



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**ESPECIFICACIÓN Y ANÁLISIS DE MOTORES ASÍNCRONOS PARA
TREN DE ALTA VELOCIDAD EN CHILE**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
ELECTRICISTA**

OLIVER ESTEBAN MATÍAS SWEET SAN MARTÍN

**PROFESOR GUÍA:
JORGE ROMO LÓPEZ**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
AUGUSTO LUCERO ALDAY
NELSÓN MORALES OSORIO**

**SANTIAGO DE CHILE
SEPTIEMBRE 2013**

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA
OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO
CIVIL ELECTRICISTA
POR: OLIVER SWEET SAN MARTÍN
PROF. GUÍA: JORGE ROMO LÓPEZ
FECHA: 26 AGOSTO 2013

ESPECIFICACIÓN Y ANÁLISIS DE MOTORES ASÍNCRONOS PARA TREN DE ALTA VELOCIDAD EN CHILE

El presente trabajo tiene por objetivo principal, estudiar la factibilidad de implementar un tren de alta velocidad en el país, particularmente a través de la conexión entre Santiago y Valparaíso por este medio de transporte.

En un primer paso se estudia el estado del arte actual en el mundo destacando a algunos países especializados en trenes de alta velocidad. Se repasa en particular la tecnología MAGLEV que poco a poco empieza a tener mayor relevancia en el transporte ferroviario, convirtiéndose en la mejor alternativa para viajes a grandes distancias a velocidades superiores a la de los actuales trenes convencionales de alta velocidad.

Luego se analiza la dinámica de los trenes de alta velocidad, lo que permite la determinación de la potencia eléctrica necesaria para su circulación en un trazado con condiciones especiales, a una velocidad determinada. A partir de esta potencia se seleccionan diversos motores de inducción que deben ser aptos para trenes de alta velocidad en condiciones preestablecidas.

Posteriormente se describe el proceso de estimación de los parámetros eléctricos en máquinas de inducción, con el propósito de determinarlos en las máquinas seleccionadas y así estudiar su comportamientos en las condiciones expuestas, para después elegir entre ellas las que cumplan con todas las restricciones. La máquina especificada es de 3.000 V, 4 polos y 200 kW.

Por último se efectúa un análisis económico a nivel de costo de inversión del proyecto por infraestructura y material rodante (trenes). Esto para elegir un tren de alta velocidad adecuado para el trazado. La alternativa escogida fue el tren de alta velocidad japonés *Shinkansen* 700 de 16 coches con motores de fábrica, sus respectivos controles de frecuencia y una capacidad de 1.323 asientos. El costo de inversión estimado de este proyecto en el país es de 1,6 mil millones de dólares.

La conclusión más importante del trabajo es que la implementación de un tren de alta velocidad entre Santiago y Valparaíso es técnicamente factible y permitiría cubrir dicho tramo en menos de una hora. Será necesario un estudio económico más detallado para decidir la factibilidad económica.

AGRADECIMIENTOS

Deseo agradecer al Sr. Jorge Romo por su buena disposición en responder las dudas que surgían durante el desarrollo de esta memoria y encaminar este trabajo.

Agradezco al Sr. Sergio Villalobos por apoyarme en todo momento y brindarme orientación no sólo en lo académico sino en lo personal a lo largo del tiempo que estuve en la facultad de ingeniería eléctrica.

Agradezco también a los miembros de la comisión: Sr. Nelsón Morales y Sr. Augusto Lucero por ser parte de esta memoria y por todo lo que enseñan día a día en clases y fuera de ellas.

Agradezco a toda las personas que tuve el privilegio de conocer y compartir en la facultad, en especial a la comunidad de eléctrica, la mejor de todas.

Por último agradezco a mi madre y hermanos que todos los días me dan fuerzas para seguir adelante y ser mejor. Con su apoyo incondicional he logrado cumplir metas y desafíos que sin ustedes no habría sido posible. Los quiero mucho.

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Motivación.....	1
1.2 Objetivos.....	1
1.2.1 Objetivos generales.....	1
1.2.2 Objetivos específicos.....	1
1.3 Alcances.....	2
1.4 Estructura de la memoria.....	2
CAPÍTULO 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA Y ESTADO DEL ARTE	3
2.1 Trenes de alta velocidad convencionales.....	3
2.1.1 Definición y clasificación.....	3
2.1.2 Estado actual.....	4
2.2 Trenes de alta velocidad con tecnología MAGLEV.....	17
2.2.1 Características del sistema MAGLEV	18
2.2.2 Proyectos de trenes MAGLEV	20
2.3 Máquinas de inducción.....	21
2.3.1 Estator.....	21
2.3.2 Rotor.....	24
2.3.3 Deslizamiento.....	24
2.3.4 Modelo equivalente	25
2.4 Motores de tracción	26
CAPÍTULO 3. IMPLEMENTACIÓN EN CHILE.....	29
3.1 Dinámica del tren.....	29
3.1.1 Ecuación del movimiento	29
3.1.2 Fuerzas longitudinales, resistencia al avance	30
3.1.3 Esfuerzo de tracción	37
3.1.4 Adherencia.....	38
3.1.5 Dinámica del tren en rampas y pendientes	40
3.2 Selección del recorrido	43
3.3 Especificación de los motores	46
3.3.1 Coeficientes fórmula de Davis	46
3.3.2 Curvas características para evaluar el desempeño de los trenes.....	48

3.4	Estimación de parámetros.....	57
3.4.1	Parámetros a determinar	57
3.4.2	Formulación del problema.....	58
3.4.3	Resultados en motores comerciales	61
3.5	Elección de los motores	62
3.5.1	Condiciones en la gradiente máxima.....	62
3.5.2	Condiciones de velocidad máxima	69
3.5.3	Condiciones en la partida	74
CAPÍTULO 4. ANÁLISIS ECONÓMICO		76
4.1	Costos asociados a la inversión inicial	76
4.1.1	Infraestructura.....	76
4.1.2	Material rodante.....	78
4.2	Costo de inversión del proyecto	81
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES		82
5.1	Recopilación y comentarios.....	82
5.2	Trabajo Futuro	84
REFERENCIAS		85
ANEXOS		88
A.	Familia de curvas torque-velocidad de las máquinas para distintas frecuencias.....	88

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Partes principales de una máquina locomotora.....	4
Figura 2.2: Trazado de las vías de alta velocidad en Europa.	5
Figura 2.3: Trazado de las vías de alta velocidad en Asia.....	6
Figura 2.4: Red del TGV.	7
Figura 2.5: TGV TMST.....	8
Figura 2.6: Red de trenes ICE	9
Figura 2.7: ICE 3.	11
Figura 2.8: Red de trenes <i>Shinkansen</i>	12
Figura 2.9: <i>Shinkansen</i> N700.....	14
Figura 2.10: Número de unidades en circulación de <i>Shinkansen</i> por año.....	14
Figura 2.11: Red de trenes AVE.....	15
Figura 2.12: <i>Talgo</i> 350 (serie 102).	16
Figura 2.13: Comparación de sistemas de tracción entre TAV convencionales y TAV MAGLEV.	17
Figura 2.14: Principio de funcionamiento de la SEM.	18
Figura 2.15: Sistema de levitación SED.	18
Figura 2.16: Detalle del <i>Transrapid</i> (izquierda) y sistema guía del HSST (derecha).	20
Figura 2.17: Estator de una máquina asíncrona.....	21
Figura 2.18: Estator de dos polos	22
Figura 2.19: Rotor tipo jaula de ardilla de una máquina de inducción.....	24
Figura 2.20: Modelo equivalente exacto de una máquina de inducción.	25
Figura 2.21: Curvas torque-velocidad a frecuencia y voltaje variables	26
Figura 2.22: Esquema de bloques de una locomotora eléctrica	27
Figura 2.23: Comparación de tres motores de distintos <i>Shinkansen</i>	28
Figura 3.1: Sistema de coordenadas para la dinámica del tren.....	30
Figura 3.2: Comparación entre un bogie convencional y un bogie blando.	32
Figura 3.3: Resistencia debido a la gravedad	33
Figura 3.4: Gráfica de la resistencia al avance del <i>Talgo</i> 350 para distintas gradientes.	34
Figura 3.5: Peso relativo de los factores de la resistencia al avance.	35
Figura 3.6: Comparación entre trenes clásicos y el <i>Talgo</i> 350.....	36
Figura 3.7: Diagrama eléctrico del tren AVE 103.....	37
Figura 3.8: Fuerzas presentes en la rueda.....	38
Figura 3.9: Curvas características de un tren.....	39
Figura 3.10: Curvas de tracción y resistencia para distintas rampas.	40
Figura 3.11: Curvas de tracción y resistencia para distintas pendientes.	41
Figura 3.12: Curvas características del <i>Talgo</i> 350	42
Figura 3.13: Plano del trazado del ferrocarril Santiago-Valparaíso	43
Figura 3.14: Estaciones de la ruta usada por FEPASA.	44
Figura 3.15: Recorrido propuesto por el MOP.	45
Figura 3.16: Curvas características del <i>Shinkansen</i> serie 0.....	50
Figura 3.17: Curvas características del <i>Shinkansen</i> serie 300.....	50
Figura 3.18: Curvas características del <i>Shinkansen</i> serie 700.....	51
Figura 3.19: Curvas características del <i>Shinkansen</i> serie N700.....	51
Figura 3.20: Curvas características del TGV <i>Sud-Est</i>	52

Figura 3.21: Curvas características del TGV <i>Réseau</i>	52
Figura 3.22: Curvas características del TGV <i>Atlantique</i>	53
Figura 3.23: Curvas características del TGV <i>Dúplex</i>	53
Figura 3.24: Curvas características del AVE serie 100.....	54
Figura 3.25: Curvas características del <i>Talgo</i> 350 serie 102.....	54
Figura 3.26: Curvas características del AVE serie 103.....	55
Figura 3.27: Equivalente de <i>Thévenin</i> de la máquina de inducción.....	59
Figura 3.28: Curva torque-velocidad de la máquina de 200 kW y 2 polos para $v=100$ km/h...64	64
Figura 3.29: Curva torque-velocidad de la máquina de 450 kW y 2 polos para $v=100$ km/h...65	65
Figura 3.30: Curva torque-velocidad de la máquina de 200 kW y 4 polos para $v=100$ km/h...65	65
Figura 3.31: Curva torque-velocidad de la máquina de 450 kW y 4 polos para $v=100$ km/h...66	66
Figura 3.32: Curva torque-velocidad de la máquina de 200 kW y 6 polos para $v=100$ km/h...66	66
Figura 3.33: Curva torque-velocidad de la máquina de 450 kW y 6 polos para $v=100$ km/h...67	67
Figura 3.34: Sistema de transmisión “trípode” de un TGV.....	68
Figura 3.35: Curva torque-velocidad de la máquina de 200 kW y 2 polos para $v=250$ km/h...70	70
Figura 3.36: Curva torque-velocidad de la máquina de 450 kW y 2 polos para $v=250$ km/h...70	70
Figura 3.37: Curva torque-velocidad de la máquina de 200 kW y 4 polos para $v=250$ km/h...71	71
Figura 3.38: Curva torque-velocidad de la máquina de 450 kW y 4 polos para $v=250$ km/h...71	71
Figura 3.39: Curva torque-velocidad de la máquina de 200 kW y 6 polos para $v=250$ km/h...72	72
Figura 3.40: Curva torque-velocidad de la máquina de 450 kW y 6 polos para $v=250$ km/h...72	72
Figura 4.1: Proporción de costos en el valor total de la infraestructura.....	77
Figura 4.2: Pasajeros estimados para los años 2013 y 2023.....	78
Figura A.1: Curvas torque-velocidad de la máquina de 200 kW y 2 polos.....	88
Figura A.2: Curvas torque-velocidad de la máquina de 450 kW y 2 polos.....	89
Figura A.3: Curvas torque-velocidad de la máquina de 200 kW y 4 polos.....	89
Figura A.4: Curvas torque-velocidad de la máquina de 450 kW y 4 polos.....	90
Figura A.5: Curvas torque-velocidad de la máquina de 200 kW y 6 polos.....	90
Figura A.6: Curvas torque-velocidad de la máquina de 450 kW y 6 polos.....	91

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Datos de líneas de alta velocidad.....	4
Tabla 2.2: Proyectos de trenes MAGLEV en ejecución y en preparación.	20
Tabla 3.1: Valores de K_1 y K_2 de la fórmula de Davis.	31
Tabla 3.2: Resistencia específica al arranque para distintos valores de rampa.	35
Tabla 3.3: Casos posibles en el movimiento del tren.	38
Tabla 3.4: Distancia entre estaciones.	45
Tabla 3.5: Datos de trenes de alta velocidad	47
Tabla 3.6: Valores de los coeficientes de la fórmula de Davis para diversos TAV.	47
Tabla 3.7: Valores de la fuerza de adherencia de los TAV seleccionados.	49
Tabla 3.8: Velocidades mínimas y potencias eléctricas requeridas.....	56
Tabla 3.9: Datos de máquinas de inducción del fabricante ABB.	61
Tabla 3.10: Parámetros obtenidos del proceso de estimación.	61
Tabla 3.11: Torque necesario por motor para la condición de gradiente máxima.	62
Tabla 3.12: Valores de reactancias para $f=1$ Hz.	63
Tabla 3.13: Frecuencias de operación.	64
Tabla 3.14: Torques en las velocidades calculadas.	67
Tabla 3.15: Torques en la rueda usando una caja de engranajes.	68
Tabla 3.16: Torque necesario por motor para la condición de velocidad máxima.	69
Tabla 3.17: Frecuencias de operación.	69
Tabla 3.18: Torques en las velocidades calculadas.	73
Tabla 3.19: Torques en la rueda usando una caja de engranajes.	73
Tabla 3.20: Torque en la partida con $f=10$ Hz.....	74
Tabla 3.21: Masa total de las máquinas.....	75
Tabla 4.1: Costos de infraestructura por zonas.....	76
Tabla 4.2: Costos de infraestructura del servicio TGV en 1994.	77
Tabla 4.3: Costo de la infraestructura de acuerdo a datos del TGV.	77
Tabla 4.4: Llegada de chilenos a Valparaíso y Santiago.	78
Tabla 4.5: Afluencia media diaria en el año 2023.	79
Tabla 4.6: Costo de los trenes.....	79
Tabla 4.7: Costo de los motores.	80
Tabla 4.8: Costo de inversión del proyecto.	81

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 MOTIVACIÓN

El progreso económico y social de un país se ve reflejado por el aumento de las principales ciudades en cuanto a superficie (mancha urbana) y población. Por esto se hace necesario un medio de transporte rápido y eficiente para abastecer la creciente demanda de viajes interurbanos.

Una solución a este problema es la implementación de trenes de alta velocidad que conecten los centros urbanos más importantes, facilitando el trayecto para los pasajeros y descongestionando carreteras y vuelos aéreos.

Globalmente, Europa es el continente con más experiencia en la construcción y habilitación de vías de alta velocidad, destacándose Francia y Alemania por sus diseños propios y adaptables a otros países con características particulares. Gracias a ello, prácticamente todo el continente está conectado a través de vías de alta velocidad.

En Asia, Japón es el referente, con más de 50 años de desarrollo de este transporte y un fuerte interés en la investigación de mejoras en la tecnología de su flota actual. China merece un capítulo aparte por su temprana incursión en la alta velocidad, país que actualmente posee la red más extensa de todas, además de ser el primero en ofrecer un servicio comercial de transporte masivo con trenes de levitación magnética.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivos generales

El propósito de esta memoria es investigar el estado del arte de los trenes de alta velocidad para evaluar la factibilidad técnica y la inversión necesaria para implementar este medio de transporte en el país a través de un recorrido entre Santiago y Valparaíso.

Se pretende estudiar distintos modelos de trenes de alta velocidad presentes en la actualidad y realizar un estudio comparativo, desde el punto de vista técnico y desde el punto de vista de estimación de costos de inversión.

1.2.2 Objetivos específicos

- Estudio del estado actual de la tecnología de trenes de alta velocidad en el mundo.
- Describir la dinámica de un tren para especificar motores adecuados.
- Análisis electromecánico de motores propuestos.
- Estimación de costos de inversión del proyecto.
- Elección de un tren de alta velocidad.

1.3 ALCANCES

El desarrollo y puesta en marcha de un proyecto de tren de alta velocidad en un país es un trabajo complejo que requiere mucho esfuerzo y tiempo de una gran cantidad de profesionales en varias áreas de ingeniería.

En este trabajo el proyecto se enfocará lo básico para determinar un motor asíncrono adecuado para movilizar un tren de alta velocidad, el cual será elegido entre distintos modelos que han realizado recorridos regulares en países con experiencia en este tipo de transporte, con la mayoría de ellos aún en uso. Se realizará además un estudio económico preliminar que estimará el costo de inversión del proyecto. No se entrará en detalles de la construcción de la infraestructura necesaria para la movilización del tren, así como la electrónica detrás del proceso de alimentación de la máquina.

1.4 ESTRUCTURA DE LA MEMORIA

La memoria propiamente tal se desarrolla en los próximos capítulos como sigue. En el capítulo 2 se muestran resultados relevantes de la revisión bibliográfica, realizado con respecto al estado de arte de trenes de alta velocidad convencionales y las características de los futuros trenes de alta velocidad MAGLEV. En el capítulo 3 se desarrolla técnicamente el proyecto, orientado a la determinación de los elementos relevantes del mismo. Se analiza la dinámica del tren en función del trazado propuesto, se seleccionan alternativas de motores aptos para condiciones específicas, evaluando sus parámetros circuitales y simulando su comportamiento electromecánico para elegir el motor más adecuado. En el capítulo 4 se efectúa el análisis económico del proyecto desarrollado en el capítulo anterior. En particular se estima el costo de inversión del proyecto, considerando costos de infraestructura (US\$/km. de vía) y costo de los trenes necesarios, previo cálculo del número de trenes en función de la cantidad de pasajeros a transportar en un día. En el capítulo 5 se resumen las principales conclusiones del trabajo realizado y se proponen algunas líneas de trabajo que debiesen considerarse como continuación del presente estudio.

CAPÍTULO 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA Y ESTADO DEL ARTE

2.1 TRENES DE ALTA VELOCIDAD CONVENCIONALES

Los trenes de alta velocidad (TAV) convencionales son aquellos medios de transporte de alta velocidad en que se utilizan ruedas para el apoyo entre el vehículo y el riel a diferencia de los trenes equipados con tecnología MAGLEV, los cuales se desplazan sin contacto con las vías a través de levitación magnética.

El objetivo del uso de estos trenes es transportar pasajeros a grandes distancias en el menor tiempo posible, ofreciendo un servicio expreso, eficiente y seguro. Se promueve además el uso de energías renovables a través del empleo de motores eléctricos, los cuales no tienen emisiones contaminantes de gases, a diferencia de los motores que usan combustibles fósiles.

2.1.1 Definición y clasificación

La Unión Internacional de Ferrocarriles UIC incluye en el concepto “alta velocidad” a todos los elementos que conforman el sistema: máquinas, vías, topografía, etc., en especial la infraestructura desarrollada para la circulación de los trenes. Se consideran líneas de alta velocidad aquellas diseñadas para velocidades sobre los 250 km/h, también aquellas que son reacondicionadas para velocidades sobre 200 km/h. Esta definición está sujeta a límites de velocidad cercanos a 110 km/h en regiones densamente pobladas debido al ruido que se produce. En países donde el avance tecnológico en trenes no es alto, si se implementan trenes capaces de trasladarse a 180 km/h y el servicio que prestan es de calidad, también son considerados de alta velocidad [1].

Se clasifican de acuerdo a la velocidad, distancia recorrida y servicio [2]:

- 1) TAV Emergentes: Cubren distancias de 160 a 800 km. con el potencial de transformarse en TAV Regionales o Expresos. La velocidad máxima alcanzada es hasta 180 km/h y con vías compartidas por otros trenes, sean o no de alta velocidad.
- 2) TAV Regionales: Cubren distancias de 160 a 800 km. entre centros urbanos de población moderada. Las velocidades alcanzadas pueden llegar a 240 km/h y tener puntos intermedios de detención entre origen y destino. Poseen algunas vías dedicadas al servicio y otras compartidas. Están pensadas para disminuir el tráfico en las autopistas.
- 3) TAV Expresos: Cubren distancias de 320 a 1.000 km entre centros urbanos masivos, con pocas o ninguna detención intermedia. La velocidad máxima debe ser al menos de 240 km/h y circular en pistas exclusivamente diseñadas. Están pensadas para disminuir el tráfico en las autopistas y en el aire.

