



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería eléctrica

Estudio energético de la línea del tranvía de
Zaragoza para conversión a carga inalámbrica

Autor:

Alfonso Borbón Llorente

Director:

Juan Luis Villa Gazulla

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2016



DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

D./ **Alfonso Borbón Llorente**, con nº de DNI **73016848-J** en aplicación de lo dispuesto en el art. 14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza, Declaro que el presente **Trabajo de Fin de Grado** en **Ingeniería Eléctrica**, con Título del Trabajo

Estudio energético de la línea del tranvía de Zaragoza para conversión a carga inalámbrica

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado ninguna fuente sin ser debidamente citada.

Zaragoza, 24 Noviembre 2016

Fdo: Alfonso Borbón Llorente

Resumen del trabajo:

Estudio energético de la línea del tranvía de Zaragoza para conversión a carga inalámbrica

El presente trabajo fin de grado trata sobre el estudio energético del actual funcionamiento del tranvía de Zaragoza para su conversión a carga inalámbrica.

El objetivo es analizar el consumo energético total del tranvía y su solución técnica mediante carga inductiva en las paradas. También se han analizado las ventajas que contiene la carga inductiva y las cargas parciales en las paradas.

Para llevar a cabo este estudio ha sido necesario realizar mediciones en campo para conocer los tiempos y velocidades del tranvía. Con la ayuda del programa Matlab se ha realizado un simulador de un vehículo eléctrico, en el que se han implementado las ecuaciones dinámicas. Por medio de este simulador ha sido posible conocer el consumo del tranvía, para dimensionar sus cargadores.

Índice

1. Introducción.....	-7-
1.1. Concepto de carga inductiva.....	-7-
1.2. Ventajas de la carga inductiva.....	-7-
1.3. Desventajas de la carga inductiva	-8-
2. Toma de datos.....	-8-
2.1. Datos del tranvía	-8-
2.2. Datos del recorrido del tranvía	-8-
2.2.1 Curva de velocidades	-9-
2.2.2 Perfil del terreno	-9-
2.3. Tiempos en paradas	-10-
3. Simulación del tranvía	-11-
3.1. Introducción de parámetros del tranvía.....	-11-
3.2 Ecuaciones dinámicas de un vehículo eléctrico.....	-12-
3.3 Simulador	-13-
4. Cargador inductivo.....	-15-
5. Dimensionamiento de las baterías	-17-
6. Diseño de cargador inalámbrico de 140 kW	-20-
6.1. Introducción	-20-
6.2 Datos de partida	-21-
6.3 Desarrollo teórico	-22-
7. Conclusión	-26-
8. Bibliografía	-27-

1. Introducción:

En este apartado trataremos de dar una breve explicación a cerca del concepto de carga inductiva en vehículos eléctricos, así como de analizar brevemente sus ventajas y desventajas respecto a la carga conductiva.

1.1 Concepto de carga inductiva:

La carga inductiva en los vehículos eléctricos, es un sistema formado por dos bobinas eléctricamente aisladas y acopladas magnéticamente a través del aire, que son capaces de transferir potencia con una elevada eficiencia. No se requiere la existencia de conexión física entre el vehículo y la fuente de alimentación o punto de recarga. Un emisor situado en el suelo es capaz de transferir energía a un receptor que se encuentra a varios decímetros de distancia, integrado en la carrocería del vehículo. El receptor del vehículo se encarga posteriormente de transferir esa energía a una batería, de la que se alimentará el motor eléctrico.



Imagen 1 : Carga inductiva en vehículo eléctrico[10]

1.2 Ventajas de la carga inductiva:

- Es un sistema sencillo y cómodo para el usuario puesto que al no tener que conectar físicamente ningún cable, no es necesario bajarse del vehículo durante la carga.
- El sistema es seguro contra vandalismo porque todos los dispositivos se encapsulan en el vehículo y en el suelo.
- Es más segura que la carga conductiva, ya que en la inductiva no existen conductores (cables).
- Este sistema funciona en una gama de entornos adversos, incluyendo temperaturas extremas, sumergido en agua o cubierta de hielo y nieve.
- No produce ningún impacto visual negativo en el paisaje urbano al estar todos los dispositivos ocultos en el pavimento. Esta ventaja es importante en el caso de trenes y tranvías urbanos porque permiten la eliminación de cables aéreos.
- Posibilidad de carga con el vehículo en movimiento.

1.3 Desventajas de la carga inductiva:

- Grado de libertad de posicionamiento restringido: carriles dedicados y sistemas electromecánicos de posicionamiento
- Necesidad de apantallamiento debido a las altas frecuencias a las que trabajan este tipo de cargadores
- Menor eficiencia, debido a que para transferir la potencia utilizamos el aire y no un cable, como en el caso de la carga conductiva

2. Toma de datos:

En este apartado, se dará una explicación de los datos recopilados. Los datos han sido tomados en campo a través de distintas herramientas, sacados a través de catálogos de fabricantes y calculados.

2.1 Datos del tranvía:

Estos son los datos que aparecen en las características técnicas del tranvía URBOS 3 (CAF), que es el modelo que corresponde a la línea 1 del tranvía de Zaragoza. [1]

- Peso: 45450 kg
- Radio de la rueda: 0,59 m
- Coeficiente de rozamiento rueda-asfalto: 0.005
- Anchura: 2,65 m
- Altura: 3,2 m
- Área frontal al aire: 8,4 m²
- Coeficiente aerodinámico Cx: 1,8
- Relación de reducción rueda-motor G : 1,7

2.2 Datos del recorrido del tranvía:

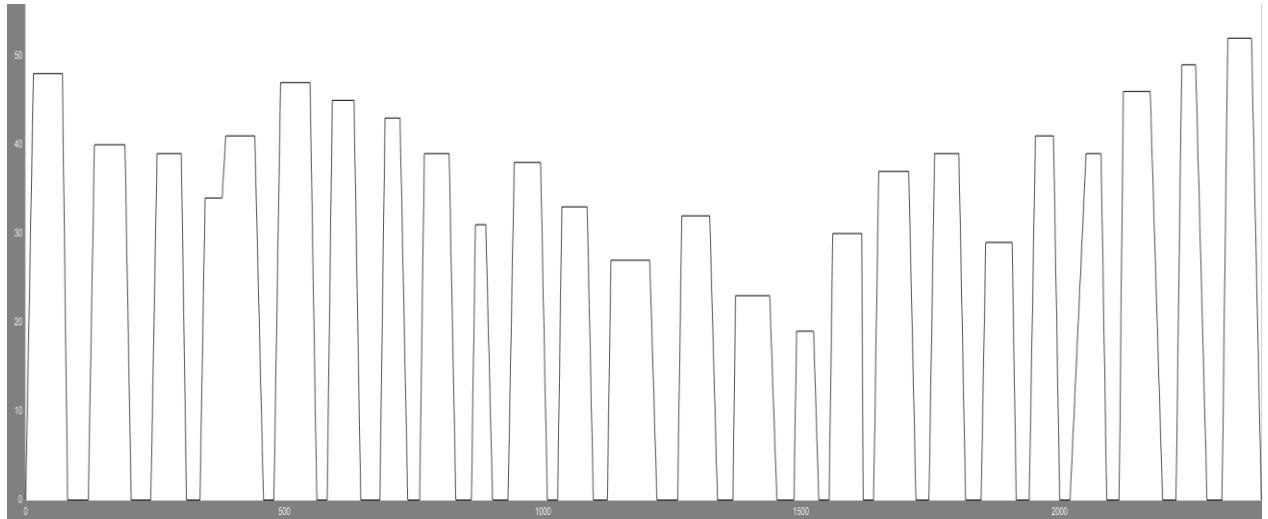
Estos datos se han tomado a través de la aplicación (MyTracks), en la cual aparecen los datos del recorrido desde la parada "Mago de oz" (Valdespartera) hasta "Avenida de la academia" (Parque Goya). Los datos se utilizarán para tener la curva de "velocidad-tiempo", la de "perfil del terreno-tiempo" y el tiempo que dispondremos en cada parada y al final del recorrido, para el diseño de los cargadores.

