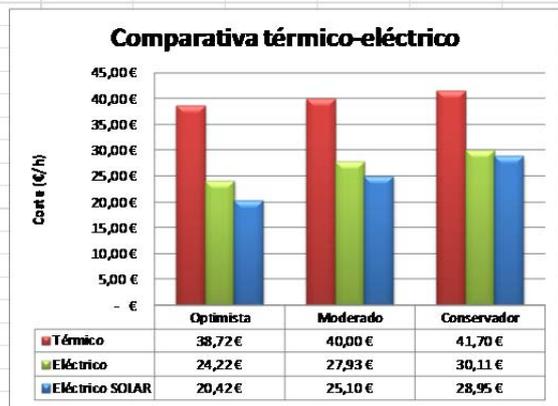
Hoja 3: Diseño

Código	Unidades	Componente	Dimensiones (cm)			Vol (m³)	Área sup. (m²)
			Largo	Alto	Profundo		
1	1	Cabina	180	160	190	5,472	3,42
2	1	Motor	150	85	290	3,698	4,35
3	1	Inversor	180	65	100	1,170	1,8
4	1	Sist. Temperatura Transmisión + Baterías	60	65	120	0,468	0,72
5	1	+ Sist neumático	200	65	155	2,015	3,1
6	2	Baterías	65	70	205	1,866	2,665
Vol total (m³)						14,688	16,056



Hoja 4: Resumen de costos

	Térmico	Eléctrico	Eléctrico SOLAR
Optimista	38,72 €	24,22 €	20,42 €
Moderado	40,00 €	27,93 €	25,10 €
Conservador	41,70 €	30,11 €	28,95 €

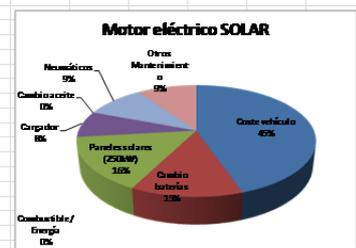
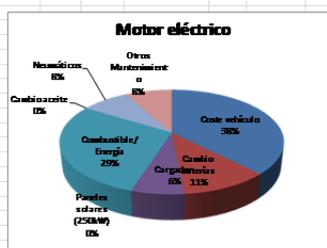
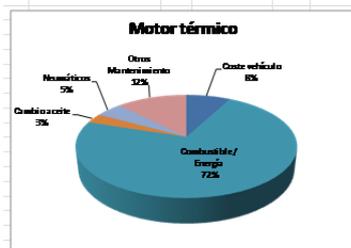
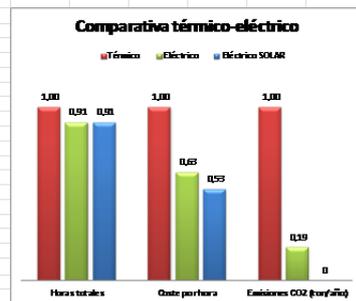


Hoja 5: Horizonte Optimista

Hoja 6: Horizonte Moderado

Hoja 7: Horizonte Conservador

Consumo combustible (l/h)	40	CO2/KW (kg)	0,409					
Consumo energía (KW/h)	50	CO2/lí diesel (kg)	2,63					
Precio combustible (€/l)	0,7	Funcionamiento	100%					
Precio energía (€/kwh)	0,14							
Tiempo función (min)	10	Térmico %	Eléctrico %	Batería %	Eléctrico SOLAR %	Batería %		
Funcionamiento diario	25	10	10	1,01	10	1,01		
Horas totales	85.950	76.650	0,91	76.650	0,91			
Operaciones totales	4.201	3.835	0,91	3.835	0,91			
Km totales	1.680	1.534	0,91	1.534	0,91			
Consumo anual (l-KW)	335.800	383.250		383.250				
Coste vehículo	250.000 €	7,7%	700.000 €	37,7%	2,80	700.000 €	44,7%	2,80
Cambio baterías	- €	0,0%	200.000 €	30,8%	-	200.000 €	12,8%	-
Pantales solares (250kW)	- €	0,0%	- €	0,0%	-	245.000 €	15,7%	-
Cargador	- €	0,0%	120.000 €	6,5%	-	120.000 €	7,7%	-
Combustible / energía	2.350.000 €	72,3%	536.550 €	28,9%	0,25	- €	0,0%	-
Cambio aceite	100.000 €	3,1%	- €	0,0%	-	- €	0,0%	-
Neumáticos	150.000 €	4,6%	150.000 €	8,1%	1,01	150.000 €	9,6%	1,01
Otros Mantenimiento	400.000 €	12,3%	150.000 €	8,1%	0,38	150.000 €	9,6%	0,38
Emissiones CO2 (ton/año)	883,15		171,68		0,19	0		0
TOTAL	3.250.000,00 €	100,0%	1.826.550,00 €	100,0%	0,57	1.565.000,00 €	100,0%	0,48
Coste por litro	38,72 €		24,22 €		0,63	20,42 €		0,53



Anexos digitales

En la versión informática se entregarán alfabéticamente las hojas de características nombradas siguiendo la siguiente forma:

DISPOSITIVO _NÚMERO (si hay más de 1)___ MARCA _ MODELO

- Batería__SinoPoly_125AH
- Cargador_1__UPWallabox_Tipo232Amp
- Cargador_2__eStation_22CE32MF7D
- Controlador__Schneider_Altivar 71
- ConversorACDC__WEG_CTW04
- ConversorDCDC__Newmar_361235ISP
- GestiónTemperatura__Hybac_D4
- MotorEléctrico__Siemens_HighTorque1FW44011HE801AA0
- MotorTérmico__Deutz_BF6M1013C
- PanelSolar__IUSASOL_PV01245260

Asimismo se incluyen los reportes de Generación Eléctrica Fotovoltaica del Ministerio de Energía del Gobierno de Chile, nombrados como:

- AMB-Paneles Solares- 15m techo
- AMB-Paneles Solares- 400MWaño-1500m-250kWh