Las partes principales de una máquina locomotora eléctrica son las mostradas en la figura 2.1 [3]:

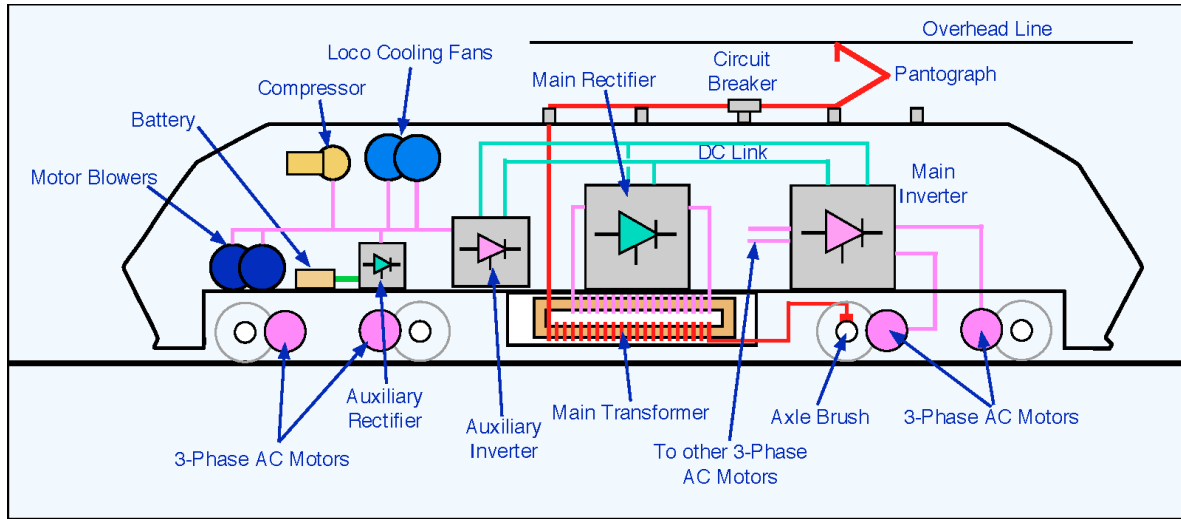


Figura 2.1: Partes principales de una máquina locomotora

Las líneas rojas representan circuitos alternos monofásicos, las rosadas son alternos trifásicos y las verdes son continuos.

Los trenes modernos usan motores síncronos o de inducción, siendo de mayor preferencia el segundo tipo. La alimentación se extrae de líneas de alta tensión alterna a través de pantógrafos, donde pasa por rectificadores e inversores compuestos de Tiristores GTO o IGBT. El circuito se completa con escobillas en el eje de las ruedas que lo conectan con el riel.

2.1.2 Estado actual

La tabla 2.1 muestra datos de algunos de los países donde existe un servicio de trenes de alta velocidad [2].

	Japón	Francia	Alemania
Año de puesta en servicio	1964	1981	1988
Extensión	2.176 km	1.888 km	1.277 km
Velocidad máxima	300 km/h	320 km/h	300 km/h
Pasajeros transportados (millones)	307 (2011)	115 (2010)	77 (2009)

	España	Italia	China
Año de puesta en servicio	1981	1988	2007
Extensión	3.000 km	926 km	9.300 km
Velocidad máxima	300 km/h	300 km/h	300 km/h
Pasajeros transportados (millones)	17 (2009)	25 (2011)	486 (2012)

Tabla 2.1: Datos de líneas de alta velocidad en el mundo

El estado del desarrollo de las vías de alta velocidad es predominante en Europa y Asia como se ve en las figuras 2.2 y 2.3 [4], [5]:



Figura 2.2: Trazado de las vías de alta velocidad en Europa.

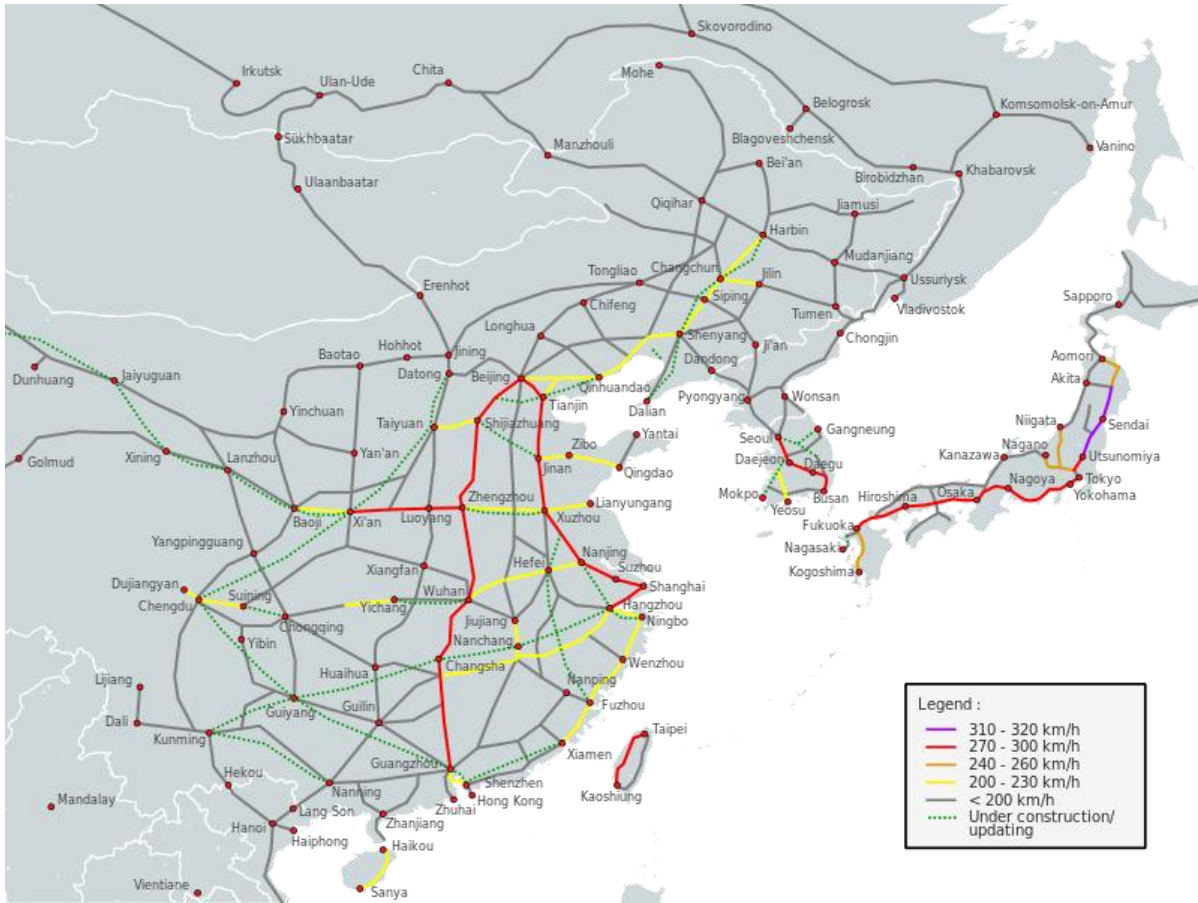


Figura 2.3: Trazado de las vías de alta velocidad en Asia.

Las velocidades son las máximas comerciales, no las diseñadas, las cuales son generalmente más altas.

Los principales países representantes de la tecnología de alta velocidad son: Francia, Alemania, Japón y España.

2.1.2.1 Francia

El TGV (*Train à Grande Vitesse* – lit. Tren a Gran Velocidad) es el nombre con el que se denomina al servicio de transporte de alta velocidad en Francia, desarrollado por Alstom y operado por la compañía de ferrocarriles nacional francesa SNCF.

Es uno de los trenes más veloces del mundo, operando en algunos tramos a 320 km/h y con una velocidad promedio de 279 km/h, superando a países como Alemania, Taiwán, España y Japón [6]. El 3 de Abril de 2007 se logró el récord mundial de velocidad con trenes convencionales, llegando a 574,8 km/h.

Estos trenes tienen una tracción tipo EL (*Electric Locomotive*) donde se necesita una máquina locomotora que empuje los vagones. En el caso del TGV hay una locomotora al inicio y otra al final del tren.

En la figura 2.4 se muestra la red del TGV [7].

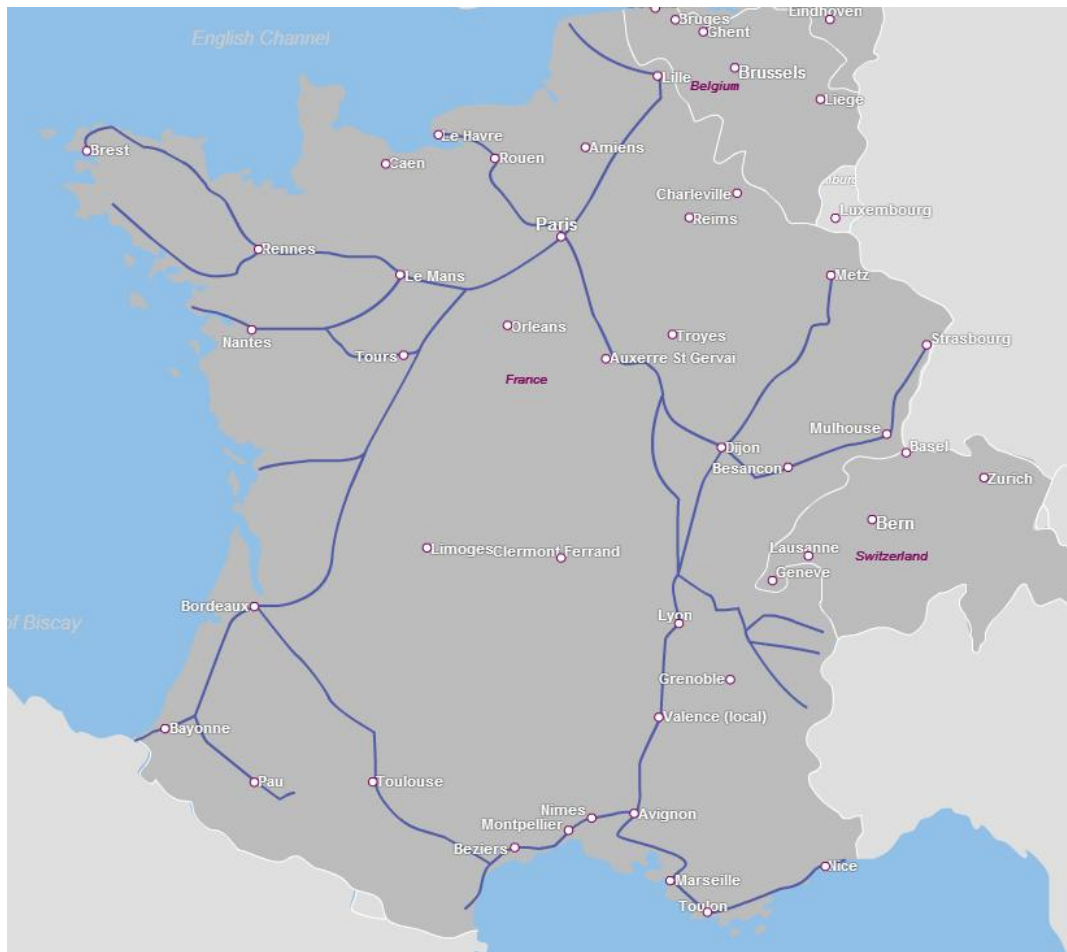


Figura 2.4: Red del TGV.

Características de modelos selectos de TGV [8]:

- TGV *Sud-Est*

Fecha de construcción	1978-1985
Largo	200 m
Masa	385.000 kg
Voltaje de Alimentación	25 kV @ 50 Hz CA, 1,5 kV CC
Tracción	12 motores CC
Potencia	6.450 kW @ 25 kV
Capacidad	350 asientos

- TGV *Atlantique*

Fecha de construcción	1989-1992
Largo	238 m
Masa	484.000 kg
Voltaje de Alimentación	25 kV @ 50 Hz CA, 1,5 kV CC
Tracción	8 motores síncronos
Potencia	8.800 kW @ 25 kV
Capacidad	485 asientos

- TGV *Réseau*

Fecha de construcción	1992-1996
Largo	200 m
Masa	383.000 kg
Voltaje de Alimentación	25 kV @ 50 Hz CA, 3 kV CC, 1,5 kV CC
Tracción	8 motores síncronos
Potencia	8.800 kW @ 25 kV
Capacidad	377 asientos

- TGV *TransManche Super Train (Eurostar)*

Fecha de construcción	1993-1995
Largo	394 m
Masa	752.000 kg
Voltaje de Alimentación	25 kV @ 50 Hz CA, 3 kV CC, 750 V CC
Tracción	12 motores asíncronos
Potencia	12.200 kW @ 25 kV
Capacidad	794 asientos



Figura 2.5: TGV TMST.

2.1.2.2 Alemania

El ICE (*Intercity-Express*) es el sistema de trenes de alta velocidad alemana operada por la Compañía Alemana de Trenes DBAG.

Existen cuatro modelos eléctricos en funcionamiento en el país: ICE 1, ICE 2, ICE 3 e ICE T. Son fabricados por Bombardier y por Siemens. La velocidad máxima es de 280 km/h para las variantes ICE 1 e ICE 2, 330 km/h para el ICE 3 y 230 km/h para el ICE T.

Tienen una tracción tipo EMU (*Electric Multiple Unit*) es decir cada vagón puede impulsarse de forma autónoma.

En la figura 2.6 se muestra la red ICE [9].

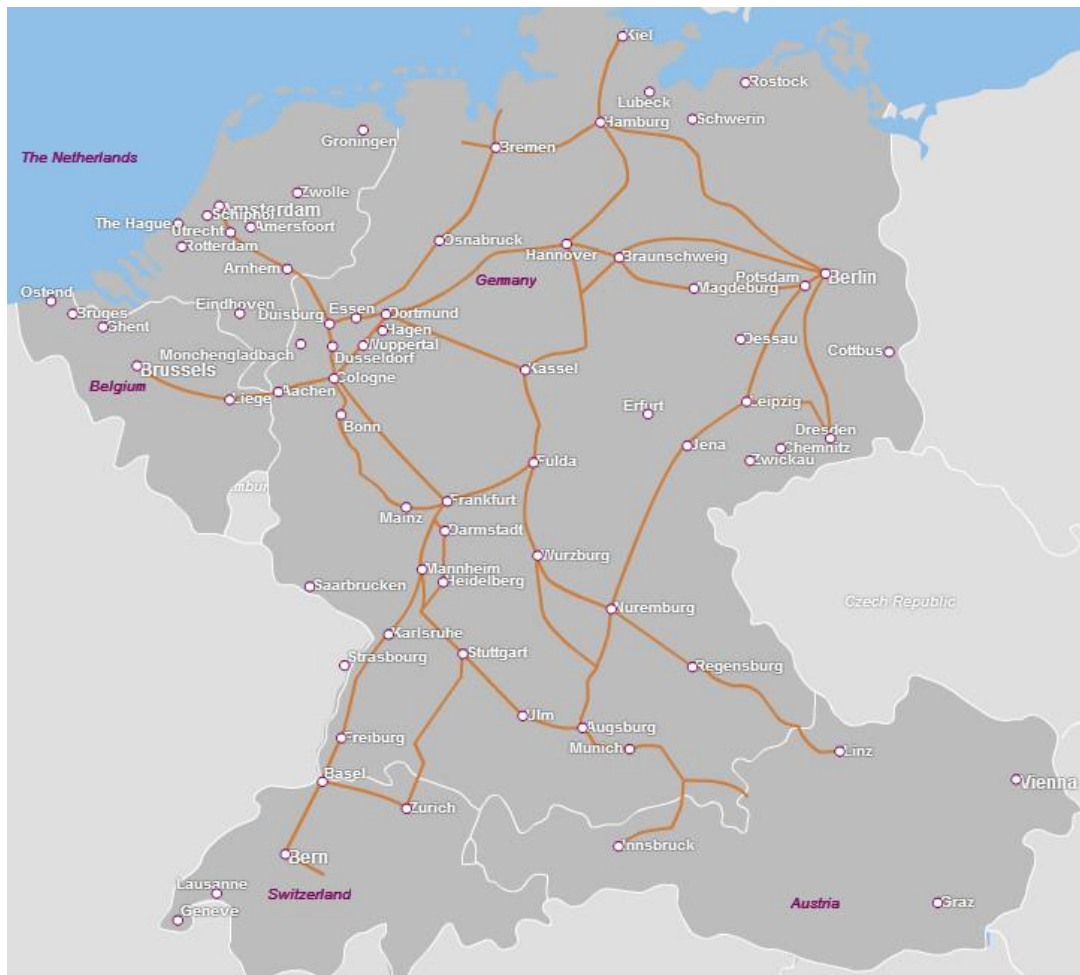


Figura 2.6: Red de trenes ICE

Características de modelos selectos de ICE [10]:

- ICE 1

Fecha de construcción	1989-1993
Largo	357,9 m
Masa	798.200 kg
Voltaje de Alimentación	15 kV @ 16,67 Hz CA, 25 kV @ 50 Hz CA, 1.5 kV CC, 3 kV CC
Tracción	4 motores asíncronos
Potencia	9.600kW @ 25 kV
Capacidad	743 asientos

- ICE 2

Fecha de construcción	1995-1997
Largo	205,36 m
Masa	418.000 kg
Voltaje de Alimentación	15 kV @ 16,67 Hz CA, 25 kV @ 50 Hz CA, 1.5 kV CC, 3 kV CC
Tracción	4 motores asíncronos
Potencia	4.800 kW @ 25 kV
Capacidad	368 asientos

- ICE 3

Fecha de construcción	2000-Actualidad
Largo	200,32 m
Masa	435.000 kg
Voltaje de Alimentación	15 kV @ 16,67 Hz CA, 25 kV @ 50 Hz CA, 1.5 kV CC, 3 kV CC
Tracción	16 motores asíncronos
Potencia	8.000 kW @ 25 kV
Capacidad	441 asientos

- ICE T

Fecha de construcción	1999-Actualidad
Largo	184,4 m
Masa	390.000 kg
Voltaje de Alimentación	15 kV @ 16,67 Hz CA, 25 kV @ 50 Hz CA, 1.5 kV CC, 3 kV CC
Tracción	8 motores asíncronos
Potencia	4.000 kW @ 25 kV
Capacidad	372 asientos



Figura 2.7: ICE 3.

2.1.2.3 Japón

El *Shinkansen* (lit. nueva línea troncal) también conocido como “tren bala” por la forma del vagón frontal de las primeras versiones, es la serie de trenes de alta velocidad de Japón operado por la Compañía de Ferrocarriles de Japón JR.

Desde 1992, esta línea tiene sistemas de alerta temprana de terremotos (UrEDAS), a través de sismógrafos ubicados cerca de las costas de Japón. Cuando ocurre un evento de gran magnitud, se envían señales a todos los trenes en circulación para activar sus frenos automáticamente.

Existen varios modelos de *Shinkansen* entre ellos la pionera serie 0, serie 300, serie 700 y serie N700 entre otros que recorren las líneas de la red. Para el año 2025 se espera que entre en operación la línea *Chuo Shinkansen* que conectará Tokio, Nagoya y Osaka a través de un tren MAGLEV. La velocidad máxima varía de 240 km/h a 300 km/h dependiendo de la línea y modelo del tren.

Características de modelos selectos de *Shinkansen* [12].

- *Shinkansen* serie 0

Fecha de construcción	1963-1986
Largo	400 m
Masa	967.000 kg
Voltaje de Alimentación	25 kV @ 60 Hz CA
Tracción	64 motores CC
Potencia	11.840 kW @ 25 kV
Capacidad	1.340 asientos

- *Shinkansen* serie 300

Fecha de construcción	1990-1998
Largo	400 m
Masa	711.000 kg
Voltaje de Alimentación	25 kV @ 60 Hz CA
Tracción	40 motores asíncronos
Potencia	12.000 kW @ 25 kV
Capacidad	1.323 asientos

- *Shinkansen* serie 700

Fecha de construcción	1997-2006
Largo	400 m
Masa	708.000 kg
Voltaje de Alimentación	25 kV @ 60 Hz CA
Tracción	48 motores asíncronos
Potencia	13.200 kW @ 25 kV
Capacidad	1.323 asientos

- *Shinkansen* serie N700

Fecha de construcción	2005-2012
Largo	400 m
Masa	715.000 kg
Voltaje de Alimentación	25 kV @ 60 Hz CA
Tracción	56 motores asíncronos
Potencia	17.080 kW @ 25 kV
Capacidad	1.323 asientos



Figura 2.9: Shinkansen N700.

La figura 2.10 muestra la cantidad de unidades de trenes en circulación por año de la línea Tokaido. [13].

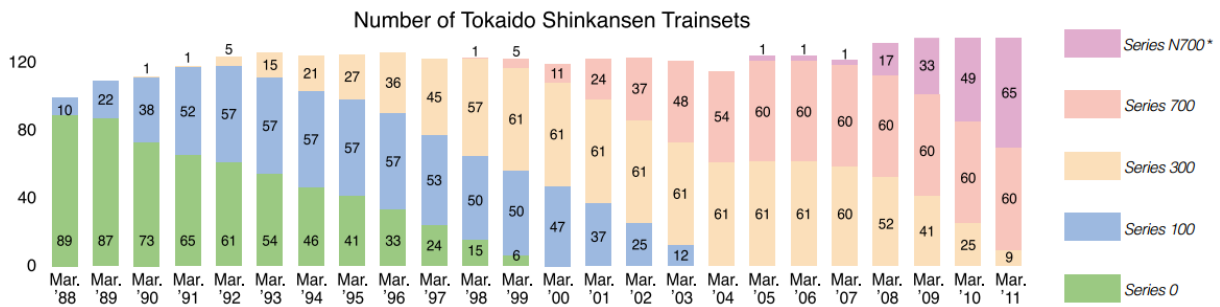


Figura 2.10: Número de unidades en circulación de Shinkansen por año.