- Distancia total recorrida: 12.9 Km
- Tiempo total: 39'57''
- Tiempo en movimiento: 31'27''
- Velocidad media: 19.45 Km/h
- Velocidad máxima: 53.37 Km/h
- Tiempo de parada al final de línea: 6-8 minutos

2.2.1 Gráfica velocidad-tiempo:

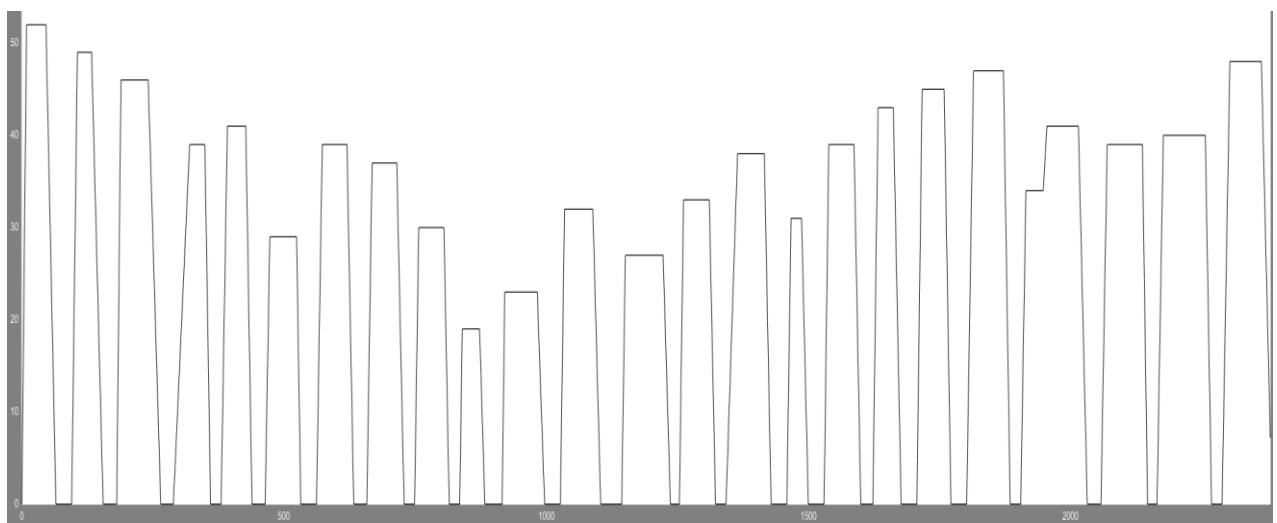
En el "eje x" aparece el tiempo a lo largo del recorrido en segundos y en el "eje y" aparece la velocidad en kilómetros/hora. Se puede observar en el eje de tiempos, las distintas paradas que realiza el tranvía a lo largo del recorrido (24 paradas), que oscilan entre 20 y 50 segundos aproximadamente. En el eje de velocidades se puede observar las aceleraciones, velocidad constante y frenados del tranvía.

-Gráfica v / t: Valdespartera - Parque Goya:



Gráfica 1. Velocidad / tiempo Valdespartera - Parque Goya

-Gráfica v / t: Parque Goya- Valdespartera:



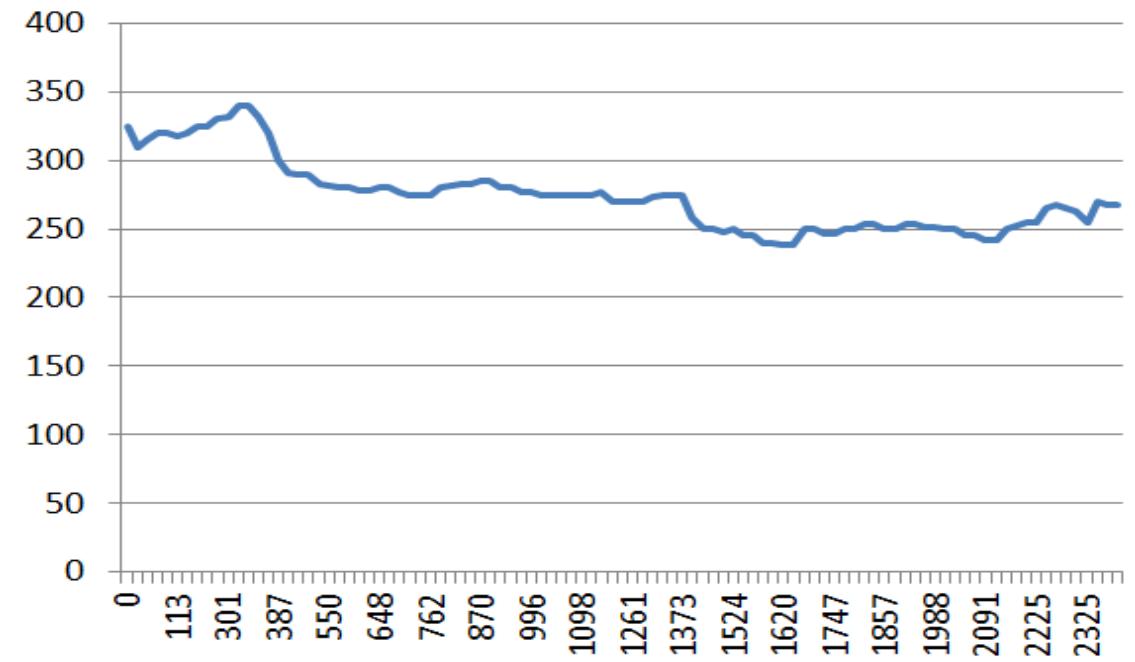
Gráfica 2. Velocidad / tiempo Parque Goya- Valdespartera

2.2.2 Perfil del terreno:

Aquí se puede apreciar el desnivel del terreno conforme avanza el tranvía a lo largo del ciclo. En el "eje y" está la altura del terreno en metros y en el "eje x" el tiempo en segundos. Esta

gráfica habrá que tenerla en cuenta a la hora de simular el tranvía ya que depende del desnivel del terreno, el tranvía consumirá más o menos.