2.1.2.4 España

AVE (Alta Velocidad Española) es la marca usada por la compañía ferroviaria RENFE para sus trenes de alta velocidad. La extensión de la red es de 3.000 km, la más extensa de Europa y siendo superada mundialmente sólo por China.

En el año 1994 se logró el récord de velocidad a 356,8 km/h, lo que permitió el aumento de velocidad máxima de su flota a 310 km/h.

En la figura 2.11 se muestra la red de trenes AVE [14].



Figura 2.11: Red de trenes AVE.

Características de modelos selectos de trenes AVE [15].

- Serie 100

Fecha de construcción	1991-1995
Largo	200 m
Masa	392.600 kg
Voltaje de Alimentación	25 kV @ 50 Hz CA, 3kV CC
Tracción	8 motores síncronos
Potencia	8.800 kW @ 25 kV
Capacidad	347 asientos

- Serie 102

Fecha de construcción	2003-2006
Largo	200 m
Masa	322.000 kg
Voltaje de Alimentación	25 kV @ 50 Hz CA, 3kV CC
Tracción	8 motores asíncronos
Potencia	8.000 kW @ 25 kV
Capacidad	318 asientos

- Serie 120

Fecha de construcción	2004-2006
Largo	107 m
Masa	247.000 kg
Voltaje de Alimentación	25 kV @ 50 Hz CA, 3kV CC
Tracción	8 motores asíncronos
Potencia	4.000 kW @ 25 kV
Capacidad	238 asientos

- Serie 130

Fecha de construcción	2006-2010
Largo	184 m
Masa	312.000 kg
Voltaje de Alimentación	25 kV @ 50 Hz CA, 3kV CC
Tracción	8 motores asíncronos
Potencia	4.800 kW @ 25 kV
Capacidad	299 asientos



Figura 2.12: Talgo 350 (serie 102).

2.2 TRENES DE ALTA VELOCIDAD CON TECNOLOGÍA MAGLEV

MAGLEV es la abreviatura en inglés de “levitación magnética”, esto quiere decir que los trenes equipados con esta tecnología flotan en la vía y no existe roce entre ruedas y rieles como en los trenes de alta velocidad convencionales.

El nacimiento de esta tecnología data del año 1934 cuando Hermann Kempfer patentó la idea. En años posteriores el desarrollo fue avanzando alcanzando la madurez técnica en la década de los 80 y comenzando períodos de pruebas en los 90. En 1979 el tren alemán *Transrapid* 05 transportó pasajeros durante la Exposición de Transporte Internacional en Hamburgo como muestra de su potencial. El primer servicio público comercial de transporte de alta velocidad fue estrenado en Shanghái el 2003.

Entre las ventajas del MAGLEV se destaca: 1) la falta de ruedas, por lo que los costos de mantenimiento son menores, además de que las vibraciones y el ruido se ven drásticamente aminoradas; 2) debido al sistema electromagnético guía, el tren tiene una baja posibilidad de descarrilar; 3) al no haber contacto directo entre el tren y los rieles, no existe peligro de deslizamiento en operación; 4) tiene una alta tasa de aceleración y freno [16], [17].

La figura 2.13 compara el sistema de tracción de los trenes de alta velocidad convencionales con el sistema de suspensión electromagnética del MAGLEV *Transrapid*.

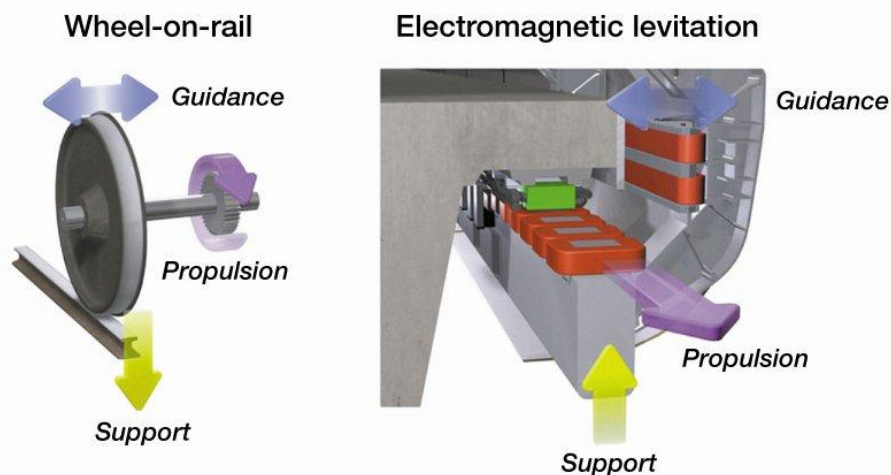


Figura 2.13: Comparación de sistemas de tracción entre TAV convencionales y TAV MAGLEV.

2.2.1 Características del sistema MAGLEV

2.2.1.1 Levitación

Básicamente existen dos tipos de levitación en los trenes MAGLEV:

- 1) Suspensión electromagnética (SEM): La suspensión se logra por la fuerza de atracción magnética entre los electromagnetos ubicados en la vía y los electromagnetos en el tren. Este método es inestable y debe ser dinámicamente estabilizado mediante realimentación a través de un sensor que mide en todo momento el espacio entre ambos magnetos [16].

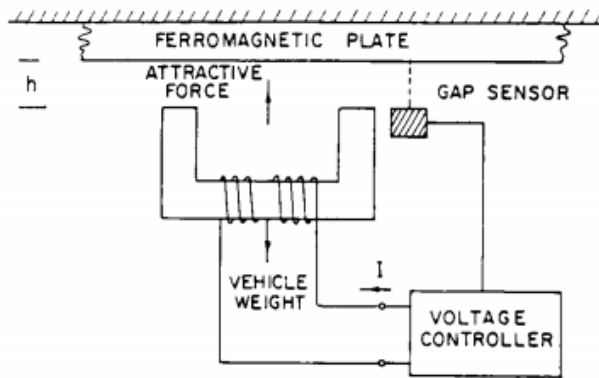


Figura 2.14: Principio de funcionamiento de la SEM.

- 2) Suspensión electrodinámica (SED): A diferencia de la SEM, que utiliza fuerzas de atracción, la SED utiliza fuerzas de repulsión a través de magnetos superconductores enfriados con helio líquido a temperaturas cercanas a 4 K [18]. Cuando se alcanzan velocidades altas, las corrientes inducidas en las bobinas de las vías generan un campo magnético que repele al creado por los magnetos en el tren. Este sistema es estable y no requiere una medición constante del espacio de aire entre magnetos; el inconveniente es que la levitación se produce a velocidades altas (100 km/h), por lo que a velocidades menores son necesarias ruedas para apoyar el tren [16]. Con este sistema se consiguió el récord mundial de velocidad en Japón con el MLX en el año 2003 a 581 km/h.

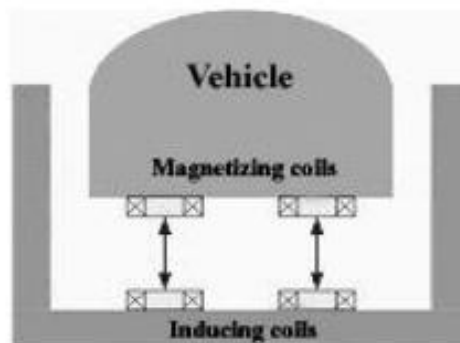


Figura 2.15: Sistema de levitación SED.

2.2.1.2 Propulsión

La propulsión de los trenes MAGLEV es gracias al uso de motores lineales de inducción o motores lineales sincrónicos:

- 1) Motores de inducción lineales (MIL): En el primario se genera un campo magnético variable en el tiempo que induce una fuerza electromotriz en una placa inductora (secundario). Esta fuerza genera corrientes en la placa y se produce una fuerza de impulso de Lorentz. Hay dos tipos principales de MIL: primario corto y secundario corto. En el primer caso las bobinas inductoras se encuentran en el vehículo y la placa inducida está en la vía. En el segundo caso la placa inducida está en el vagón y las bobinas inductoras en la vía.

Los motores tipo primario corto son más económicos que los secundario corto, pero tienen menor eficiencia que estos últimos a causa del efecto de borde que presentan estas máquinas lineales. Por ello estos motores se emplean en trenes MAGLEV de baja potencia y velocidad como el HSST japonés o el coreano UTM [16].

- 2) Motores sincrónicos lineales (MSL): En este caso los campos magnéticos de la armadura y de campo interactúan para producir el impulso. Su clasificación es la misma que los MIL. La velocidad se controla por la frecuencia de alimentación.

Estos motores son preferidos por los trenes MAGLEV de alta velocidad debido a que tienen una alta eficiencia y factor de potencia. El *Transrapid* usa electromagnetos de hierro y el MLX usa magnetos superconductores [16].

2.2.1.3 Sistema guía

Se necesita un sistema que evite que el tren se desplace lateralmente durante el recorrido. Al igual que en el caso de la levitación, las opciones a usar son atracción magnética o repulsión magnética:

- 1) Repulsión magnética: En el MLX al conectar las bobinas de levitación de ambos lados de la pared, estas actúan como guías. Cuando el tren se desvía del centro de la pista, se induce una corriente entre estas dos bobinas y se produce una fuerza de repulsión en lado que está más cerca de la pared, lo que devuelve al tren a su posición estable [16], [18].
- 2) Atracción magnética: Se genera una fuerza de atracción para reducir la reluctancia y aumentar la inductancia cuando el tren se desplaza lateralmente. El inconveniente es que estas bobinas están integradas al sistema guía y no es posible el control a altas velocidades, por lo que esta forma de guía se usa en trenes como el HSST [16].

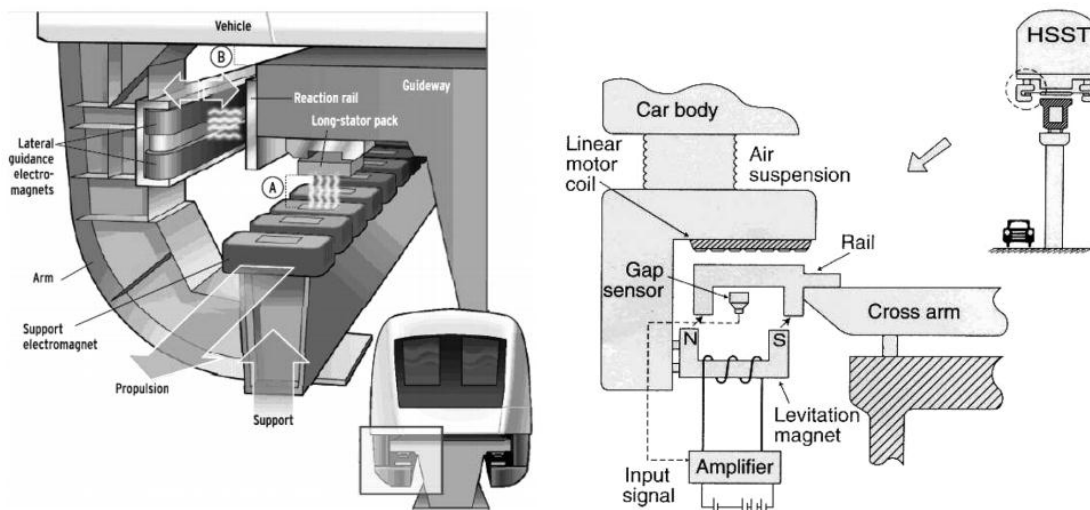


Figura 2.16: Detalle del *Transrapid* (izquierda) y sistema guía del HSST (derecha).

2.2.2 Proyectos de trenes MAGLEV

Desde 1960 la tecnología MAGLEV se ha estado investigando y desarrollando en países como Alemania y Japón. El *Transrapid* de China y el HSST en Japón han estado en operación desde el 2003 y 2005 respectivamente. Estados Unidos, Suiza y Corea del Sur tienen proyectos MAGLEV en fase de aprobación.

La tabla 2.2 muestra algunos de los proyectos que están en operación y en preparación [16].

	HSST (Japón)	<i>Transrapid</i> (Alemania)	MLX (Japón)
Levitación	SEM	SEM	MSC-SED
Propulsión	MIL-PC	MSL-SC	MSL-SC
Espacio de aire	8-12 mm	8-12 mm	80-150 mm
Velocidad Máxima	100 km/h	500 km/h	581 km/h
Servicio	Baja velocidad Corta distancia Nagoya, Japón	Alta velocidad Larga distancia Shanghái, China	Alta Velocidad Larga Distancia No implementado

	UTM (Corea del Sur)	<i>Swissmetro</i> (Suiza)	<i>Inductrack</i> (EE.UU.)
Levitación	SEM	SEM	MP-SED
Propulsión	MIL-PC	MSL-SC o PC	MSL-SC
Espacio de aire	8-12 mm	18-22 mm	80-150 mm
Velocidad Máxima	110 km/h	500 km/h	500 km/h
Servicio	Baja velocidad Corta distancia No implementado	Alta velocidad Larga distancia No implementado	Alta Velocidad Larga Distancia No implementado

Tabla 2.2: Proyectos de trenes MAGLEV en ejecución y en preparación.

2.3 MÁQUINAS DE INDUCCIÓN

La máquina de inducción o asíncrona es la máquina más empleada en aplicaciones industriales, desplazando al motor de corriente continua, debido a su fácil construcción, menor tamaño y poco mantenimiento.

2.3.1 Estator

El estator está compuesto de láminas de acero aisladas entre sí con el propósito de reducir las pérdidas en el núcleo. Los enrollados están alojados en ranuras axiales.



Figura 2.17: Estator de una máquina asíncrona.

El principio básico de funcionamiento del motor de inducción es la generación de un campo magnético rotatorio en el estator debido a que se alimenta con corriente alterna tres enrollados ubicados físicamente 120° uno respecto del otro.

De esta forma se origina un flujo sinusoidal cuya dirección coincide con el eje de los enrollados y por lo tanto una fuerza magnetomotriz (F_e) para cada fase.

Para el caso de dos polos.

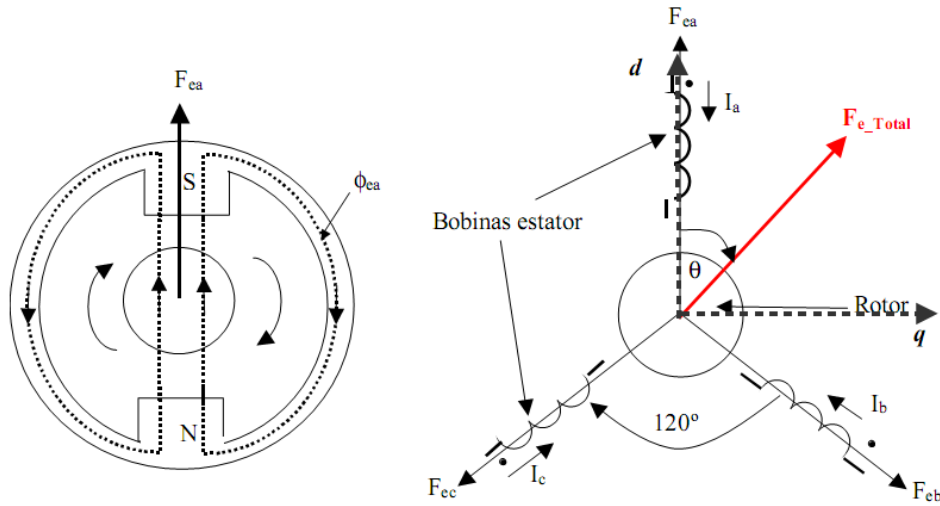


Figura 2.18: Estator de dos polos

La fuerza magnetomotriz está dada por:

$$F_{ea} = Ni_a \quad (2.1)$$

$$F_{eb} = Ni_b \quad (2.2)$$

$$F_{ec} = Ni_c \quad (2.3)$$

N es el número de vueltas de los enrollados. Estas fuerzas se encuentran separadas 120° grados entre ellas según la disposición de los enrollados.

Si se considera un sistema de referencia $d-q$, en el que el eje d es paralelo al eje de la bobina de la fase a y si además se define:

$$i_a = I_M \cos(\omega t) \quad (2.4)$$

$$i_b = I_M \cos(\omega t - 120^\circ) \quad (2.5)$$

$$i_c = I_M \cos(\omega t + 120^\circ) \quad (2.6)$$

La fuerza magnetomotriz total proyectada en el eje d es:

$$F_d = NI_M [\cos(\omega t) + \cos(\omega t - 120^\circ) + \cos(\omega t + 120^\circ)] \quad (2.7)$$

Lo que se puede simplificar a:

$$F_d = \frac{3}{2} NI_M \cos(\omega t) \quad (2.8)$$

Realizando el mismo procedimiento para el eje q , se obtiene:

$$F_q = \frac{3}{2} N I_M \sin(\omega t) \quad (2.9)$$

Luego la fuerza magnetomotriz tiene magnitud y velocidad angular constante, equivalente a la frecuencia de alimentación ($\omega = 2\pi f$).

Para un mayor número de polos p , se concluye que 180° eléctricos corresponden a $(180/p)^\circ$ geométricos (disposición de los enrollados). La fuerza magnetomotriz sigue teniendo la misma magnitud, pero la velocidad del campo magnético rotatorio varía con el número de polos según la ecuación (2.10).

$$\omega_s = \omega \cdot \frac{2}{p} \quad (2.10)$$

Expresado en revoluciones por minuto se tiene la velocidad síncrona n_s [19].

$$n_s = \frac{120 \cdot f}{p} \quad (2.11)$$

n_s	Velocidad síncrona en rpm
f	Frecuencia de la corriente alterna en Hz
p	Número de polos de la máquina

2.3.2 Rotor

El rotor también está compuesto por láminas de acero. Puede ser embobinado al igual que el estator o del tipo jaula de ardilla, en el que hay barras conductoras en las ranuras del rotor cortocircuitadas entre sí en los extremos por anillos conductores.



Figura 2.19: Rotor tipo jaula de ardilla de una máquina de inducción

En el rotor se inducen corrientes desde el estator a las bobinas cortocircuitadas, lo que también genera un campo magnético rotatorio que gira en el mismo sentido que el campo magnético del estator y consecuentemente produce una fuerza tangencial, originando un torque en el eje de la máquina y permitiendo el movimiento.

2.3.3 Deslizamiento

Si la velocidad de giro del eje es n_m , necesariamente ésta debe ser distinta a la síncrona para que se produzca un torque, por lo tanto la velocidad del campo rotatorio del rotor es $(n_s - n_m)$. Esta diferencia respecto de la velocidad síncrona es el deslizamiento.

$$s = \frac{n_s - n_m}{n_s} \quad (2.12)$$

s indica el comportamiento de la máquina de inducción: si la velocidad mecánica es menor que la síncrona ($0 < s < 1$), entonces la máquina opera como motor. Si la velocidad es mayor que la síncrona ($s > 1$) opera como generador. Finalmente si el eje gira en sentido inverso ($n_m < 0$) el deslizamiento es mayor a 1 y se dice entonces que la máquina opera como freno.

2.3.4 Modelo equivalente

Una máquina de inducción corresponde a un sistema trifásico equilibrado, por lo que sólo basta obtener el modelo circuital de una fase para entender su comportamiento.

El modelo es muy parecido al del transformador monofásico, considerando el estator como el primario y el rotor como el secundario. La diferencia es que se hace necesario un ajuste de las frecuencias de las variables eléctricas del rotor debido al deslizamiento. Puede suponerse que el transformador es un caso particular en que la máquina se encuentra detenida.

El modelo equivalente exacto de una máquina de inducción se muestra en la figura 2.20 [20].

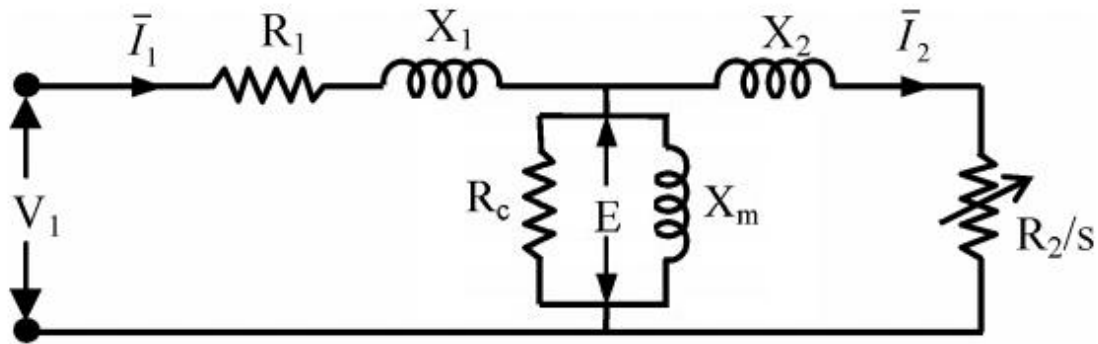


Figura 2.20: Modelo equivalente exacto de una máquina de inducción.

V_1	Tensión fase neutro de entrada
E	Tensión en la rama <i>shunt</i>
I_1	Corriente por el estator
I_2	Corriente por el rotor
R_1	Resistencia de los enrollados del estator
X_1	Reactancia de los enrollados del estator
R_2	Resistencia de los enrollados del rotor referidos al estator
X_2	Reactancia de los enrollados del rotor referidos al estator
R_c	Resistencia del núcleo
X_m	Reactancia de magnetización

2.4 MOTORES DE TRACCIÓN

El motor de corriente continua era la forma preferida para movilizar los trenes, debido a que sus características y fácil control de la velocidad eran suficientes para lo requerido. Por esto incluso cuando la línea de alimentación era de corriente alterna, las locomotoras tenían estos motores.

El desarrollo del tiristor de potencia en la década del 60 permitió el auge de la tracción con motores de corriente alterna, siendo el motor de inducción el más usado.

Actualmente el avance en la electrónica de potencia ha permitido un control más eficiente de los motores, lo que mejora la capacidad tractiva. Entre sus características se destaca:

- Velocidades máximas altas.
- Gran desempeño con poco mantenimiento.
- Torque uniforme.
- Alta razón potencia/peso.
- Baja razón costo/potencia.
- Operación en alta tensión.
- Capacidad de freno regenerativo.
- Característica pronunciada torque-velocidad.
- Operación estable en conexión paralela.

Los motores de tracción se alimentan a través de un variador de frecuencia y voltaje (VVVF) que permite el control y modificación de la curva torque-velocidad [21].

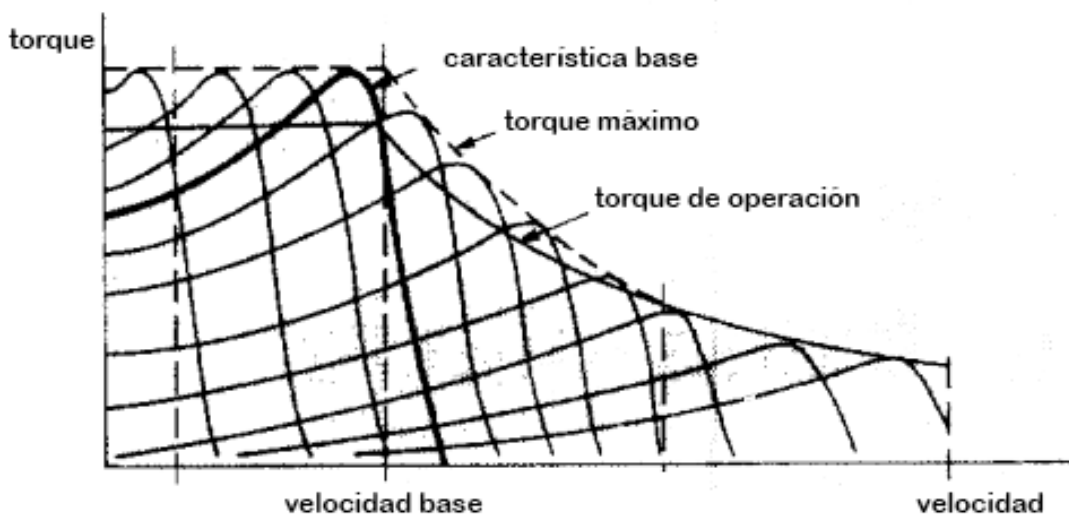


Figura 2.21: Curvas torque-velocidad a frecuencia y voltaje variables

A pesar de tener gran control sobre el rango de velocidades disponibles, siguen existiendo problemas de operación principalmente por armónicos en la tensión de alimentación, debido a la forma no sinusoidal.

La estrategia de control más usada es manteniendo constante el cociente entre tensión y frecuencia para no saturar el núcleo de la máquina y evitar calentamiento excesivo.

En la figura 2.22 se muestra un esquema de bloques para trenes movilizadas por motores de corriente alterna alimentados a través de una catenaria monofásica de alto voltaje.

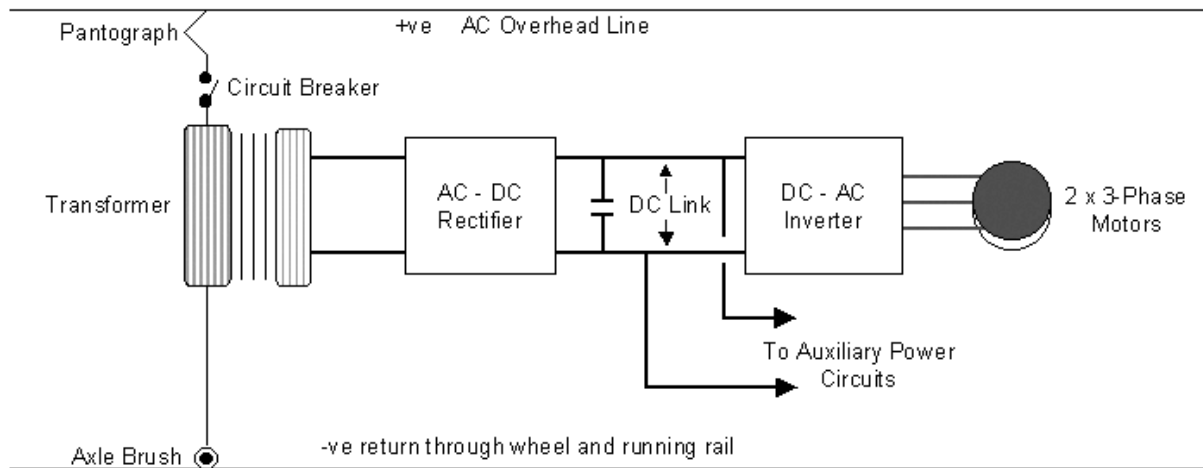


Figura 2.22: Esquema de bloques de una locomotora eléctrica

Dentro del rectificador e inversor se encuentran IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) los cuales pueden ser encendidos o apagados con baja corriente, a diferencia de los tiristores GTO (*Gate Turn Off*). Pueden cambiar de estado tres a cuatro veces más rápido, reduciendo el calor generado, el ruido, altos armónicos en la tensión y permitiendo así la construcción de dispositivos más pequeños y ligeros. El primer tren en usar IGBT fue el *Shinkansen 700*.

El próximo paso en el desarrollo de motores de tracción es el motor de imanes permanentes, consiguiendo mejoras en el rendimiento y disminución de tamaño para una misma potencia de salida [22].

En la figura 2.23 se compara un motor de corriente continua del *Shinkansen* serie 0, un motor asíncrono del *Shinkansen* serie 300 y un motor síncrono de imanes permanentes [12].



Figura 2.23: Comparación de tres motores de distintos *Shinkansen*.

CAPÍTULO 3. IMPLEMENTACIÓN EN CHILE

3.1 DINÁMICA DEL TREN

3.1.1 Ecuación del movimiento

La ley de Newton indica que la aceleración multiplicada por la masa es igual a la fuerza aceleratriz. En el caso del tren es el resultado del esfuerzo tractivo y la resistencia al avance, ambas a una velocidad determinada. Para poder acelerar es necesario que las fuerzas tractivas sean superiores a las resistivas y si se igualan, la velocidad se mantiene constante.

$$M' \cdot a = F_{ac} = F_t - \sum R_i \quad (3.1)$$

M'	Masa del tren corregida por efectos inerciales
F_{ac}	Fuerza de aceleración
F_t	Fuerza de tracción
R_i	Fuerzas de resistencia

La masa corregida o inercial se debe a que cuando el tren aumenta o disminuye su velocidad no sólo es preciso aumentar la velocidad de traslación, también es necesario aumentar la velocidad de rotación de las diversas masas giratorias, como las ruedas, los ejes o los discos de freno.

$$M' = M + \sum M_{gi} \cdot \left(\frac{r_i}{R_i}\right)^2 \quad (3.2)$$

M	Masa del tren en t
M_{gi}	Masa de un cuerpo giratorio en t
r_i	Radio de inercia polar en m
R_i	Radio de giro en m

Expresando la fuerza en decanewtons daN, la masa inercial en toneladas t y la aceleración en m/s^2 se tiene $F_{ac} = M' \cdot a \cdot 0,01$ [23].

3.1.2 Fuerzas longitudinales, resistencia al avance

En un tren actúan distintas fuerzas durante el movimiento. Estas son longitudinales, verticales y horizontales de acuerdo al sistema de coordenadas de la figura 3.1. Para el estudio de la dinámica la más importante es la componente longitudinal [23].

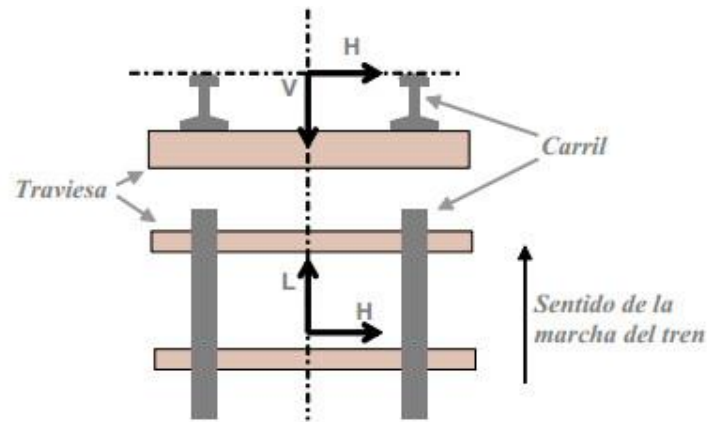


Figura 3.1: Sistema de coordenadas para la dinámica del tren.

Estas fuerzas son de dos tipos:

- Pasivas: El tren no tiene influencia en ellas. Estas son la resistencia al avance en recta, resistencia debido a las curvas y la fuerza gravitatoria.
- Activas: Derivan de las acciones del propio tren. Estas son la tracción y el frenado.

La resistencia al avance se denomina a la resultante de las fuerzas que actúan contra el sentido de avance del tren, dependen de su peso y velocidad. Las más importantes son:

- Rozamiento entre las ruedas y los carriles.
- Rozamientos internos de las partes móviles y giratorias del tren.
- Resistencia por entrada de aire destinado a refrigeración de los motores y por aire acondicionado.
- Resistencia aerodinámica por presión y fricción.

La fórmula para calcularla es la mostrada en la ecuación (3.3) [24]:

$$R_{ar} = (a_1 \cdot M) + (a_2 \cdot n) + \frac{Q \cdot \rho}{3,6 \cdot 10} \cdot v + C \cdot T_f \cdot (v - v_w \cos \alpha)^2 \quad (3.3)$$

R_{ar}	Resistencia al avance en recta en daN
a_1	Coefficiente de resistencia mecánica al avance por unidad de masa en daN/t
M	Masa del tren en t
a_2	Coefficiente de resistencia mecánica al avance por número de ejes en daN/eje
n	Número de ejes del tren
Q	Flujo de aire que entra en el tren por refrigeración y acondicionamiento en m ³ /s

- ρ Densidad del aire (1,29 kg/m³)
- v Velocidad del tren en km/h
- C Coeficiente del término aerodinámico de la resistencia al avance
- T_f Factor de túnel, adimensional y depende de la sección del tren, del túnel y de la velocidad, típicamente varía entre 1,2 y 2
- v_w Velocidad absoluta del viento en km/h
- α Ángulo que forma la dirección del viento con el tren

3.1.2.1 Fórmula de Davis

Una forma más sencilla para obtener la resistencia al avance es conocida como fórmula de Davis, debido a los ensayos logrados por W.J. Davis Jr. de General Electric [25].

$$r_{ar} = 0,65 + \frac{13,2}{m} + K_1 \cdot v + \frac{K_2 \cdot s}{m \cdot n} \cdot v^2 \quad (3.4)$$

- r_{ar} Resistencia al avance en recta específica en daN/t
- m Masa por eje en t
- n Número de ejes del tren
- v Velocidad en km/h
- s Superficie frontal del tren en m²

Los coeficientes K_1 y K_2 dependen del tipo de equipo.

Tipo	K_1	K_2
Automotor	0,0140	0,00430
Locomotora Eléctrica o Diesel	0,00932	0,00453
Carros remolcados	0,01398	0,00094
Coches remolcados	0,0093	0,00064

Tabla 3.1: Valores de K_1 y K_2 de la fórmula de Davis.

Reduciendo la ecuación a tres constantes

$$r_{ar} = a + b \cdot v + c \cdot v^2 \quad (3.5)$$

En este caso

- $a = 0,65 + \frac{13,2}{m}$ Representa el rozamiento entre rueda y riel, así como los rozamientos internos
- $b = K_1$ Representa el rozamiento por entrada de aire
- $c = \frac{K_2 \cdot s}{m \cdot n}$ Representa la resistencia aerodinámica

La fórmula de Davis es modificada de acuerdo al tipo de tren y compañía que lo fabrican. Debe tomarse en cuenta que este polinomio es un modelo ajustado de fenómenos muy complejos, por lo que para propósitos generales es una buena aproximación.

3.1.2.2 Resistencia debido a curvas

Al avanzar el tren sobre una curva se presenta una fuerza longitudinal resistente por efecto de tres causas.

- Solidaridad entre ruedas y ejes.
- Paralelismo de los ejes.
- Fuerza centrífuga.

En los ejes montados las ruedas son solidarias con los ejes y esto hace que giren a la misma velocidad angular, pero la rueda externa recorre una curva de mayor longitud. Esta resistencia no aparece en los casos en que las ruedas son libres.

El paralelismo de los ejes de un bogie obliga a que se deslice transversalmente para que la rueda se adapte a la vía. En los bogies blandos esta resistencia no tiene incidencia [23].

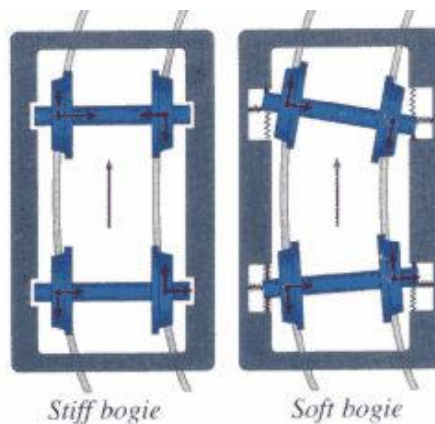


Figura 3.2: Comparación entre un bogie convencional y un bogie blando.

La forma de obtener esta resistencia es con la fórmula de Desduit [25].

$$r_c = \frac{500 \cdot T}{R} \quad (3.6)$$

- r_c Resistencia debido a curvas en daN/t
 T Distancia entre las caras internas de los rieles o trocha en m
 R Radio de la curva en m

3.1.2.3 Resistencia debido a la gravedad

La fuerza de gravedad aumenta o disminuye la resistencia al avance de acuerdo a si la gradiente es en subida (rampa) o en bajada (pendiente).

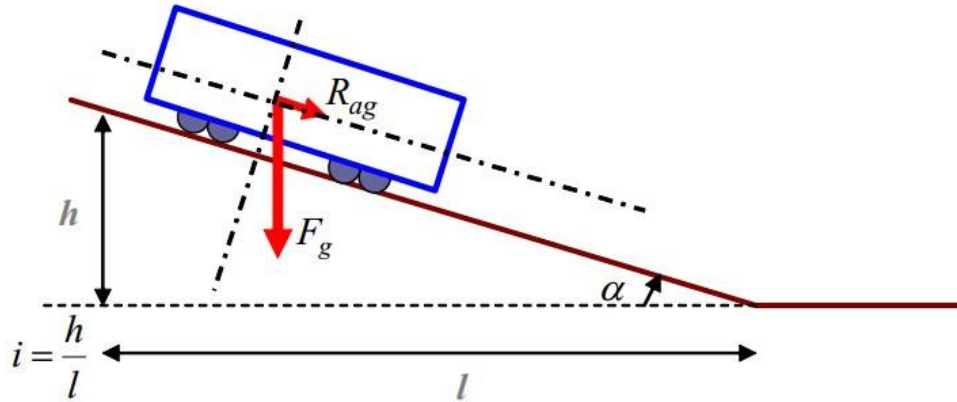


Figura 3.3: Resistencia debido a la gravedad

Se obtiene de la siguiente forma:

$$R_g = F_g \cdot \text{sen } \alpha = \frac{F_g \cdot \tan \alpha}{\sqrt{1 + \tan^2 \alpha}} = \frac{F_g \cdot i}{\sqrt{1 + i^2}} \cong F_g \cdot i \quad (3.7)$$

Para expresarlo en daN/t

$$r_g = \frac{F_g \cdot i}{M \cdot 10} = \frac{M \cdot g \cdot i}{M \cdot 10} \cong i \quad (3.8)$$

i es la gradiente en unidades por mil ‰ o milímetros por metro mm/m.

La representación gráfica de la resistencia al avance en función de la velocidad forma una familia de curvas paralelas entre sí de acuerdo a si el tren está circulando en terrenos con gradiente.

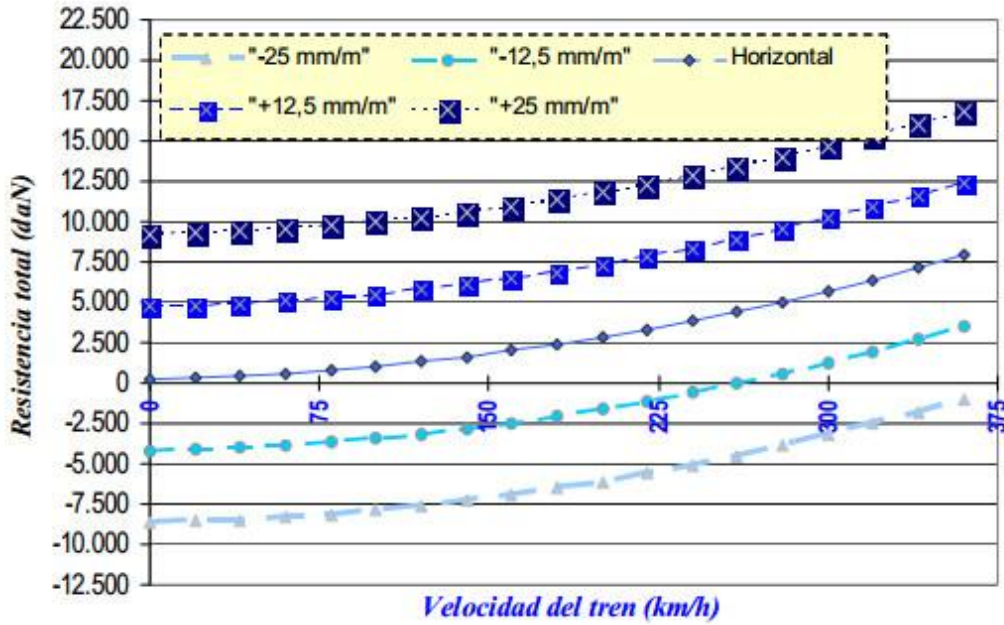


Figura 3.4: Gráfica de la resistencia al avance del Talgo 350 para distintos gradientes.

Es frecuente combinar la resistencia debido a curvas y la resistencia por gravedad en un valor denominado gradiente ficticia. El valor de la gradiente i es positivo o negativo dependiendo de si existe una rampa o una pendiente [23].

$$i' = \pm i + \frac{500 \cdot T}{R} \quad (3.9)$$

Para el cálculo de condiciones de máximo esfuerzo se considera que si en un sentido de circulación hay una rampa, en el sentido contrario hay una pendiente. Por ello se debe tomar el mayor valor entre ambas situaciones.

La resistencia al avance total R_{at} es la suma de la resistencia al avance en recta y la gradiente específica.

$$R_{at} = A + B \cdot v + C \cdot v^2 + i' \cdot M \quad (3.10)$$

3.1.2.4 Resistencia al avance en el arranque

Para arrancar, el tren tiene que realizar una fuerza de tracción superior a la resistencia al avance en $v = 0$. En estas condiciones sólo está presente la resistencia mecánica y por gradiente, si es que hubiera alguna. Estas dos componentes son proporcionales a la masa del tren.

La resistencia específica al arranque r_{a0} incluye el esfuerzo necesario para iniciar el movimiento del tren a bajas velocidades y para acelerarlo. Se estima que se necesita 4 daN/t para empezar a moverse y 3 daN/t para acelerar.

La tabla 3.2 muestra valores de resistencia específica al arranque en función de la rampa.

i mm/m	r_{a0} daN/t
Hasta 15	7
15-20	8
21-25	9
26-29	10
30-33	11
34-37	12
38-41	13
42-45	14
Más de 45	15

Tabla 3.2: Resistencia específica al arranque para distintos valores de rampa.

Al esfuerzo necesario para superar esta resistencia hay que agregar el utilizado para vencer la fuerza de gravedad de la rampa, que coincide numéricamente en daN/t con el valor de la gradiente en mm/m de acuerdo con la ecuación (3.8). Por ejemplo para una rampa de 16 mm/m, el esfuerzo específico para el arranque es $16 \text{ daN/t} + 8 \text{ daN/t} = 24 \text{ daN/t}$ [23].