-Perfil del terreno Valdespartera - Parque Goya:



Gráfica 3. Altitud del terreno en el tiempo durante el recorrido

2.3 Tiempos en paradas:

Estos tiempos de parada, serán necesarios para saber el tiempo que necesitaría cada cargador a la hora de diseñarlos. Los tiempos están tomados en un tranvía que circulaba un día entre semana sobre las 11 de la mañana, así que no es una hora con excesivo tráfico de personas. Esto será mejor a la hora de diseñar los cargadores, porque irán en función del tiempo de parada para poder cargar la potencia necesaria. Es decir, para diseñarlos habrá que tener en cuenta unos tiempos de parada bajos, para que nunca nos quedemos sin carga en las baterías debido al poco tiempo de recarga en las paradas.

PARADA	TIEMPO DE PARADA	PARADA	TIEMPO DE PARADA
Parada 1- Mago de Oz	20 "	Parada 14- Cesar Augusto	30"
Parada 2- Un americ. En Paris	20"	Parada 15- Plaza del Pilar	38"
Parada 3- Ventana indiscreta	27"	Parada 16- Chimenea	25"
Parada 4- Los olvidados	23"	Parada 17-María Montessori	23"
Parada 5- Argualas	24"	Parada 18- León Felipe	25"
Parada 6- Casablanca	20"	Parada 19- Pablo Neruda	31"
Parada 7- Romareda	37"	Parada 20- Adolfo Aznar	25"
Parada 8- Emperador Carlos V	23"	Parada 21- García Abril	22"
Parada 9- Plaza San Fco.	30"	Parada 22- Campus Rio Ebro	28"
Parada 10- Fdo el católico	30"	Parada 23- Juslibol	17"
Parada 11- Gran vía	27"	Parada 24- Parque Goya	26"
Parada 12- Plaza Aragón	32"	Parada 25- Av. De la academia	6'-8'
Parada 13- Plaza España	40"		

Tabla 1. Tiempos en las paradas del tranvía de Zaragoza

3. SIMULACIÓN DEL TRANVÍA

A través del programa "Matlab-Simulink R2014b" se va a simular un modelo dinámico del tranvía de Zaragoza. Para el cual será necesario introducir los parámetros del propio tranvía, representar las ecuaciones dinámicas de un vehículo eléctrico a través de "Simulink", introducir las curvas de velocidades y la del perfil del terreno.

Con este modelo lograremos saber el consumo en kWh, que será necesario para poder dimensionar los cargadores y el diseño de las baterías. También se podrá saber la cantidad de energía que va consumiendo parada a parada.

3.1 Introducción de parámetros del tranvía:

Se introducen en "Matlab" los parámetros necesarios para la simulación del tranvía. Estos parámetros se han obtenido a través de la ficha técnica del tranvía de Zaragoza [1].

```

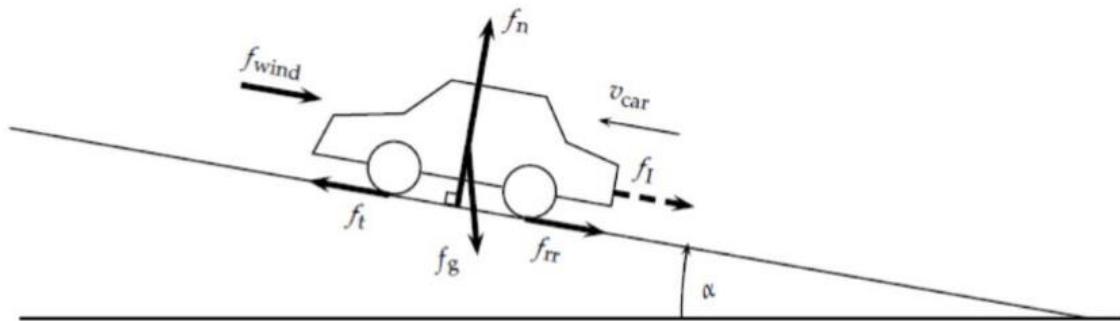
m=45450;%kg
roz=0.005;%rozamiento
g=9.81;%gravedad
dens=1.25;%densidad del aire (kg/m3)
area=8.4;%area frontal enfrentada al aire 2.65*3.2 en m2
aerod=1.8;%coef aerodinámico
radio_rueda=0.59;%radio de la rueda en metros
G=1.7;%relación de velocidad rueda motor
vwind=0;%velocidad del viento en m/s

```

Entrada de parámetros del tranvía en Matlab

3.2 Ecuaciones dinámicas de un vehículo eléctrico:

Para obtener el modelo dinámico de un vehículo eléctrico, hay que saber cuáles son las ecuaciones en las que se basa. Estas ecuaciones son las que luego se convertirán en "Simulink" para la simulación del tranvía.



$$F_T = F_{\text{rozamiento}} + F_{\text{aerodinámica}} + F_{\text{ascensión}} + F_{\text{aceler. lineal}} + F_{\text{acele. angular}} = F_{rr} + F_{ad} + F_{as} + F_{acl} + F_{aca}$$

Donde:

Fuerza de rozamiento: $F_{rr} = Cr * m * g$

$$Cr = 0.015 \text{ (coeficiente de rozamiento estimado)}$$

$$m = 2000 \text{ (masa del vehículo en kg)}$$

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2 \text{ (aceleración de la gravedad)}$$

en realidad, el coeficiente de rozamiento depende de la velocidad de acuerdo a la ecuación:

Fuerza aerodinámica: $F_{ad} = 0.5 * \rho * A * Cd * (V_{veh} + V_{wind})^2$

$$\rho = 1.25 \text{ kg/m}^2 \text{ (densidad del aire)}$$

$$A = \text{área frontal en m}^2$$

$C_d = 0.3$ (coeficiente aerodinámico)

V_{veh} = Velocidad del vehículo en m/s

V_{wind} = Velocidad viento en m/s (+ si dirección contraria al vehículo; - si misma dirección)

Fuerza de ascensión: $F_{as} = m * g * \sin \alpha$ solo si $V_{veh} > 0$

α = Ángulo de la carretera en grados

Fuerza de aceleración lineal: $F_{acl} = m * a$

a = aceleración del vehículo = dV_{veh}/dt

Fuerza de aceleración angular: $F_{aca} = I * a * G^2/r^2$

I = momento de inercia de las masas giratorias en movimiento

G = Relación de velocidades motor-rueda

r = radio de la rueda

Para el cálculo de la fuerza de aceleración angular es necesario conocer en profundidad la mecánica del vehículo, por ello, se utiliza la aproximación de considerar la fuerza de aceleración angular como el 5 % de la fuerza de aceleración lineal de acuerdo a "Electric Vehicle Technology explained". [3]

$F_{aca} = 0.05 * F_{acl}$

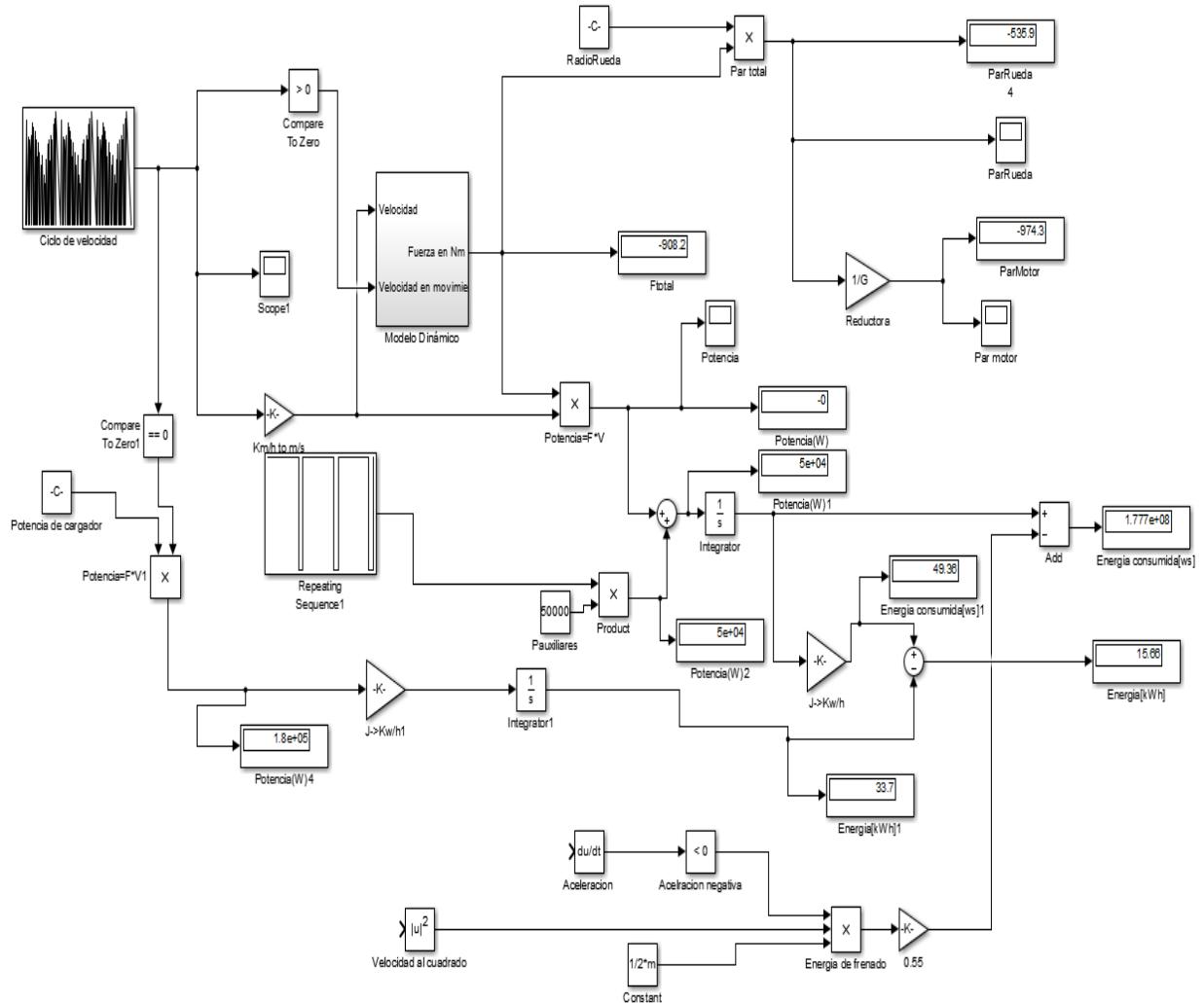
3.3 Simulador:

Una vez que se conocen las ecuaciones dinámicas del vehículo eléctrico, tenemos que transformarlas en "Simulink". Para lo cual la entrada será el ciclo de velocidad que se ha comentado anteriormente, es decir, la velocidad del tranvía en función del tiempo. También otras entradas, serán los parámetros del tranvía y el perfil del terreno, vistos anteriormente. Habrá que tener en cuenta para el estudio energético, la potencia que consume el tranvía de los elementos auxiliares (aire acondicionado, luces, mecanismos de las puertas, displays,...). Toda esta potencia tendrá un valor de unos 45 kW, que será otro parámetro de entrada que se introducirá en el programa.[4]

A través de los distintos bloques de "Simulink" se convertirán las entradas, para obtener distintas salidas como: la fuerza en las ruedas, el par motor en ruedas, **energía consumida en kWh**, la potencia eléctrica necesaria y la velocidad de giro del motor en rpm.

Lo que interesa de estas salidas, es la energía consumida en kWh, puesto que se trata de un estudio de viabilidad energética y será el dato principal a la hora de diseñar los demás campos (baterías, bobinas) que faltan.

Modelo dinámico de un vehículo para determinación del consumo energético:



Modelo en Matlab de un vehículo eléctrico

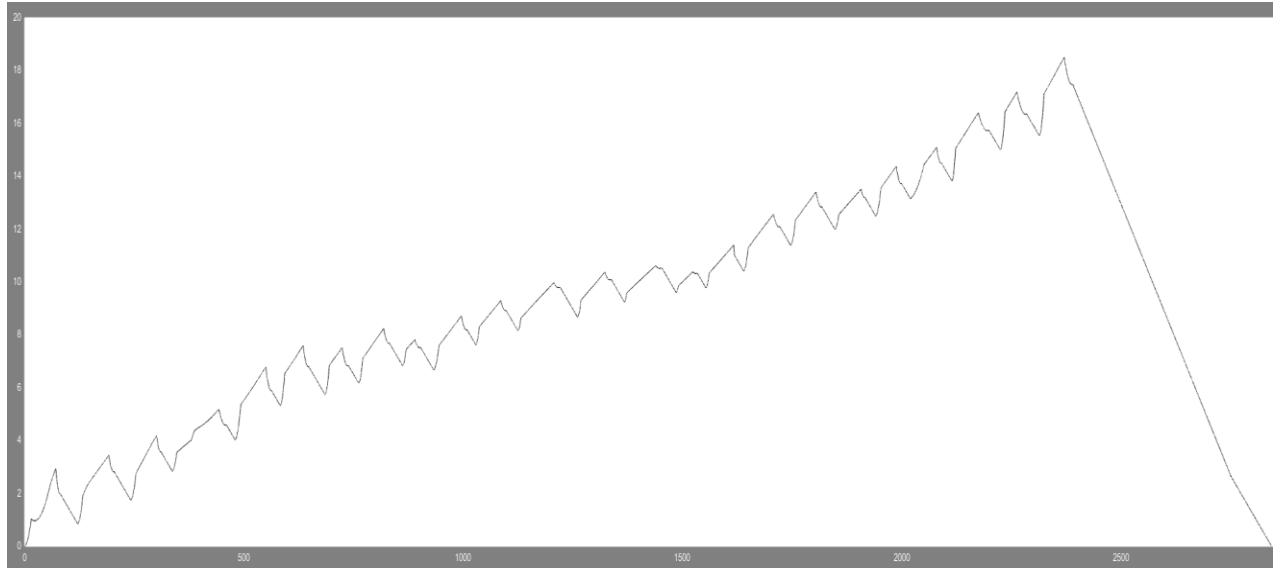
Una vez introducidas las distintas entradas comentadas antes, los resultados son los siguientes:

-Consumo IDA(Valdespartera-Av. de la academía): **46,52 kWh**

-Consumo VUELTA(Av. de la academia- Valdespartera): **46,56 kWh**

-CONSUMO TOTAL : 93,08 kWh

Por medio del simulador se puede apreciar la energía que se va consumiendo y recargando durante el recorrido del tranvía, en el "eje x" está el tiempo del recorrido en segundos y en el "eje y" la energía que se va consumiendo y cargando en kWh.



Gráfica 4. Energía / tiempo

4. CARGADOR INDUCTIVO

Necesitaremos cargar 46,52 kWh al final de cada recorrido. Por lo tanto, habrá que mirar todas las posibilidades en función de la potencia de los cargadores y del tiempo de parada al final, ya que es el único que puede oscilar entre 6 y 8 minutos.

La opción aparentemente más sencilla, es cargar toda la potencia en el final del recorrido con la ayuda de un único cargador. Para ello necesitaríamos un cargador de unos 450 kW. Pero, con este cargador de tanta potencia, superaríamos el índice de carga de las baterías:

$$\text{Intensidad de carga} = \frac{450 \text{ kW}}{750V} = 600 \text{ A}$$

El índice de carga determina la máxima intensidad que se puede suministrar a la batería mientras se está cargando:

$$\text{Capacidad de carga nominal} = \frac{46,52 \text{ kWh}}{750V} = 62 \text{ Ah} ,$$

$$\text{Capacidad de carga nominal} = \mathbf{62 \text{ Ah} = C}$$

Las baterías serán de Ion - Litio, por lo que soportan un índice de carga de 3C. Es decir, nuestro cargador no podrá superar los 186 A ya que se deteriorará la batería.

Con este cargador superaríamos ampliamente la máxima corriente de carga de las baterías por lo que descartamos esta opción. Otro inconveniente sería que las cargas completas de baterías

disminuyen considerablemente el ciclo de vida de las baterías, como podemos apreciar en esta tabla:

Depth of discharge	Discharge cycles
100% DoD	300–500
50% DoD	1,200–1,500
25% DoD	2,000–2,500
10% DoD	3,750–4,700

Tabla 1. Ciclos de vida de las baterías en función de la profundidad de descarga (DoD)[5]

Se puede apreciar que para aumentar la vida útil de las baterías, lo más recomendable es utilizar cargas parciales. Es decir, cuanto más tiempo se deje pasar en recargar las baterías durante el recorrido, peor efecto tendrá sobre las baterías.

En vista a estas dos restricciones, se deberá buscar un tipo de cargador que cumpla el índice de carga de las baterías de Ion - Litio (3C) y utilizar cargas parciales a lo largo del recorrido.

Afortunadamente, una restricción va unida a la otra. Es decir, al tener que cumplir el índice de carga de las baterías, tendremos que poner un cargador de potencia más baja. Como la potencia del cargador baja considerablemente, con un cargador al final de la línea no cubriremos el consumo del tranvía, por lo que habrá que utilizar las paradas para cargar. Al ir cargando las baterías parcialmente, no tendremos tanta profundidad de descarga (DoD) y conseguiremos un incremento de ciclos de vida de las baterías.

El tranvía realiza 23 paradas que oscilan entre 20 y 50 segundos, y luego una al final de la línea que oscila entre 6 y 8 minutos. Partiendo de estos tiempos, habrá que buscar las potencias de los cargadores que permitan cubrir el consumo y cumplir las restricciones comentadas anteriormente. Para ello, utilizaremos el simulador realizado previamente (Apartado 3.3), para ir probando a introducir la potencia del cargador y que el consumo salga 0.

Las posibilidades de cargadores que se han contemplado, en función del tiempo del final del recorrido, son las siguientes:

- Si la parada al final fuera de 6 minutos:
 - Necesitaría todo cargadores de 180 kW, es decir, 23 a lo largo del recorrido y otro al final.

$$\text{Intensidad del cargador} = \frac{180 \text{ kW}}{750V} = 240 \text{ A} > 186 \text{ A}$$

NO CUMPLE

- Necesitaría todo cargadores de 100 kW a lo largo del recorrido y uno de 300 kW al final de la línea.

$$\text{Intensidad del cargador} = \frac{300 \text{ kW}}{750V} = 400 \text{ A} > 186 \text{ A}$$

NO CUMPLE

- Si la parada al final fuera de 8 minutos:
 - Necesitaría todo cargadores de 140 kW, es decir, 23 a lo largo del recorrido y otro al final.

$$\text{Intensidad del cargador} = \frac{140 \text{ kW}}{750V} = 186 \text{ A} < = 186 \text{ A}$$

CUMPLE

- Necesitaría cargadores de 75 kW a lo largo del recorrido, y uno de 250 kW al final de la línea.

$$\text{Intensidad del cargador} = \frac{250 \text{ kW}}{750V} = 330 \text{ A} > 186 \text{ A}$$

NO CUMPLE

Como se puede apreciar la única opción posible de las probadas, es la de instalar en cada parada y en el final del recorrido, cargadores de **140 kW**. También el tiempo de parada al final del recorrido deberá ser de 8 minutos, para poder cubrir todo el consumo del tranvía.

En el apartado 6 se procederá al diseño de los cargadores de 140 kW.

5. DIMENSIONAMIENTO DE LAS BATERIAS

En este apartado se calculará el peso de las baterías y se diseñaran las celdas de las que estarán compuestas. Las baterías serán de Ion-Litio, ya que actualmente son las baterías que mejor densidad energética tienen.

La batería estará compuesta por un buen número de celdas, que estarán conectadas en paralelo y serie, formando una matriz. Para determinar el peso y el número de celdas necesaria de baterías para cubrir el consumo del tranvía, se han sacado las características técnicas de una celda de un catálogo de un fabricante de baterías (BYD).