3.1.2.5 Influencia de cada componente de la resistencia al avance

La resistencia al avance depende de muchos factores como ya se ha descrito, sin embargo algunos de ellos tienen mayor relevancia. En la figura 3.5 se presenta la resistencia al avance del tren de alta velocidad español *Talgo 350* en una rampa de 11,2 mm/m.

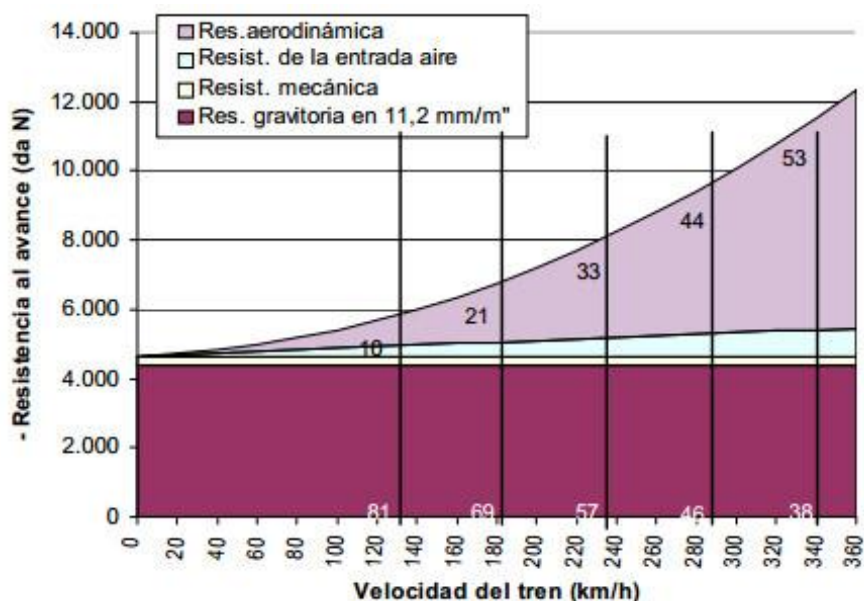


Figura 3.5: Peso relativo de los factores de la resistencia al avance.

Aunque la componente aerodinámica aumenta con el cuadrado de la velocidad, el conjunto varía de forma muy dependiente de las gradientes.

Actualmente los trenes de alta velocidad tienen resistencias al avance menores con respecto a la misma velocidad en los trenes de pasajeros clásicos. Sin embargo a velocidades superiores a 200 km/h el valor aumenta de forma pronunciada [23].

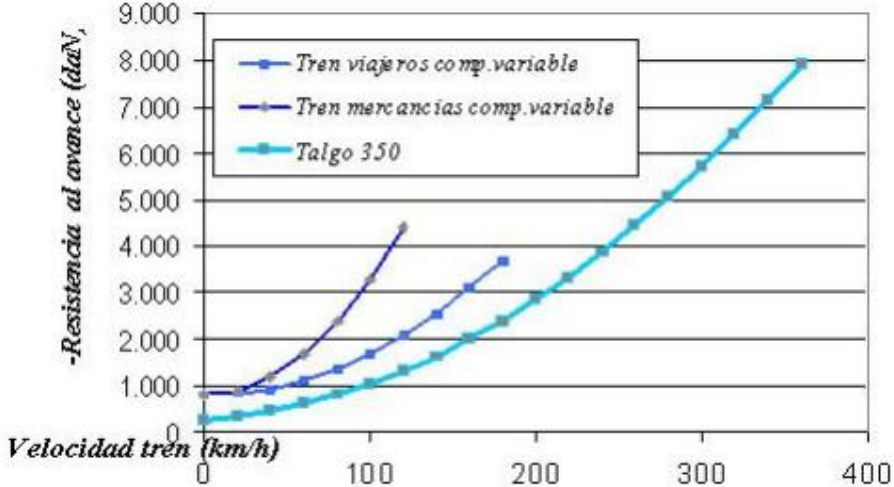


Figura 3.6: Comparación entre trenes clásicos y el Talgo 350.

3.1.3 Esfuerzo de tracción

El esfuerzo de tracción F_t se propaga a través de las ruedas motoras al apoyarse sobre el riel y transmitir el torque que los motores generan.

Es diferente para cada vehículo, el que normalmente se entrega con la curva que representa el esfuerzo de tracción máximo posible en función de la velocidad. Está muy ligada a la potencia de los motores, siendo 80% a 90% aprovechada para la tracción eléctrica, lo que se representa por el coeficiente de rendimiento mecánico η_m [23].

$$F_t = \frac{P_{el} \cdot 100 \cdot 3.6 \cdot \eta_m}{v} \quad (3.11)$$

F_t	Esfuerzo de tracción en daN
P_{el}	Potencia eléctrica en kW
η_m	Rendimiento mecánico
v	Velocidad en km/h

En los trenes eléctricos modernos los servicios auxiliares se alimentan directamente de la catenaria, de esta manera la potencia entregada por los motores es usada íntegramente en la tracción. En la figura 3.7 se presenta el diagrama eléctrico del tren AVE 103 [26].

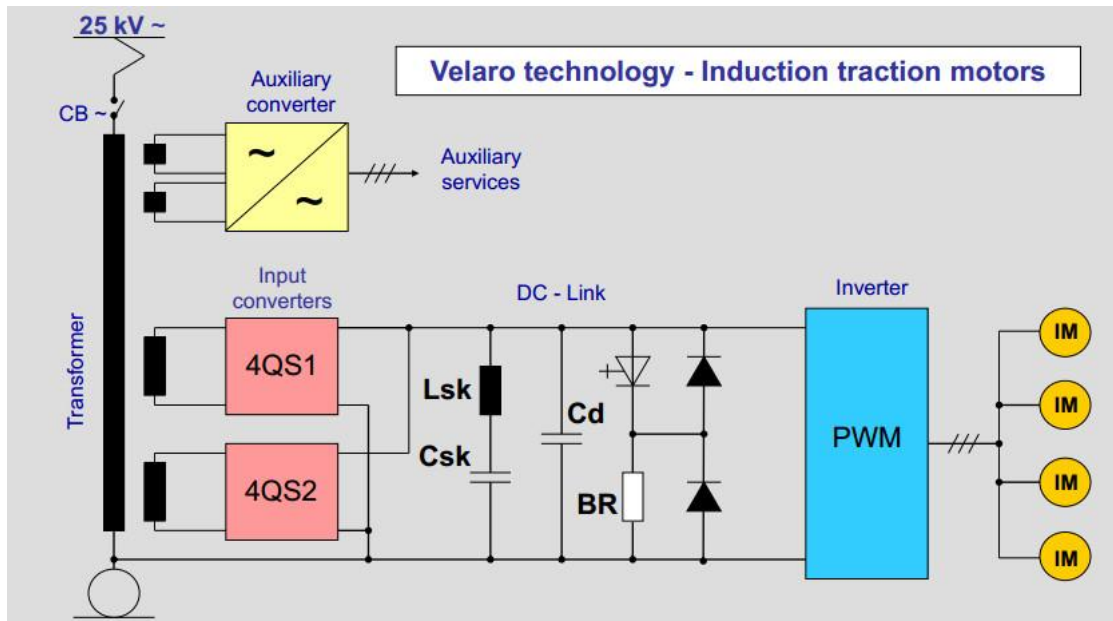


Figura 3.7: Diagrama eléctrico del tren AVE 103.

3.1.4 Adherencia

Las fuerzas presentes en las ruedas de los trenes se ven en la figura 3.8.

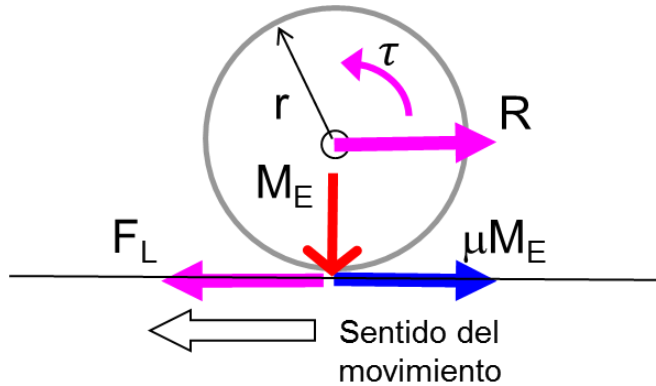


Figura 3.8: Fuerzas presentes en la rueda.

- M_E Peso aplicado por la rueda contra el riel
- τ Torque transmitido por el motor
- r Radio de la rueda
- F_L Fuerza aplicada por el riel en la llanta o fuerza de adherencia $F_L = M/r$
- R Resistencia al avance

Al aumentar el torque, aumenta la resistencia R y la fuerza F_L hasta alcanzar el límite de adherencia.

$$F_{L\ MAX} = M_E \cdot \mu = m_{ad} \cdot g \cdot \mu \quad (3.12)$$

F_L está expresado en N. μ es el coeficiente de adherencia ($\mu < 1$). Este coeficiente expresa el cociente entre la fuerza máxima que puede transmitir un eje motriz sin que la rueda resbale y la masa que soporta dicho eje m_{ad} . Por ejemplo si la masa que gravita sobre un eje es de 20 t y el coeficiente es 0,25, entonces dicho eje sólo puede transmitir una fuerza horizontal de 5.000 daN, sin importar la potencia del motor [23].

Por ello la adherencia presenta otro límite, además de la potencia disponible, a la fuerza de tracción máxima que puede aplicar una locomotora.

Se pueden dar los siguientes casos [27]:

$F_L \leq R$ y $F_L \leq M_E \cdot \mu$	Inmovilidad sin giro ni translación
$F_L \leq R$ y $F_L > M_E \cdot \mu$	Giro con resbalamiento y sin translación
$F_L > R$ y $F_L > M_E \cdot \mu$	Traslación con resbalamiento
$F_L > R$ y $F_L \leq M_E \cdot \mu$	Traslación sin resbalamiento

Tabla 3.3: Casos posibles en el movimiento del tren.

En velocidades bajas la fuerza de tracción tendería a infinito según la ecuación (3.11), pero en la práctica está limitada por el coeficiente de adherencia, el cual es un valor dictado por los fabricantes de los trenes, variando típicamente entre 0,2 y 0,4.

Se tiene:

$$F_{ad} = m_{ad} \cdot g \cdot \mu \cdot 100 \quad (3.13)$$

F_{ad} está expresada en daN, m_{ad} en toneladas. En el caso de que el vehículo tenga más de un eje, la masa adherente es la masa por eje multiplicado por la cantidad de ejes motrices, la que corresponde al número de motores que traccionan.

Las curvas de adherencia, fuerza de tracción y resistencia al avance se ve en la figura 3.9.

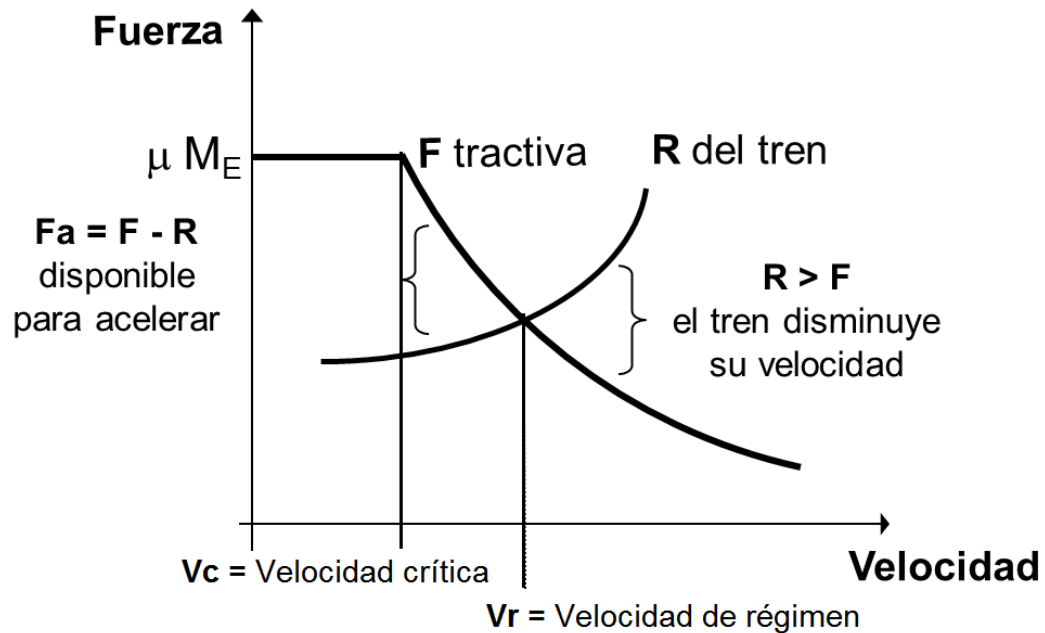


Figura 3.9: Curvas características de un tren

3.1.5 Dinámica del tren en rampas y pendientes

3.1.5.1 Rampas

En la circulación por una rampa actúan sobre el tren las siguientes fuerzas:

- A favor del movimiento del tren: fuerza de tracción.
- En contra del movimiento del tren: resistencia al avance, resistencia a la curva y gradiente de la rampa.

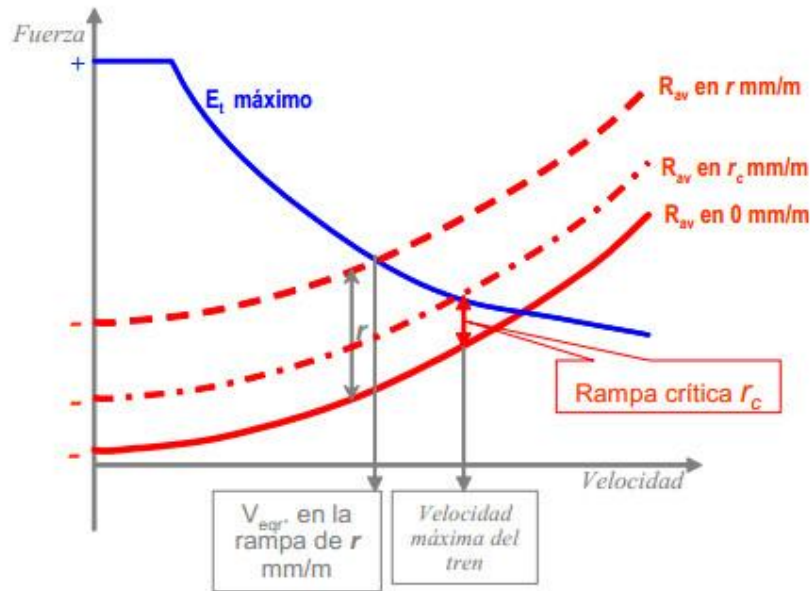


Figura 3.10: Curvas de tracción y resistencia para distintas rampas.

La velocidad de equilibrio v_{egr} corresponde a la velocidad en que la fuerza de tracción es igual a las fuerzas resistentes para una rampa. No hay aceleración y por lo tanto la velocidad es constante.

A un tren con una velocidad máxima de diseño le corresponde una rampa crítica r_c en que las fuerzas de tracción y resistencia se igualan. Si la rampa existente es mayor a la crítica, el tren no puede llegar a la velocidad máxima [23].

3.1.5.2 Pendientes

En la circulación por una pendiente actúan sobre el tren las siguientes fuerzas:

- A favor del movimiento del tren: fuerza de tracción y gradiente de la pendiente.
- En contra del movimiento del tren: resistencia al avance, resistencia a la curva y fuerza de freno.

Suponiendo que el tren entra a la pendiente con la velocidad máxima se pueden dar tres casos:

- 1) La fuerza gravitatoria positiva es menor en valor absoluto a la resistencia al avance negativa. El tren tiende a frenarse y es necesario aplicar tracción para mantener la velocidad.
- 2) La fuerza gravitatoria positiva es mayor en valor absoluto a la resistencia negativa. El tren tiende a acelerarse y es necesario aplicar el freno para evitar que rebase la velocidad máxima.
- 3) Las fuerzas son de magnitud absoluta iguales y el tren viaja con velocidad constante.

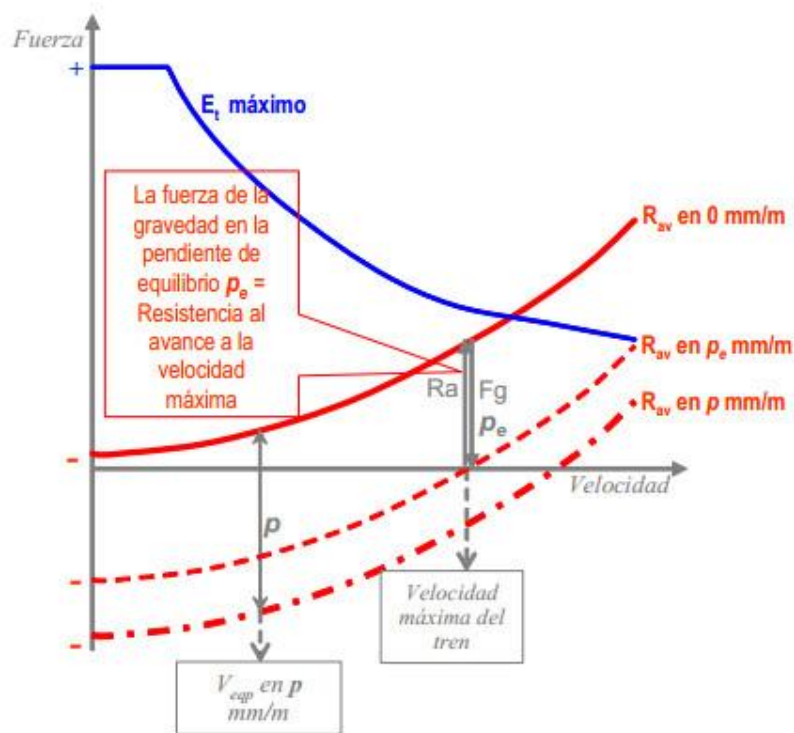


Figura 3.11: Curvas de tracción y resistencia para distintas pendientes.

La pendiente de equilibrio p_e es aquella en que para la velocidad máxima se igualan los valores absolutos de la resistencia al avance y la gradiente.

La velocidad de equilibrio para una pendiente cualquiera p es cuando se iguala la resistencia al avance y la gradiente a esa velocidad.

La rampa crítica depende de la potencia del tren, es directamente proporcional al cociente potencia/masa, mientras que la pendiente de equilibrio no depende de la potencia, sino que de las características constructivas del tren, además de ser directamente proporcional a la velocidad máxima.

En la figura 3.12 se muestran las curvas características del *Talgo* 350 [23].

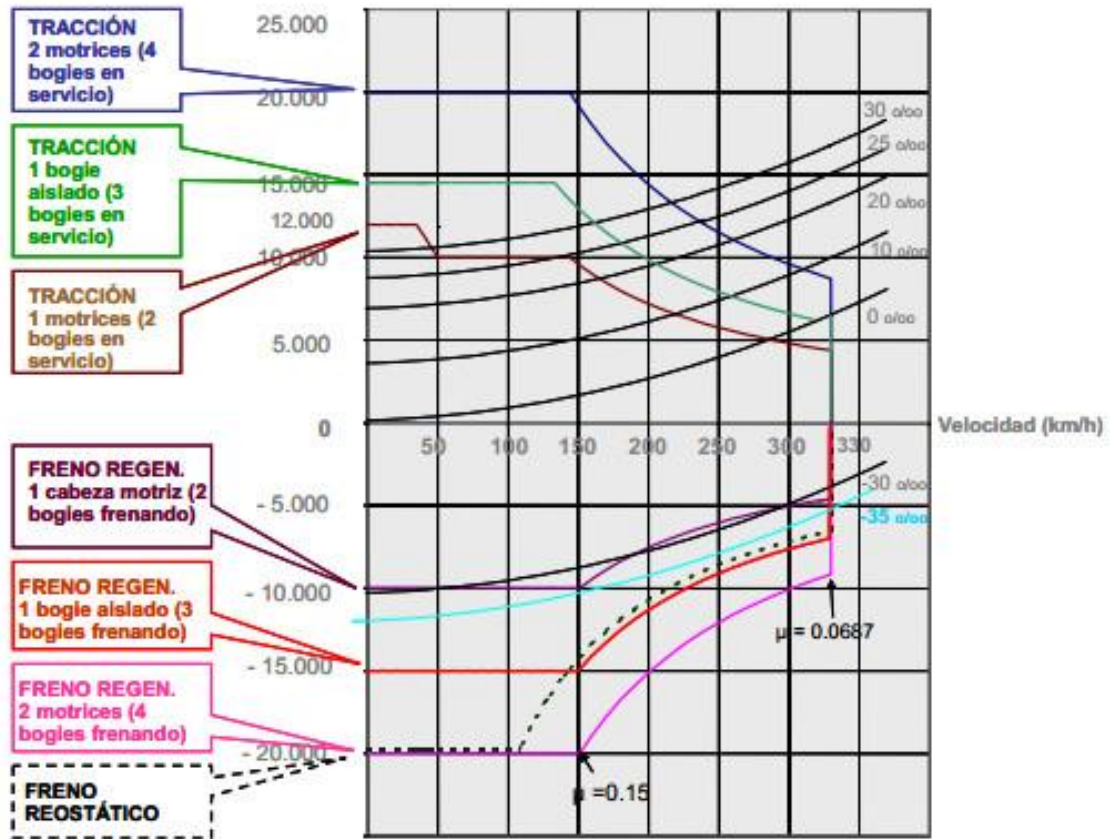


Figura 3.12: Curvas características del *Talgo* 350

3.2 SELECCIÓN DEL RECORRIDO

En 1842 William Wheelwright presentó un proyecto de tren que uniría Valparaíso con Santiago en aproximadamente 8 horas. Nueve años más tarde se creó la Compañía del Ferrocarril de Santiago a Valparaíso (CFSV), una sociedad por acciones con un capital de cuatro mil millones de pesos.

Se pensaron tres trazados posibles para el ferrocarril: la primera pasaba por los puertos de Casablanca y Melipilla, la segunda por el valle del Aconcagua hasta Los Andes y la tercera por las cuevas de Lo Prado y Zapata. La ruta final partía en Valparaíso, pasando por Viña del Mar, Concón, Quillota y llegaba a Santiago por el paso Tabón. El servicio fue inaugurado en 1863 costando más de once millones de pesos [28]. En 1921 se inició la electrificación del recorrido, con corriente continua de 3.000 V.

La apertura del túnel lo Prado y el aumento de uso de automóviles hizo que el viaje en este tren no fuera la opción preferida. A causa del accidente ferroviario de Queronque en el año 1986 el servicio fue suspendido y al año siguiente las funciones de transporte cesaron tras la clausura de la estación Mapocho.



Figura 3.13: Plano del trazado del ferrocarril Santiago-Valparaíso

La ruta seleccionada es el trazado que actualmente usa Ferrocarril Del Pacífico S.A. (FEPASA) para el transporte de carga. Esta ruta es la misma del antiguo ferrocarril de pasajeros con una extensión de 186,5 km.

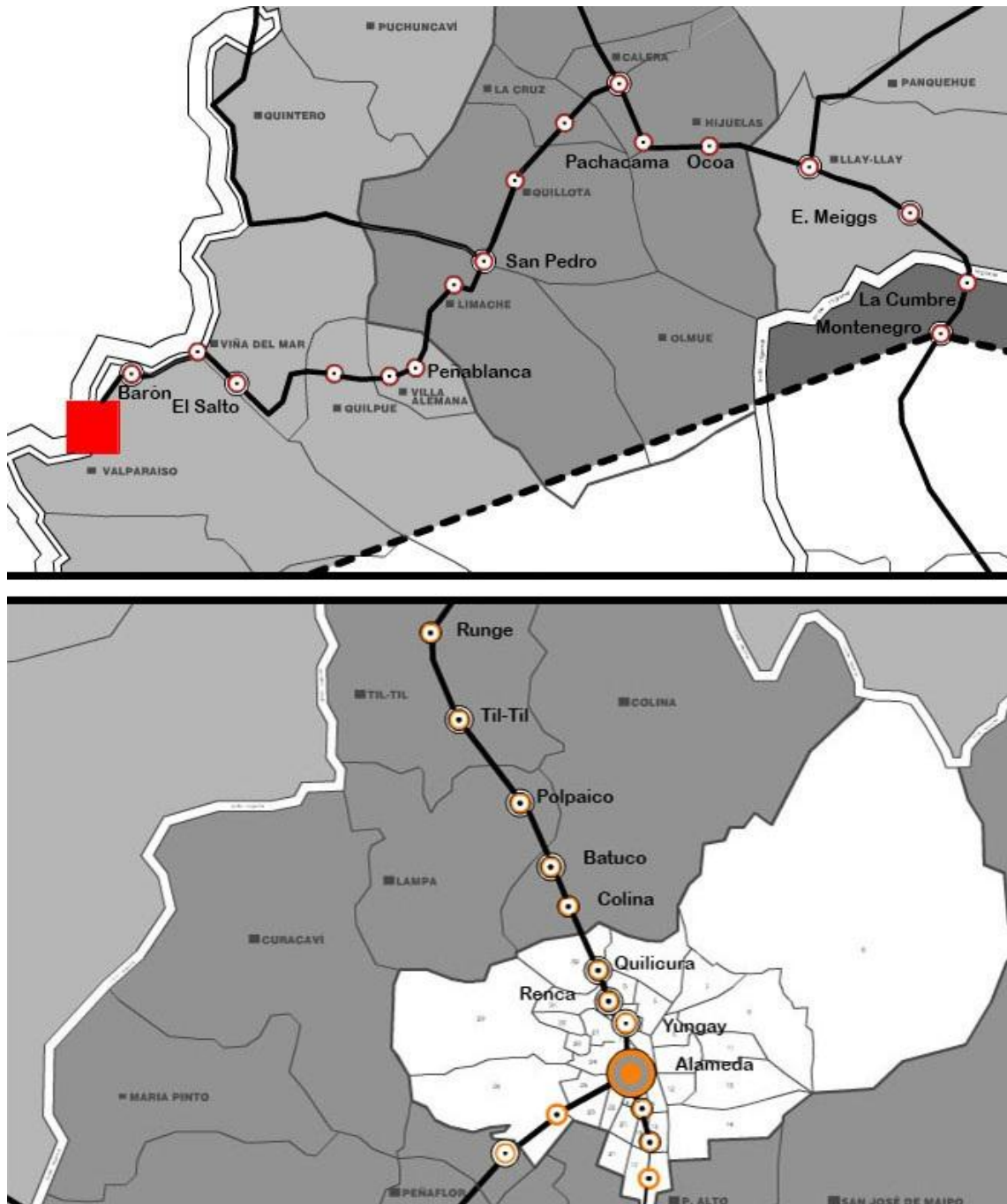


Figura 3.14: Estaciones de la ruta usada por FEPASA.

Las distancias entre estaciones se muestran en la tabla 3.4

	km		km
Alameda	0	Pachacama	111,7
Yungay	2,5	La Calera	118,9
Renca	5,8	La Cruz	124,3
Quilicura	10	Quillota	130,3
Colina	20,3	San Pedro	138,1
Batuco	27,4	Limache	143,7
Polpaico	38,2	Peñablanca	156,4
Til-Til	48,7	Villa Alemana	158,4
Rungue	60,3	Quilpué	165,5
Montenegro	67,5	El Salto	174,3
Enrique Meiggs	80,8	Viña del Mar	178,5
Llay-Llay	92,7	Barón	183,5
Ocoa	105,3	Puerto	186,5

Tabla 3.4: Distancia entre estaciones.

La infraestructura de esta vía no es apta para la circulación de un tren de alta velocidad debido principalmente a no estar electrificada y al bajo radio de las curvas, que resultaría en deslizamiento de las ruedas de acero. Es necesario reformarla desde el principio para una correcta operación. La elección es por la disponibilidad de los datos de esta ruta, necesarios para la especificación de los motores.

El Ministerio de Obras Públicas tiene en su lista de iniciativas concesionables un proyecto de tren de alta velocidad que considera la construcción de dos vías y un túnel en el sector de la cuesta Dormida con una longitud estimada de 180 km. Se tiene previsto una vía de pasajeros y una de carga que uniría Santiago con los puertos de Valparaíso y Ventanas [29], [30].

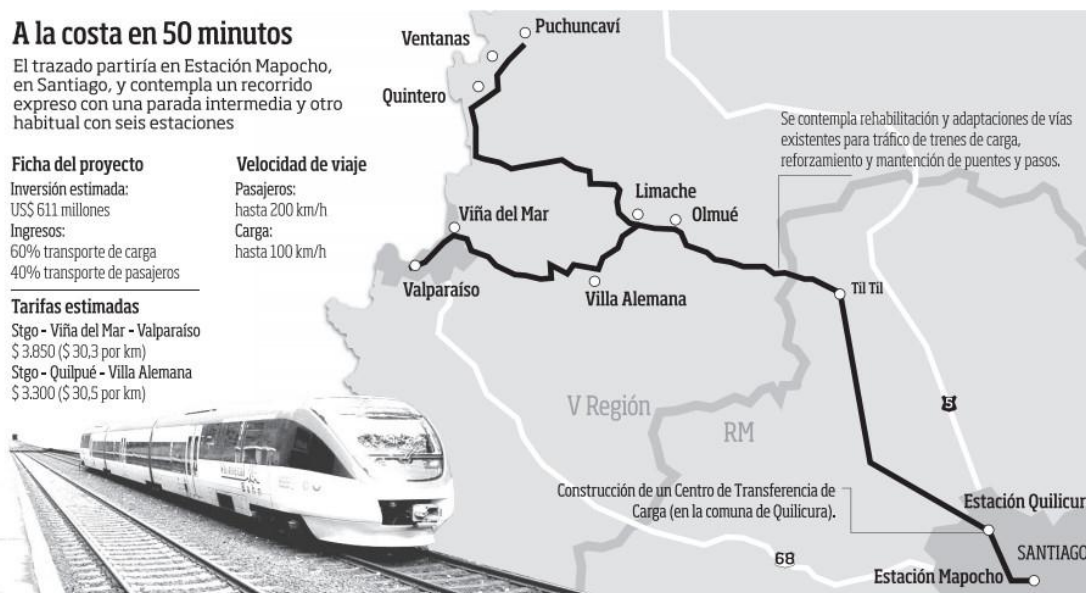


Figura 3.15: Recorrido propuesto por el MOP.

3.3 ESPECIFICACIÓN DE LOS MOTORES

3.3.1 Coeficientes fórmula de Davis

En la tabla 3.5 se resumen datos de relevancia para algunos trenes de alta velocidad.

	Ancho [m]	Alto [m]	S [m ²]
<i>Shinkansen serie 0</i>	3,383	4,49	15,190
<i>Shinkansen serie 300</i>	3,38	4,44	15,007
<i>Shinkansen serie 700</i>	3,38	3,69	12,472
<i>Shinkansen serie N700</i>	3,36	3,6	12,120
<i>TGV Sud-Est</i>	2,81	3,42	9,610
<i>TGV Réseau</i>	2,9	3,42	9,918
<i>TGV Atlantique</i>	2,9	3,45	10,005
<i>TGV Dúplex</i>	2,9	3,9	11,310
<i>AVE serie 100</i>	2,904	4,28	12,429
<i>Talgo 350 (serie 102)</i>	2,942	3,365	9,899
<i>AVE serie 103</i>	2,95	3,89	11,476

	Masa t	Nº de ejes	Masa por eje t	Nº de motores
<i>Shinkansen serie 0</i>	967	64	15	64
<i>Shinkansen serie 300</i>	711	64	11,4	40
<i>Shinkansen serie 700</i>	708	64	11,4	48
<i>Shinkansen serie N700</i>	715	64	11,2	56
<i>TGV Sud-Est</i>	385	23	17	12
<i>TGV Réseau</i>	383	22	17,3	8
<i>TGV Atlantique</i>	444	26	17	8
<i>TGV Dúplex</i>	380	22	17	8
<i>AVE serie 100</i>	393	23	17,2	8
<i>Talgo 350 (serie 102)</i>	322	19	17	8
<i>AVE serie 103</i>	425	28	15	16

	Voltaje de alimentación [kV]	Potencia eléctrica unitaria [kW]	Potencia eléctrica total [kW]	Velocidad máxima [km/h]
<i>Shinkansen serie 0</i>	25 @ 60 Hz	185	11.840	220
<i>Shinkansen serie 300</i>	25 @ 60 Hz	300	12.000	270
<i>Shinkansen serie 700</i>	25 @ 60 Hz	275	13.200	285
<i>Shinkansen serie N700</i>	25 @ 60 Hz	305	17.080	300
<i>TGV Sud-Est</i>	25 @ 50 Hz	537,5	6.450	300
<i>TGV Réseau</i>	25 @ 50 Hz	1.100	8.800	320
<i>TGV Atlantique</i>	25 @ 50 Hz	1.100	8.800	300
<i>TGV Duplex</i>	25 @ 50 Hz	1.100	8.800	320
<i>AVE serie 100</i>	25 @ 50 Hz	1.100	8.800	300
<i>Talgo 350 (serie 102)</i>	25 @ 50 Hz	1.000	8.000	330
<i>AVE serie 103</i>	25 @ 50 Hz	550	8.800	350

Tabla 3.5: Datos de trenes de alta velocidad

Los coeficientes de la fórmula de Davis se presentan en la tabla 3.6. Notar que son absolutos, es decir, se encuentran multiplicados por la masa del tren.

	A [daN]	B [daN/(km/h)]	C [daN/(km/h) ²]
<i>Shinkansen serie 0</i>	1.479,51	9,012	0,069
<i>Shinkansen serie 300</i>	1.285,41	6,627	0,068
<i>Shinkansen serie 700</i>	1.279,99	6,599	0,057
<i>Shinkansen serie N700</i>	1.307,43	6,664	0,055
<i>TGV Sud-Est</i>	216,370	2,845	0,049
<i>TGV Réseau</i>	248,567	3,037	0,047
<i>TGV Atlantique</i>	344,544	3,534	0,051
<i>TGV Duplex</i>	242,060	2,869	0,048
<i>AVE serie 100</i>	275,886	3,627	0,047
<i>Talgo 350 (serie 102)</i>	254,380	2,003	0,048
<i>AVE serie 103</i>	311,525	2,231	0,052

Tabla 3.6: Valores de los coeficientes de la fórmula de Davis para diversos TAV.

Los valores correspondientes a los *Shinkansen* se obtuvieron aplicando la ecuación de Davis. Los restantes se encuentran en la fuente [24].

3.3.2 Curvas características para evaluar el desempeño de los trenes

Las curvas que se grafican para evaluar el desempeño de los trenes son:

- Resistencia al avance en horizontal.
- Resistencia al avance gradiente ficticia máxima.
- Curva límite de adherencia.
- Curva fuerza de tracción.

Como estas curvas son dependientes de la velocidad, se fija el máximo de 330 km/h para efectos de cálculo.

3.3.2.1 Resistencia al avance en horizontal

Los valores se definen por aumento unitario de velocidad, utilizando los coeficientes de la fórmula de Davis de la tabla 3.6.

Por ejemplo para el *Shinkansen* N700 a una velocidad de 100 km/h.

$$R_{ar} = 1.307,43 + 6,66 \cdot 100 + 0,05 \cdot 100^2 = 2.521,76 \text{ [daN]} \quad (3.14)$$

3.3.2.2 Resistencia al avance gradiente ficticia máxima

Para evaluar la condición de máximo esfuerzo que los trenes deben soportar, es necesario obtener del recorrido la mayor gradiente ficticia, que se ubica en sentido Valparaíso-Santiago entre las estaciones Enrique Meiggs y Llay-Llay, donde la condición extrema se da para una rampa igual a 23,29 mm/m y radio de curvatura igual a 180 m.

Con la ecuación (3.9) y la trocha de la vía igual a 1,676 m. resulta:

$$i' = 23,29 + \frac{500 \cdot 1,676}{180} = 27,946 \left[\frac{mm}{m} \right] \quad (3.15)$$

Esta combinación de radio y gradiente es con el propósito de especificar los motores y no debe considerarse que el tren eventualmente circule por este trazado, pues no es apto para altas velocidades.

3.3.2.3 Curva límite de adherencia

Se obtiene un valor constante al aplicar la ecuación (3.12) para $\mu=0,25$.

	Fuerza de adherencia [kN]
<i>Shinkansen serie 0</i>	2.353,596
<i>Shinkansen serie 300</i>	1.117,958
<i>Shinkansen serie 700</i>	1.341,550
<i>Shinkansen serie N700</i>	1.537,683
<i>TGV Sud-Est</i>	500,139
<i>TGV Réseau</i>	339,310
<i>TGV Atlantique</i>	333,426
<i>TGV Dúplex</i>	333,426
<i>AVE serie 100</i>	337,349
<i>Talgo 350 (serie 102)</i>	333,426
<i>AVE serie 103</i>	588,399

Tabla 3.7: Valores de la fuerza de adherencia de los TAV seleccionados.

3.3.2.4 Curva fuerza de tracción

El parámetro a determinar es la potencia eléctrica total que los motores asíncronos deben entregar para que el tren se desplace a una velocidad particular. Esta velocidad se establece en 100 km/h para la gradiente ficticia máxima, lo que no implica que el tren se mueva por este tramo a esta velocidad, es con el propósito de ejemplificar el proceso y los cálculos necesarios para especificar los motores.

Con la ecuación (3.11) se calcula la potencia necesaria para viajar a la velocidad deseada, considerando la fuerza de tracción F_t igual a la resistencia en avance total para la gradiente ficticia máxima.

El rendimiento mecánico entre las ruedas y los motores se fija en $\eta_m = 0,85$.

Por ejemplo para el *Shinkansen N700*:

$$R_{at} = 2.521,76 + 27,946 \cdot 715 = 22.503,15 \text{ [daN]} \quad (3.16)$$

$$P_{el} = \frac{100 \cdot 22.503,15}{100 \cdot 3,6 \cdot 0,85} = 12.020,91 \text{ [kW]} \quad (3.17)$$

Con esta potencia se calcula la fuerza de tracción para todos los valores enteros de velocidad entre 0 y 330 km/h.

Las figuras 3.16 a 3.26 muestran las curvas obtenidas para cada tren.

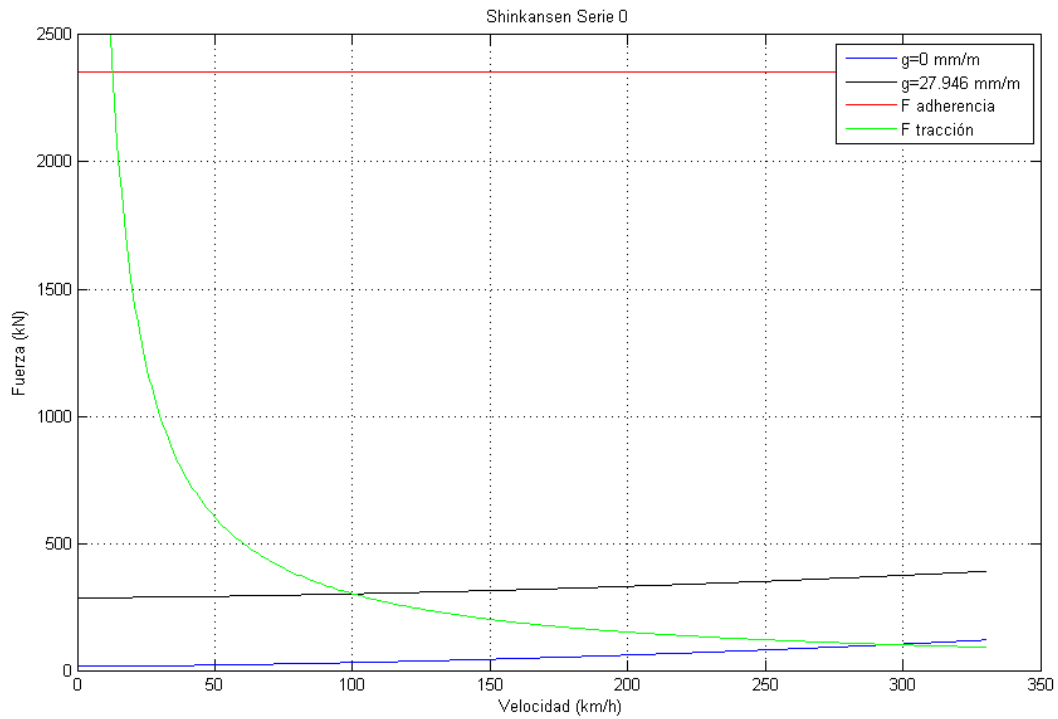


Figura 3.16: Curvas características del *Shinkansen* serie 0.

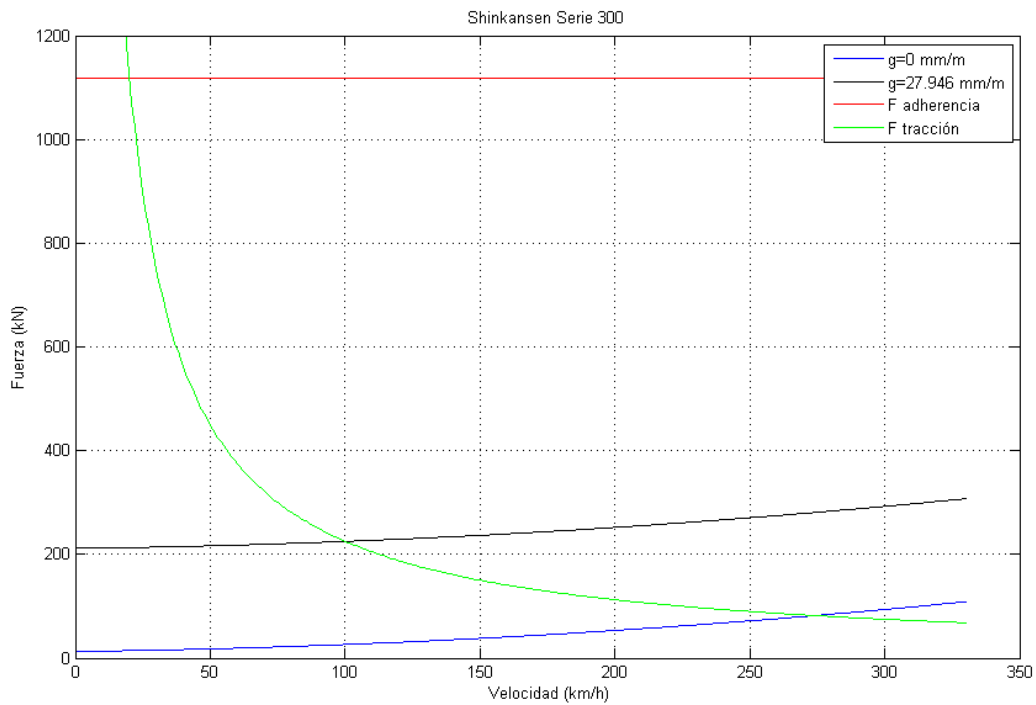


Figura 3.17: Curvas características del *Shinkansen* serie 300.