1. Prismatic Lithium-ion Battery Specifications

Width x Height	Max Thichness (mm)	Model No.	Nominal Voltage (V)	Nominal Capacity * (mAh)		Bare Cell Dimensions(mm)			Temperature(°C)			Weight Approx(g)	Max Impedance(mΩ)
				Typ	Min	Thickness	Width	Height	Charge	Discharge	Storage		
30x39	6.4	LP653039ARU	3.7	900	880	6.4	29.9	39	0-45	-80	-65	17	70

Imagen 3. Características de una celda fabricada por BYD[6]

La cantidad de energía que se necesita almacenar es de 46,52 kWh, pero si se tiene en cuenta que las baterías no se pueden descargar más de un 80%, habrá que aumentar la cantidad de energía que se puede almacenar:

$$C = \frac{46,52 \text{ kWh}}{80\%} = 58,15 \text{ kWh}$$

Tensión alimentación de las baterías: 750 V

Tensión en la celda: 3,7 V

$$\text{Número de celdas en serie} = \frac{750 \text{ V}}{3,7 \text{ V}} = 202,7 ; \text{ redondeando } \mathbf{203 \text{ celdas}}$$

Se necesitan 203 celdas en serie que vienen determinadas por la tensión de alimentación de las baterías y la tensión nominal de las celdas que determina el fabricante. Falta saber el número de celdas que se tienen que conectar en series, determinadas por la intensidad de las baterías:

$$\text{Capacidad baterías: } \frac{58,15 \text{ kWh}}{750 \text{ V}} = 77,53 \text{ Ah}$$

Capacidad celdas: 0,9 A

$$\text{Número de celdas en paralelo} = \frac{77,53 \text{ Ah}}{0,9 \text{ Ah}} = 86,15 ; \text{ redondeando } \mathbf{87 \text{ celdas}}$$

Las baterías estarán compuestas de 203 celdas en serie y 87 en paralelo, por lo que el número total de celdas que se necesitarán :

$$\text{Número total de celdas: } 87 * 203 = 17.661 \text{ celdas}$$

Por último se calcula el peso de las baterías, es decir, se suma el peso de las 17.661 celdas:

Peso de la celda: 17 gramos

Peso total: 0,017 Kg * 17661 celdas = **300,2 Kg**

También podemos hallar la densidad energética de las celdas de Ion - Litio, ya que hoy en día este es uno de los parámetros más restrictivos en la movilidad eléctrica. Cuanta mayor sea la densidad energética de las celdas, menor peso y espacio ocupará.

$$\text{Densidad energética} = \frac{\text{Energía almacenada}}{\text{Peso de baterías}} = \frac{58,15 \text{ kWh}}{300,2 \text{ Kg}} = \mathbf{193,7 \text{ Wh / Kg}}$$

Se necesitan 300 Kg de baterías para cubrir el consumo del recorrido del tranvía. Este peso no es tan elevado, debido a que estamos utilizando el método de recarga de las baterías mediante cargas parciales. Vamos a hacer una comparativa si en vez de cargando en las paradas hiciéramos un ciclo completo de ida y vuelta con solo una carga:

$$C = \frac{93,08 \text{ kWh}}{80\%} = 116,35 \text{ kWh}$$

Las celdas en serie serán las mismas que en el caso anterior, ya que la tensión no varía: **203 en serie.**

En cuanto a las celdas en paralelo, como tendremos diferente energía almacenada :

$$\text{Capacidad baterías: } \frac{116,35 \text{ kWh}}{750 \text{ V}} = 155,13 \text{ Ah}$$

Capacidad celdas: 0,9 A

$$\text{Número de celdas en paralelo} = \frac{155,13 \text{ Ah}}{0,9 \text{ Ah}} = 172,37 ; \text{redondeando } \mathbf{173 \text{ celdas.}}$$

En este caso las baterías estarán compuestas de 203 celdas en serie y 173 en paralelo, por lo que el número total de celdas que se necesitarán :

$$\text{Número total de celdas: } 173 * 203 = 35.119 \text{ celdas}$$

Y el peso de las baterías sería:

$$\text{Peso total: } 0,017 \text{ Kg} * 35.119 \text{ celdas} = \mathbf{597 \text{ Kg}}$$

Con este método de carga, sale aproximadamente el doble de peso de baterías y por tanto de espacio. Esto puede suponer un gran inconveniente a la hora del diseño del tranvía.

6. DISEÑO CARGADOR DE BATERIAS INALÁMBRICO DE 140 kW

6.1 Introducción:

En el último apartado, se verá el diseño de un cargador de baterías inalámbrico de 140 kW, que es el que se ha calculado anteriormente. Para ello, se determinará el dimensionamiento del sistema de acoplamiento inductivo con tipología S-S y se comprobará su funcionamiento a través de "Matlab".

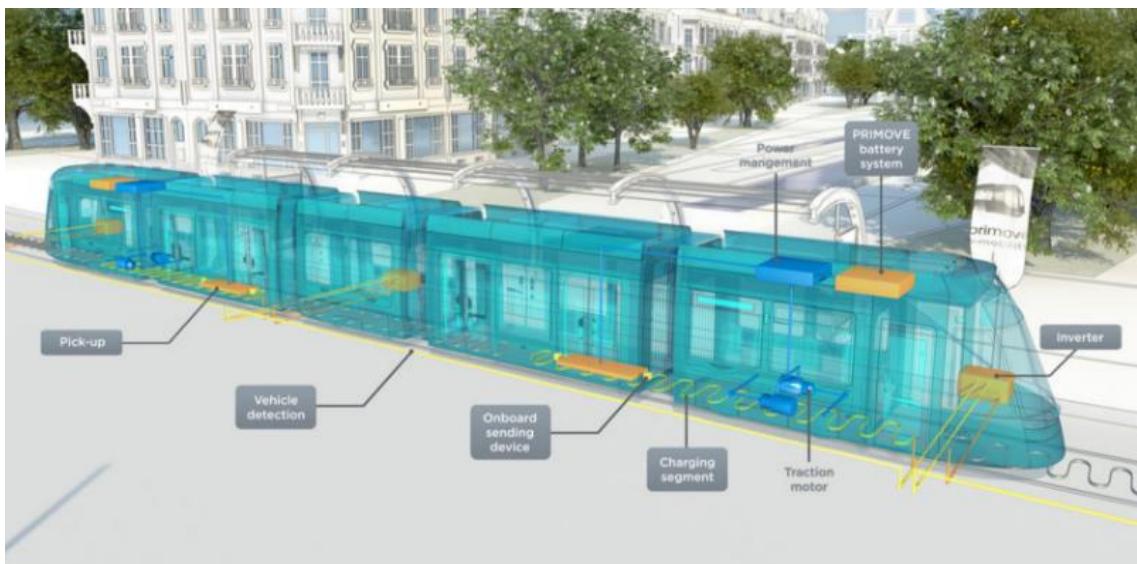


Imagen 4 y 5. Ejemplos de carga inductiva en tranvías[7]

El esquema del circuito a implementar es el siguiente:

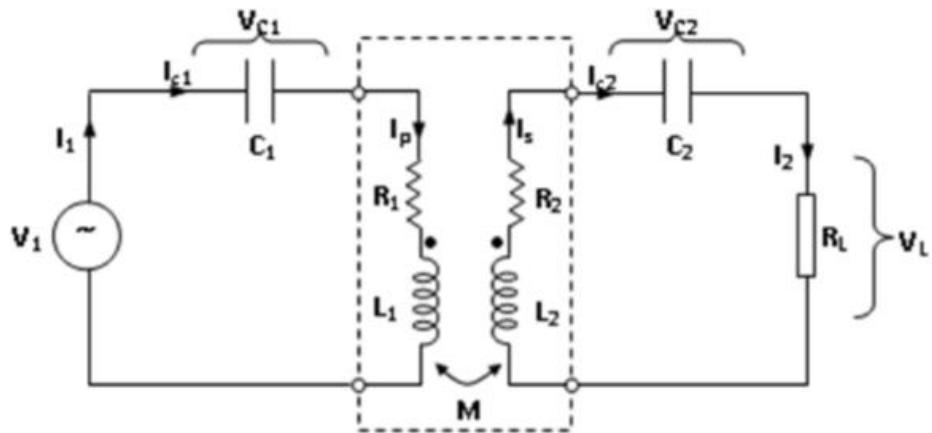


Imagen 4. Circuito cargador inductivo [8]

6.2 Datos de partida:

Se considera un sistema WPT formado por dos bobinas rectangulares iguales de dimensiones $1 \times 0,5$ m, separadas $h = 0,2$ m.

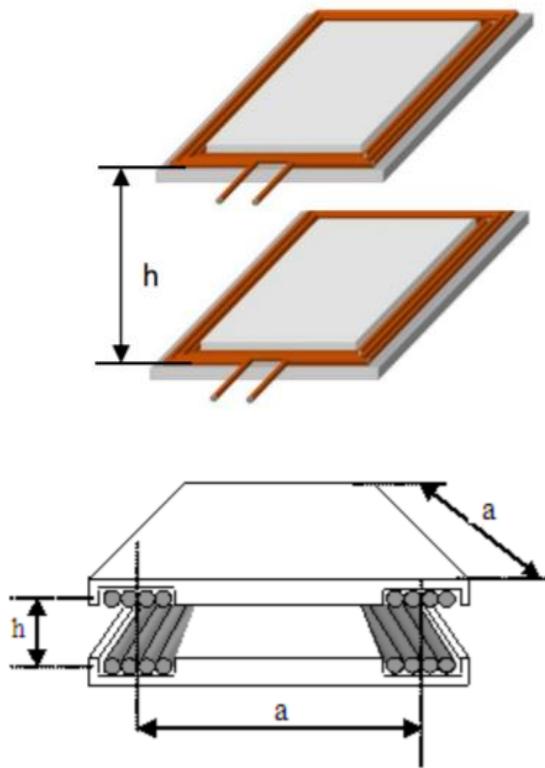


Imagen 5 y 6. Bobinas para carga inductiva [8]

El diseño del cargador:

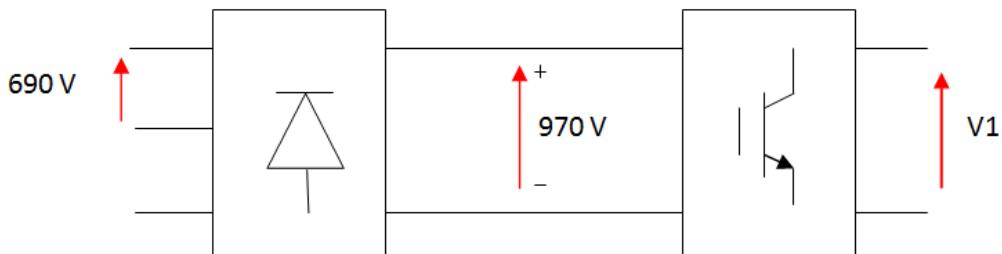


Imagen 7. Conversión tensión de la red para cargador inductivo

$$V1 = 2 * \sqrt{2} * \frac{Vcc}{\pi} = 873 \text{ V (onda senoidal)}$$

Tensión del bus de continua: $Vcc=970 \text{ V}$

Máxima frecuencia de trabajo: $f= 25000 \text{ Hz}$

Potencia que se desea transferir: $P2= 140.000 \text{ W}$

Tensión de alimentación de las baterías: $V2= 750 \text{ V}$

Máxima densidad de corriente en primario: $\delta1= 2 \text{ A/ mm}^2$

Máxima densidad de corriente en secundario : $\delta2= 2 \text{ A/ mm}^2$

6.3 Desarrollo teórico

La topología S-S es la más fácil de diseñar, puesto que las corrientes y secciones de los conductores de ambas bobinas viene determinado por la potencia y tensiones de primario y secundario y las máximas densidades de corriente admitidas en ambos devanados:

$$I1 = \frac{P2}{V1} = \frac{140000}{873} = 160,73 \text{ A}$$

$$I2 = \frac{P2}{V2} = \frac{140000}{750} = 187 \text{ A}$$

$$S1 = \frac{I1}{\delta1} = \frac{160,7}{2} = 80,2 \text{ mm}^2$$

$$S2 = \frac{I2}{\delta2} = \frac{187}{2} = 93 \text{ mm}^2$$

Resistencia de carga equivalente: $R_L = \frac{V_2^2}{P_2} = \frac{750^2}{140000} = 4,02 \Omega$

La potencia activa máxima que se desea transferir será el producto de la potencia aparente máxima por el factor de potencia de la corriente por el secundario:

$$P_{2Max} = S_{2Max} \cos \varphi_2$$

Al trabajar en resonancia en el circuito de secundario, la corriente estará en fase la tensión ($\cos \varphi = 1$) y la máxima potencia activa transferida vendrá dada por :

$$P_{2Max} = \frac{\omega M^2 I_p^2}{L_2} q_s$$

Donde:

ω = Frecuencia de trabajo.

q_s = Factor de calidad del secundario.

M = Coeficiente de inducción mutua entre bobinas.

I_p = Corriente por el devanado primario.