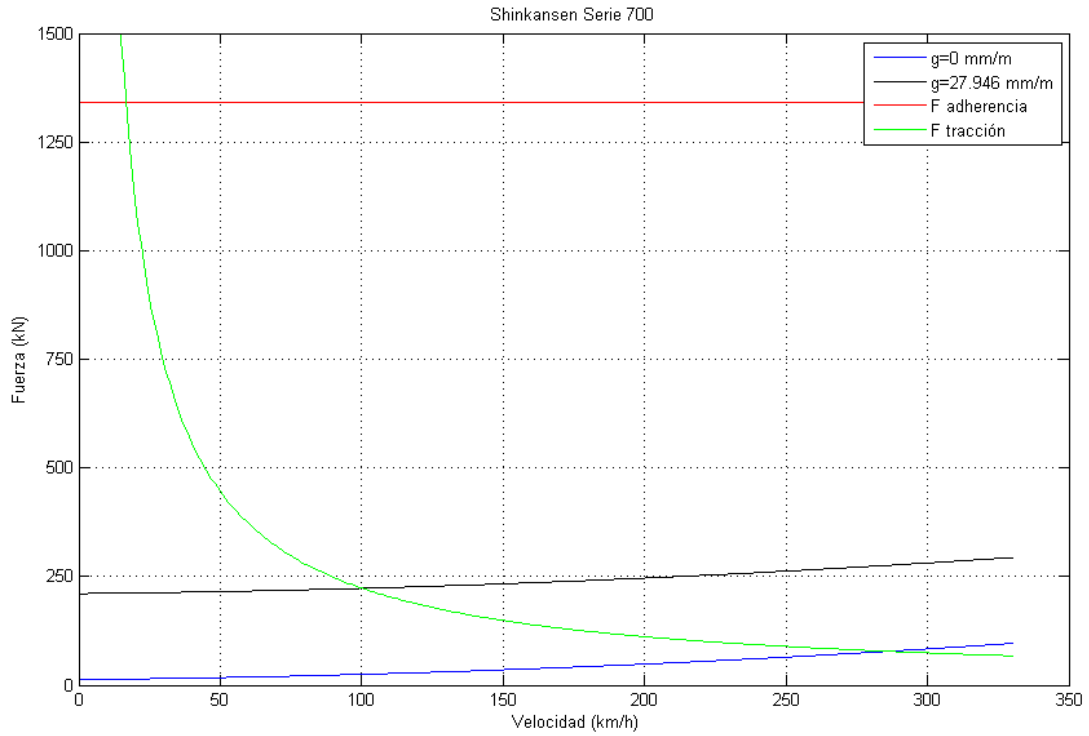


Figura 3.18: Curvas características del *Shinkansen serie 700*.

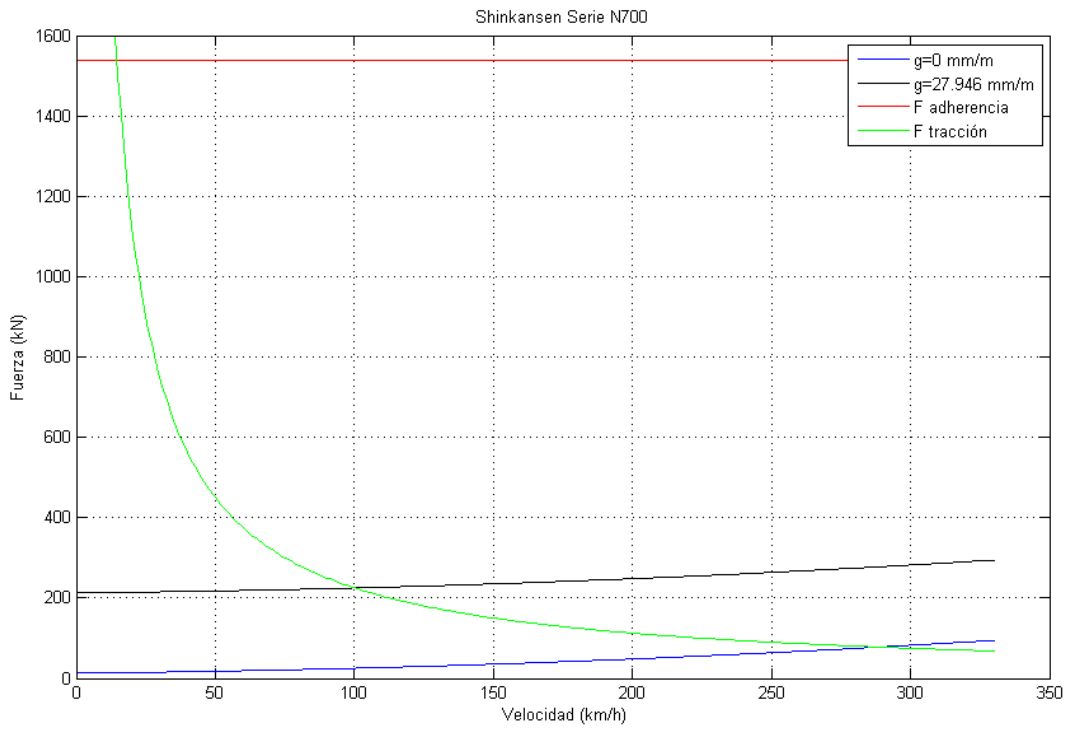


Figura 3.19: Curvas características del *Shinkansen serie N700*.

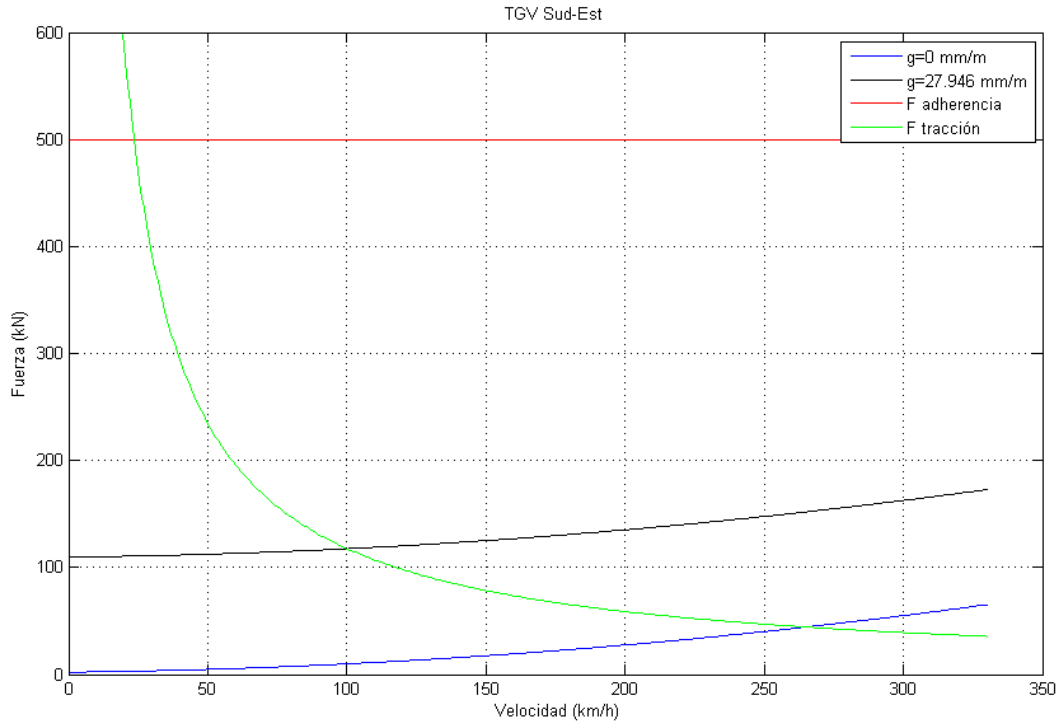


Figura 3.20: Curvas características del TGV *Sud-Est*.

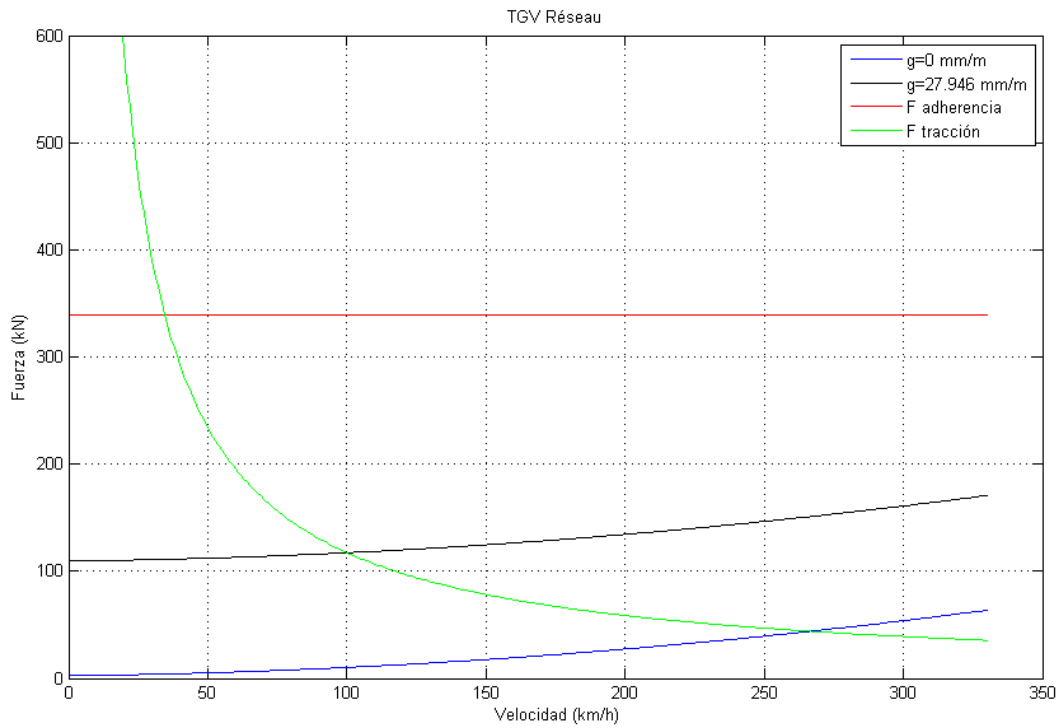


Figura 3.21: Curvas características del TGV *Réseau*.

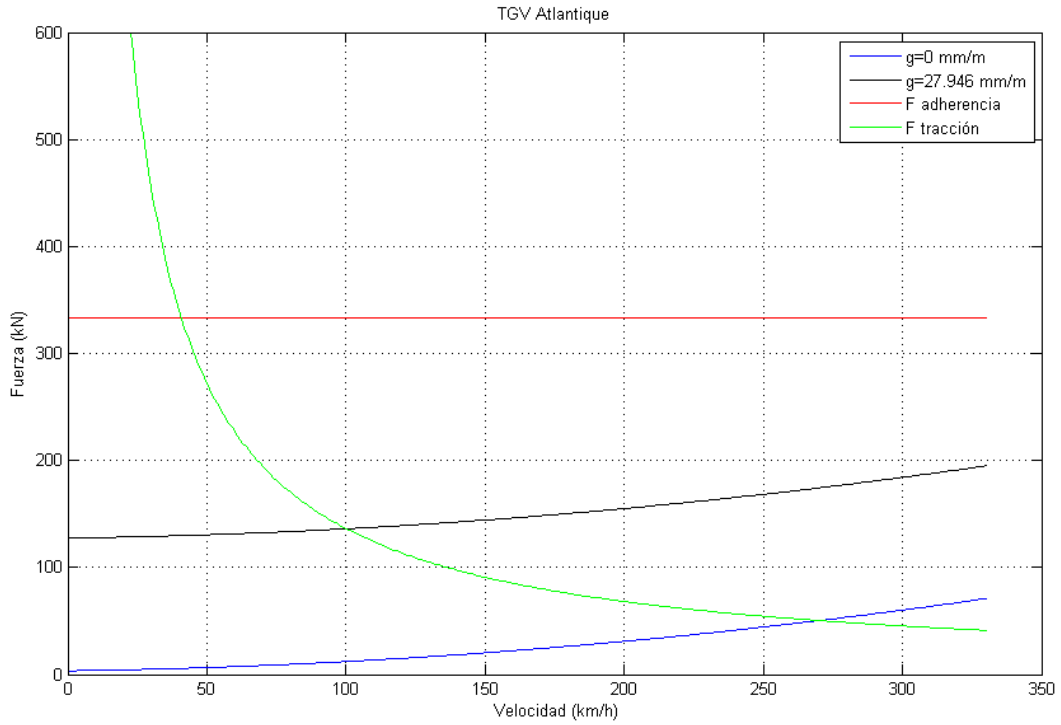


Figura 3.22: Curvas características del TGV *Atlantique*.

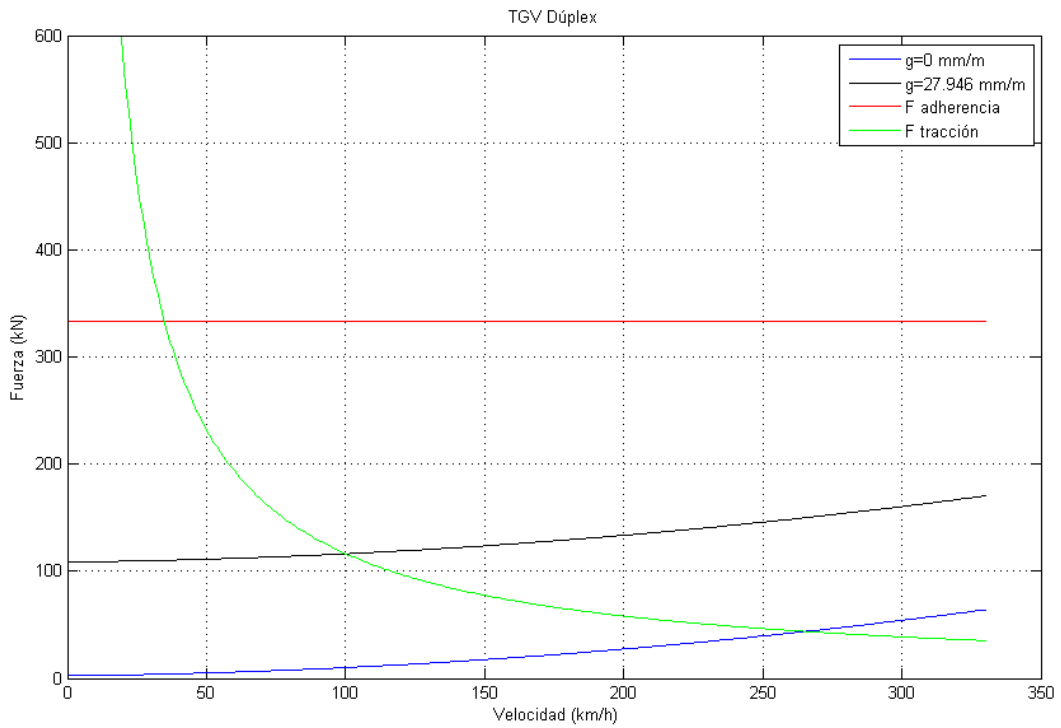


Figura 3.23: Curvas características del TGV *Dúplex*.

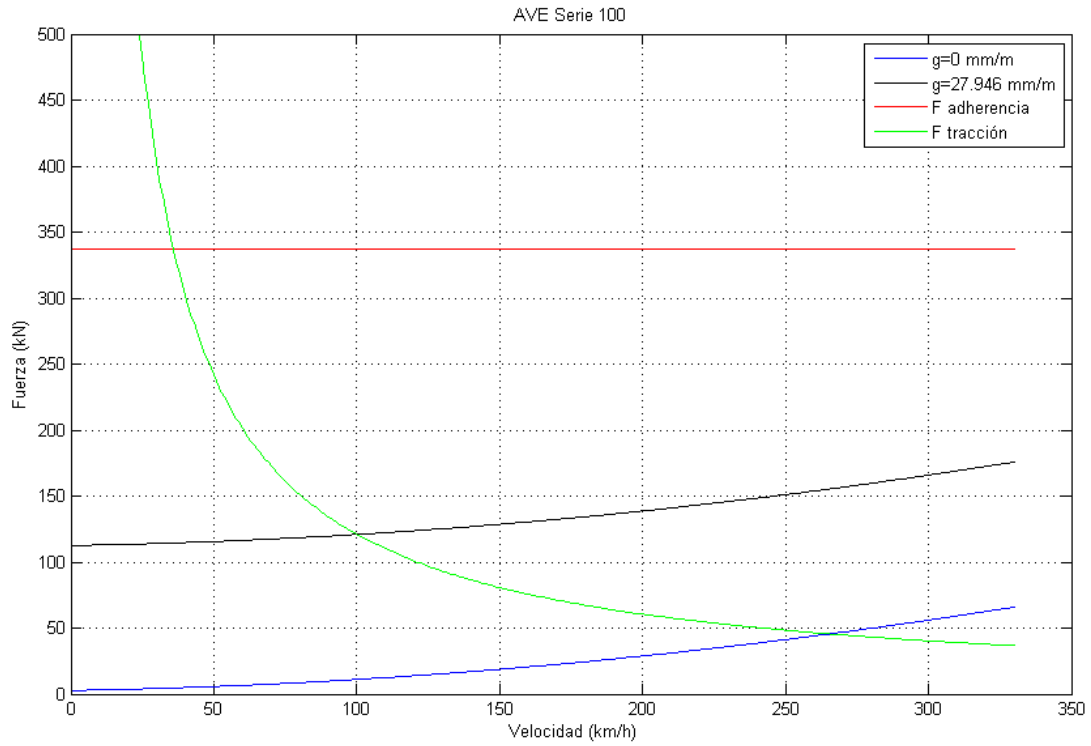


Figura 3.24: Curvas características del AVE serie 100.

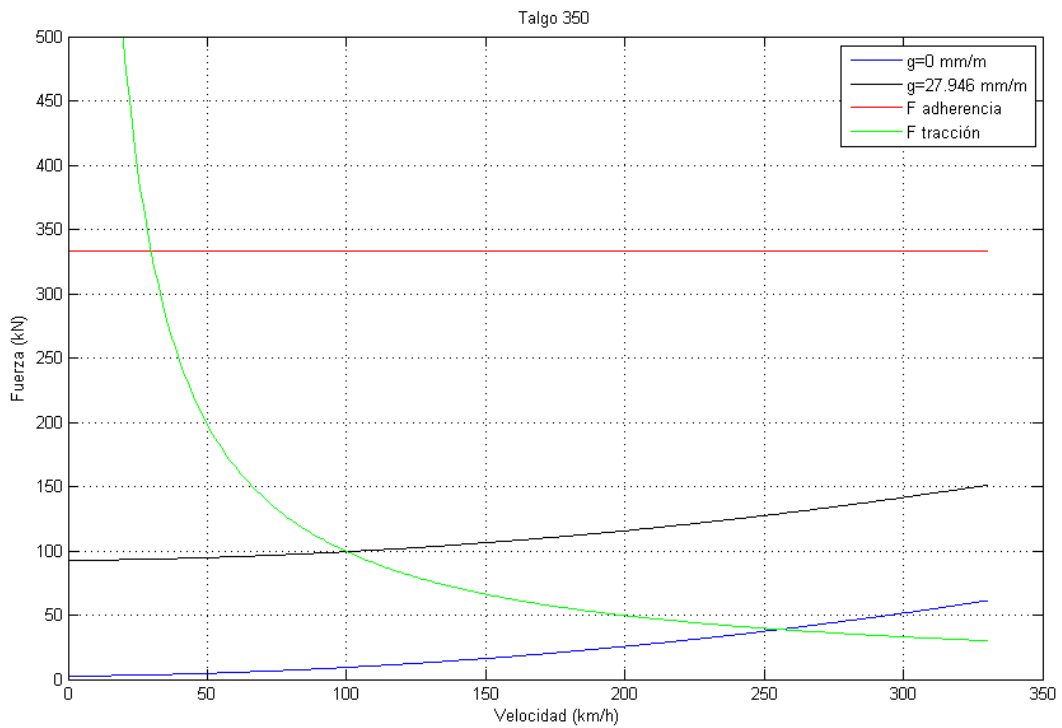


Figura 3.25: Curvas características del Talgo 350 serie 102.