L_2 = Coeficiente de autoinducción del devanado secundario.

$$P_2 = \frac{\omega M^2 I_p^2}{L_2} q_s \quad \text{Donde } q_s = \frac{\omega L_2}{R_L}$$

De esta expresión obtenemos el coeficiente de inducción mutua necesario "M" con los valores que hemos calculado anteriormente:

$$M = 2,98 * 10^{-5} \text{ H}$$

y mediante la expresión teórica de este coeficiente en geometría rectangular [9]:

$$M = \frac{\mu_0}{\pi} N_1 N_2 \left[a_1 \ln \frac{(a_1 + (\sqrt{h^2 + a_1^2}))(\sqrt{h^2 + b_1^2})}{(a_1 + \sqrt{h^2 + a_1^2 + b_1^2}) \cdot h} + b_1 \ln \frac{(b_1 + (\sqrt{h^2 + a_1^2}))(\sqrt{h^2 + b_1^2})}{(b_1 + \sqrt{h^2 + a_1^2 + b_1^2}) \cdot h} \right] \\ + \frac{\mu_0}{\pi} N_1 N_2 \left[2(h - \sqrt{h^2 + a_1^2} - \sqrt{h^2 + b_1^2} + \sqrt{h^2 + a_1^2 + b_1^2}) \right]$$

Donde:

Lado más largo del rectángulo que forma la bobina: $a = 1\text{ m.}$

Lado más pequeño del rectángulo que forma la bobina: $b = 0,5\text{ m.}$

Distancia entre bobinas: $h = 0,2\text{ m.}$

Número de espiras en el primario: N_1

Número de espiras en el secundario: N_2

Despejamos la relación entre espiras **$N_1 \cdot N_2 = 78,67$**

Tenemos una ecuación con dos incógnitas, es decir, existen infinidad de posibilidades; aquí habrá que aplicar un proceso de selección de N_1 y N_2 iterativo que cumpla la ecuación anterior y además haga el sistema estable, es decir, que $qp > qs$, además cuanto más cerca se encuentren estos dos valores, menor cantidad de cobre será necesaria y por tanto mayor eficiencia.

Donde:

qp : factor de calidad del primario

Para empezar a iterar partimos de considerar ambos devanados con el mismo número de espiras **$N_1 = N_2 = 9$**

Se calculan los coeficientes de autoinducción L_1 y L_2 con la expresión [9]:

$$L = 4 \cdot 10^{-7} N^2 \left[(a + b) \ln \left(\frac{4ab}{d} \right) - a \ln(a + \sqrt{a^2 + b^2}) - b \ln(b + \sqrt{a^2 + b^2}) + 2\sqrt{a^2 + b^2} + (d - 2(a + b)) \right]$$

Siendo d el diámetro equivalente de todas las espiras juntas, es decir:

$$d = 2 \sqrt{\frac{N \cdot S}{\pi}}$$

donde $N = 9$ espiras ; $S = a \cdot b = 1 \cdot 0,5 = 0,5 \text{ m}^2$, por lo que $d = 2,39 \text{ m}$

Y los factores de calidad de primario y secundario de acuerdo a las expresiones para topología S-S:

$$q_p = \frac{L_1 \cdot R_L}{\omega \cdot M^2} \quad q_s = \frac{\omega L_2}{R_L}$$

Se calculan los factores de calidad para ver si el diseño cumple la condición para que el sistema sea estable: $q_p > q_s$

Con los valores calculados para que el sistema tenga el mismo número de espiras ($N = 9$) :

$q_p = 0,85$ y $q_s = 1,15$, por lo que para esta combinación de espiras el sistema es **inestable**.

Habrá que probar para otra combinación de espiras, por lo general se suele cumplir que $N_1 > N_2$, así que se incrementan las espiras del primario y se reducen las del secundario. Los cálculos se han realizado a través de una tabla Excel, para que sea más rápido hacer la iteración.

La combinación adecuada de espiras:

$$N_1 = 10 \text{ espiras} \quad L_1 = 0,000036 \text{ H} \quad S_1 = 80,18 \text{ mm}^2 \quad q_p = 1,052$$

$$N_2 = 8 \text{ espiras} \quad L_2 = 2,336 \cdot 10^{-5} \text{ H} \quad S_2 = 93,33 \text{ mm}^2 \quad q_s = 0,9122$$

Se ve que esta combinación de espiras si que cumple la condición de estabilidad, por lo que ya solo falta calcular los condensadores de resonancia a la frecuencia de trabajo.

Con estos valores obtenidos, obtener los condensadores de resonancia a la frecuencia de trabajo (25 kHz) :

$$C_1 = \frac{1}{\omega^2 \cdot L_1} \quad C_2 = \frac{1}{\omega^2 \cdot L_2}$$

Sustituyendo en estas ecuaciones la frecuencia y las inductancias halladas anteriormente, los valore de los condensadores serán:

$$C_1 = 1,11 \cdot 10^{-6} \text{ F}$$

$$C_2 = 1,737 \cdot 10^{-6} \text{ F}$$

Para terminar con este apartado se recopilan los resultados en un tabla:

h	0,2 m	RL	4,017 Ω
V1	873 V	I1	160,37 A
V2	750 V	I2	186,68 A
P2	140000 W	S1	80,18 mm ²
f	25000 Hz	S2	93,33 mm ²
δ 1	2 A/mm ²	L1	3,4*10 ⁻⁵ H
δ 2	2 A/mm ²	L2	2,34*10 ⁻⁵ H
a1	1 m	Q _p	1,05
a2	1 m	Q _s	0,91
b1	0,5 m	C1	1,11*10 ⁻⁶ C
b2	0,5 m	C2	1,74*10 ⁻⁶ C
N1	10 espiras		
N2	8 espiras		

Tabla 2. Recopilación resultados cargador inductivo

7. Conclusión

Como conclusión a este estudio energético, se puede decir que se ha dado una solución energética al actual sistema de funcionamiento (catenaria) del tranvía de Zaragoza. Todo este estudio se ha llevado a cabo sin modificar el actual funcionamiento de la línea, respetando los horarios y las frecuencias de los tranvías. Se han visto las posibles soluciones con los diferentes cargadores y se ha justificado su elección. Donde se ha visto que la principal restricción es el índice de carga, que viene determinado por el poco tiempo disponible de carga y la elevada potencia del cargador.

Otro punto de vista, son las posibilidades que puede ofrecer la carga inductiva y la carga parcial de las baterías. Se ha visto que las cargas parciales en las paradas aumentan considerablemente la vida útil de las baterías. También se ha demostrado, que este tipo de cargas, permiten un ahorro en cuanto al espacio y al peso que ocupan las baterías.

Se ha diseñado un simulador en Matlab de un vehículo eléctrico, el cual permite conocer el consumo energético, par motor, par en la rueda y potencia de cualquier tipo de vehículo eléctrico en función de sus parámetros. A través de este simulador también nos permite observar la evolución de energía consumida y cargada a lo largo del tiempo y del par motor del tranvía.

Por último, se ha desarrollado el cargador inductivo de 140 kW. Se ha demostrado que con una distribución de espiras de 10 y 8, el sistema es estable.

8. Bibliografía

[1] : www.caf.net/es

[2] : *Catálogo SIEMENS motores DC*

[3] : "Electric Vehicle Technology explained" James Larminie, John Lowry ,John Wiley & Sons, Ltd

[4] : www.railway-technology.com

[5] : www.batteryuniversity.com

[6] : *Catálogo BYD batteries* www.byd.com

[7] : www.primove.bombardier.com

[8] : "Apuntes Movilidad Eléctrica" J. Sanz

[9] : "Sistemas de Transferencia de Energía para Vehículos Eléctricos mediante acoplamiento inductivo" J.L. Villa

[10] : www.unplugged-project.eu