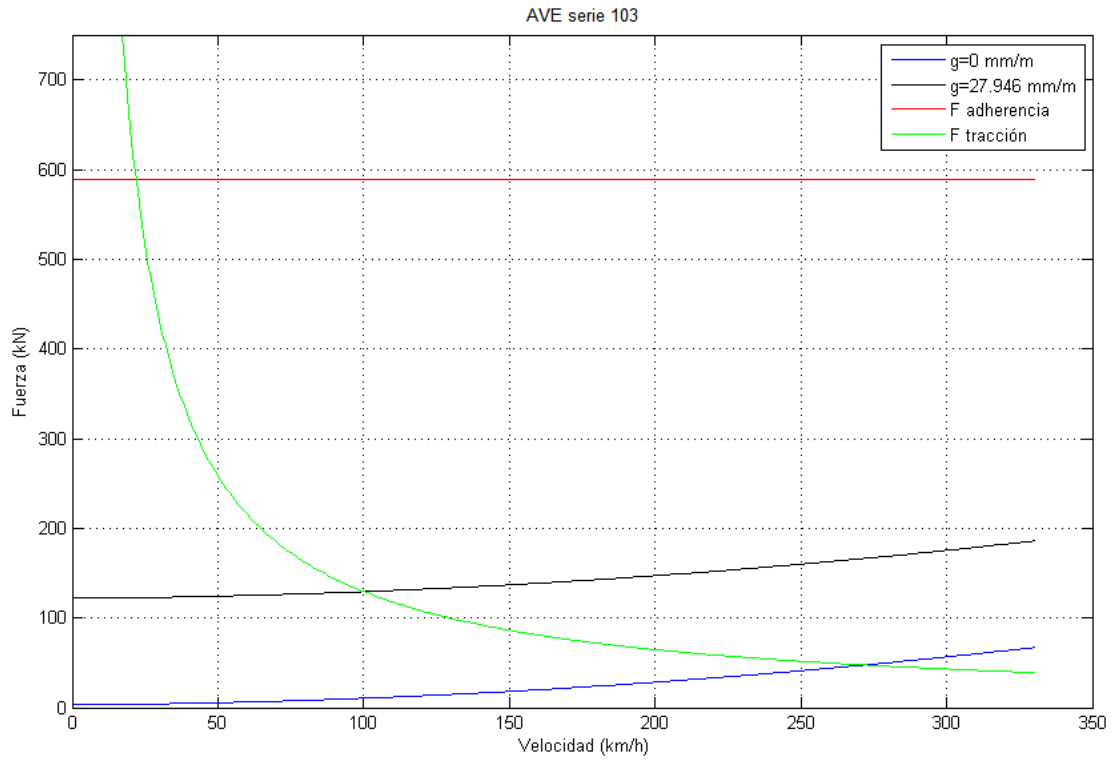


Figura 3.26: Curvas características del AVE serie 103.

La velocidad crítica, potencias totales y unitarias se muestran en la tabla 3.8.

	v_{min} [km/h]	Nº de motores	Potencia eléctrica total [kW]	Potencia eléctrica unitaria [kW]
<i>Shinkansen serie 0</i>	13	64	9.834,24	153,66
<i>Shinkansen serie 300</i>	20	40	7.352	183,80
<i>Shinkansen serie 700</i>	17	48	7.284,48	151,76
<i>Shinkansen serie N700</i>	15	56	7.353,92	131,32
<i>TGV Sud-Est</i>	24	12	3.840,84	320,07
<i>TGV Réseau</i>	35	8	3.831,76	478,97
<i>TGV Atlantique</i>	41	8	4.450,32	556,29
<i>TGV Dúplex</i>	35	8	3.800	475
AVE serie 100	36	8	3.951,68	493,96
<i>Talgo 350 (serie 102)</i>	30	8	3.245,28	405,66
AVE serie 103	22	16	4.225,92	264,12

Tabla 3.8: Velocidades mínimas y potencias eléctricas requeridas.

Las potencias obtenidas son menores que las informadas por los fabricantes, es decir, los trenes están capacitados para la exigencia de moverse a 100 km/h por la gradiente ficticia mayor y son aptos para el recorrido entre Santiago y Valparaíso.

Se escogen los modelos *Shinkansen 700* y *Talgo 350* con el fin de comparar entre un tren con un gran número de motores de baja potencia o un tren con pocos motores, pero de mayor potencia. La restricción adicional impuesta es que la potencia eléctrica total sea la mínima entre los demás trenes de alta velocidad con una cantidad similar de motores.

3.4 ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS

3.4.1 Parámetros a determinar

Una forma de obtener los parámetros de una máquina de inducción es realizar la prueba de rotor bloqueado y la prueba en vacío, el inconveniente es que para esto se necesita físicamente la máquina. Por ello se recurre a métodos numéricos que estiman las variables a través de ecuaciones no lineales que rigen el comportamiento, en los que se usan datos que entregan los fabricantes.

En el modelo equivalente de la figura 2.20 se tienen seis variables: R_1, X_1, R_2, X_2, R_c y X_m por lo tanto se requieren al menos seis ecuaciones para que el sistema este determinado, sin embargo son conocidas relaciones entre las resistencias y reactancias de estator y rotor, lo que minimiza las variables a cuatro [20].

$$X_1 = X_2 \quad (3.18)$$

$$R_1 = 0,5 \cdot R_2 \quad (3.19)$$

Las pérdidas de potencia en la máquina se pueden dividir en cuatro componentes:

- Pérdidas en el núcleo magnético P_{nm}
- Pérdidas por fricción y ventilación P_{fv}
- Pérdidas adicionales en la carga P_s
- Pérdidas en los conductores P_{co}

Las pérdidas en el núcleo y por fricción son consideradas constantes en la región de operación, mientras que las restantes dependen de la carga. Es más, las pérdidas adicionales en la carga muchas veces son desestimadas debido a la relativa magnitud y variable naturaleza.

La suma de P_{nm} y P_{fv} es por lo tanto la constante P_{const} y es clave para la determinación de la resistencia de la rama de magnetización. Lo habitual es asignar una proporción α_c entre ambas pérdidas.

$$P_{nm} = \alpha_c \cdot P_{const} \Rightarrow P_{fv} = (1 - \alpha_c)P_{const} \quad (3.20)$$

Por lo anterior se tiene [31]:

$$R_c = \frac{3 \cdot E^2}{P_{nm}} \quad (3.21)$$

3.4.2 Formulación del problema

Los datos a usar del fabricante son los siguientes:

- Tensión de entrada fase-neutro $V_1 = V/\sqrt{3}$
- Corriente nominal I_{1n}
- Velocidad mecánica n_m
- Velocidad síncrona n_s
- Potencia nominal de salida P_{sn}
- Potencia nominal de entrada $P_{en} = P_{sn}/\eta_n$
- Eficiencia nominal η_n
- Factor de potencia nominal FP_n
- Torque máximo τ_{MAX}

Las ecuaciones a resolver:

$$f_1(x) = P_{sn} - P_{sn}(s_{nom}) = 0 \quad (3.22)$$

$$f_2(x) = FP_n - FP_n(s_{nom}) = 0 \quad (3.23)$$

$$f_3(x) = \tau_{MAX} - \tau_{MAX}(s_{MAX}) = 0 \quad (3.24)$$

$$f_4(x) = P_{en} - P_{en}(s_{nom}) = 0 \quad (3.25)$$

Planteado de otra forma: $F(x) = 0$ donde $F = (f_1, f_2, f_3, f_4)$ y $x = (R_2, X_2, X_m, P_{const})$.

Las funciones de potencia de entrada, potencia de salida, factor de potencia y torque máximo se presentan en las ecuaciones que siguen [31]:

$$P_{sn}(s_{nom}) = 3 \cdot R_2 \cdot \frac{1 - s_{nom}}{s_{nom}} \cdot I_2^2 - (1 - \alpha_c)P_{const} \quad (3.26)$$

$$FP_n(s_{nom}) = \cos(\varphi) \quad (3.27)$$

$$\tau_{MAX}(s_{MAX}) = \frac{3}{\omega_s} \cdot \frac{V_{TH}^2}{R_{TH} + \sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2}} \quad (3.28)$$

$$P_{en}(s_{nom}) = P_{sn} + 3 \cdot I_1^2 R_1 + 3 \cdot I_2^2 R_2 + P_{const} \quad (3.29)$$

$$\omega_s = \frac{2\pi n_s}{60} \quad \text{Frecuencia síncrona}$$

$$s_{nom} = 1 - \frac{n_m}{n_s} \quad \text{Deslizamiento nominal}$$

$$Z_{sh} = R_c \parallel X_m \quad \text{Impedancia de la rama } shunt$$

$Z_1 = R_1 + jX_1$	Impedancia total del estator
$Z_2 = \frac{R_s}{s_{nom}} + jX_2$	Impedancia total del rotor
$Z_e = Z_1 + Z_{sh} \parallel Z_2$	Impedancia de entrada
$\varphi = \angle Z_{in}$	Ángulo de la impedancia de entrada
$Z_{TH} = Z_1 \parallel Z_{sh} = R_{TH} + jX_{TH}$	Impedancia de <i>Thévenin</i>
$V_{TH} = \left \frac{V_1 Z_{sh}}{Z_1 + Z_{sh}} \right $	Tensión de <i>Thévenin</i>
$I_1 = \left \frac{V_1}{Z_1} \right $	Corriente por el estator
$I_2 = \left \frac{Z_{sh}}{Z_{sh} + Z_2} \right I_1$	Corriente por el rotor

La tensión e impedancia de *Thévenin* se muestran en la figura 3.27

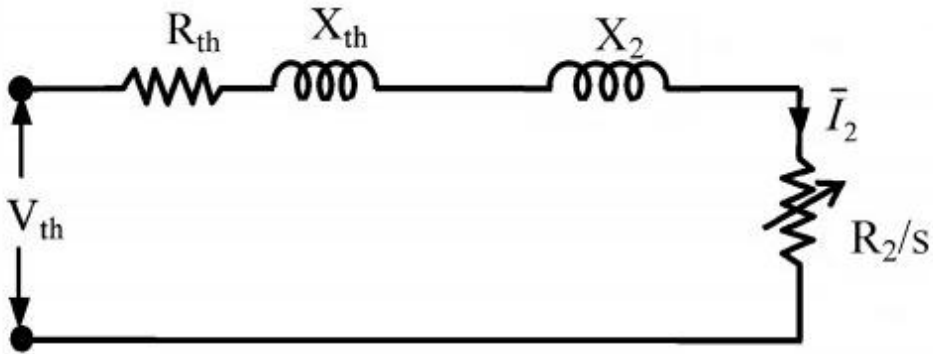


Figura 3.27: Equivalente de *Thévenin* de la máquina de inducción.

En primera instancia hay que calcular R_c para poder obtener Z_{sh} , por lo que E se aproxima con E_p en la ecuación (3.21) [31].

$$E_p = |V_1 - Z_1 I_{1n}| \quad (3.30)$$

Con los parámetros establecidos se puede obtener el valor actualizado de E y finalmente R_c .

$$E = |V_1 - Z_1 I_1 (\cos(\varphi) - j \text{sen}(\varphi))| \quad (3.31)$$

El problema se resuelve con el comando *fsolve* del *toolbox* de optimización de MATLAB, el cual usa el algoritmo de mínimos cuadrados a través de distintos métodos numéricos posibles a elegir, entre ellos el de Gauss-Newton.

La ventaja de la aproximación por mínimos cuadrados es que si el sistema no tiene una solución, el método converge a un punto donde el residuo ε es pequeño.

$$\varepsilon = \sqrt{\sum_k f_k^2} \quad (3.32)$$

La selección de las condiciones iniciales es muy importante para que el método tenga una rápida convergencia. Los valores a usar son [31]:

$$R_2 = \frac{S_{nom} \cdot P_{sn}}{3 \cdot I_{1n}^2} \quad (3.33)$$

$$X_m = \frac{5 \cdot V_1}{I_{1n}} \quad (3.34)$$

$$X_1 = 0,01 \cdot X_m \quad (3.35)$$

$$P_{const} = 0,03 \cdot P_{sn} \quad (3.36)$$

El proceso anterior da como resultado las cuatro variables R_2, X_2, X_m, P_{const} , lo que junto con las relaciones en (3.18) y (3.19) y la fórmula para R_c determinan los parámetros del modelo equivalente.

3.4.3 Resultados en motores comerciales

De acuerdo con la tabla 3.8 las potencias mínimas son 152 kW para el *Shinkansen* 700 y 406 kW para el *Talgo* 350. Por esto se escogen máquinas de 200 kW y 450 kW de propósito general de la marca ABB, las cuales están diseñadas para una frecuencia de 50 Hz y tensión de entrada de 3.000 V [32], [33].

La estimación de parámetros se realiza para máquinas de 2, 4 y 6 polos.

Potencia [kW]	Polos	Velocidad rpm	Eficiencia	Factor de Potencia	Corriente Nominal [A]	Torque Máximo [Nm]
200	2	2.974	0,946	0,90	45	1.669,2
450	2	2.978	0,961	0,91	98	3.751,8
200	4	1.485	0,949	0,87	46	3.472,2
450	4	1.490	0,964	0,86	105	6.924
250	6	990	0,954	0,79	51	4.241,6
450	6	994	0,962	0,79	113	10.807,5

Tabla 3.9: Datos de máquinas de inducción del fabricante ABB.

Al aplicar estos datos al sistema de ecuaciones no lineales con $\alpha_c = 0,7$, el método converge a los valores de la tabla 3.10.

Potencia [kW]	Polos	R_1 [Ω]	X_1 [Ω]	R_c [Ω]	X_m [Ω]	R_2 [Ω]	X_2 [Ω]
200	2	0,172	4,027	1.345,8	144,30	0,344	4,027
450	2	0,066	1,806	900,43	72,575	0,131	1,806
200	4	0,196	3,818	1.520	108,72	0,393	3,818
450	4	0,058	1,923	937,45	49,106	0,115	1,923
200	6	0,184	4,545	1.748,6	74,943	0,368	4,545
450	6	0,050	1,805	810,01	31,971	0,101	1,805

Tabla 3.10: Parámetros obtenidos del proceso de estimación.

La decisión de analizar estas máquinas se debe a que los motores de tracción tipo *frameless* de ABB tienen como tensión de alimentación máxima de 3.000 V y son adecuados para trenes de alta velocidad [34].

3.5 ELECCIÓN DE LOS MOTORES

3.5.1 Condiciones en la gradiente máxima

Los motores deben proporcionar el torque necesario para poder cumplir la condición en la gradiente máxima a una velocidad de 100 km/h.

El *Shinkansen* 700 utiliza bogies desarrollados por JR, cuyas ruedas tienen un diámetro de 860 mm, mientras que el *Talgo* 350 utiliza bogies FLEXX Power 350 de Bombardier con ruedas de 1.040 mm de diámetro [35], [36].

La velocidad angular n en rpm a la que deben girar las ruedas para que haya una velocidad lineal v igual a 100 km/h depende del radio r de las ruedas.

$$n = \frac{v \cdot 60}{3,6 \cdot r \cdot 2\pi} \quad (3.37)$$

En la tabla 3.11 se muestran los resultados.

	Resistencia [kN]	Resistencia por motor [kN]	Radio de las ruedas [m]	Torque por motor [Nm]	Velocidad para 100 km/h rpm
<i>Shinkansen</i> serie 700	222,905	4,644	0,43	1.996,86	616,88
<i>Talgo</i> 350	99,306	12,413	0,52	6.454,86	510,112

Tabla 3.11: Torque necesario por motor para la condición de gradiente máxima.

Estas resistencias corresponden a la intersección de las curvas de esfuerzo de tracción y la curva de gradiente máximo. El torque se obtuvo multiplicando la resistencia unitaria por el radio de las ruedas.

De la tabla se aprecia que la velocidad angular calculada es menor que la velocidad nominal de las máquinas, sin importar el número de polos, por lo que hay que disminuirla. Hay dos opciones: con un variador de frecuencia o con una caja de engranajes.

3.5.1.1 Variador de frecuencia

Se busca la frecuencia tal que a deslizamiento nominal, la velocidad angular de la máquina sea el requerido.

$$f = \frac{n_m \cdot p}{(1 - s_{nom}) \cdot 120} \quad (3.38)$$

n_m es la velocidad mecánica y p es el número de polos.

Al operar con frecuencias distintas a la nominal se debe tener en cuenta las siguientes precauciones:

- 1) Las reactancias de magnetización, de estator y de rotor varían con la frecuencia.

Potencia [kW]	Polos	X_1, X_2 [Ω]	X_m [Ω]
200	2	0,0805	2,8860
450	2	0,0361	1,4515
200	4	0,0764	2,1744
450	4	0,0385	0,9821
200	6	0,0909	1,4989
450	6	0,0361	0,6394

Tabla 3.12: Valores de reactancias para f=1 Hz.

Los valores para frecuencias superiores son múltiplos.

- 2) La tensión de entrada debe modificarse para las frecuencias menores a la nominal de forma de mantener constante la relación V/f para no provocar saturación y calentamiento en la máquina. Para frecuencias mayores, la tensión no varía dado que en este caso la proporción V/f es menor.

$$V = 4,44 \cdot f N \phi_{max} \Rightarrow \frac{V}{f} = cte = 4,44 \cdot N \phi_{max} \quad (3.39)$$

N corresponde al número de vueltas de los enrollados del estator y ϕ_{max} el flujo magnético máximo permisible.

$$\frac{V_{nom}}{f_{nom}} = \frac{3.000 [V]}{50 [Hz]} = 60 \left[\frac{V}{Hz} \right] \quad (3.40)$$

Por ejemplo para una frecuencia de 10 Hz, la tensión de alimentación no debe superar los 600 V.

Se obtienen las siguientes frecuencias.

Potencia [kW]	Polos	Frecuencia [Hz]	Velocidad sincrónica rpm	Velocidad a s_{nom} rpm	Velocidad [km/h]
200	2	10	600	595	96
450	2	9	540	536	105
200	4	21	630	624	101
450	4	17	510	507	99
200	6	31	620	614	100
450	6	26	520	517	101

Tabla 3.13: Frecuencias de operación.

Con estas frecuencias se calcula el torque con:

$$\tau = \frac{3}{\omega_s} \cdot \frac{V_{TH}^2 \cdot R_2/s}{(R_2/s + R_{TH})^2 + (X_{TH} + X_2)^2} \quad (3.41)$$

Las curvas torque-velocidad para las frecuencias se muestran con el punto de operación.

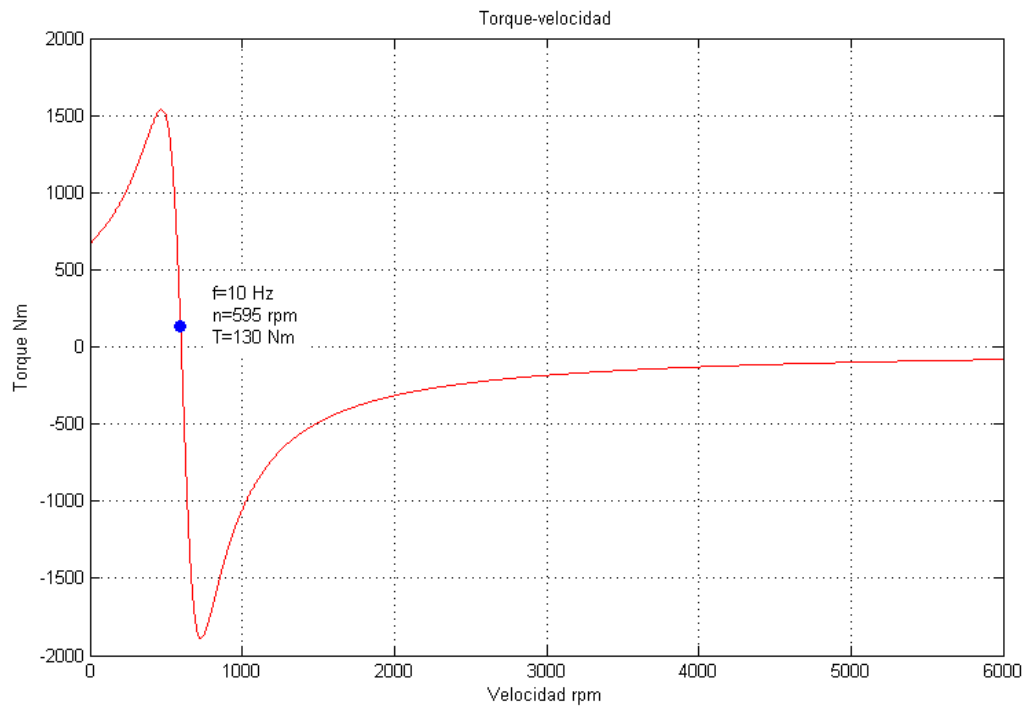


Figura 3.28: Curva torque-velocidad de la máquina de 200 kW y 2 polos para v=100 km/h.

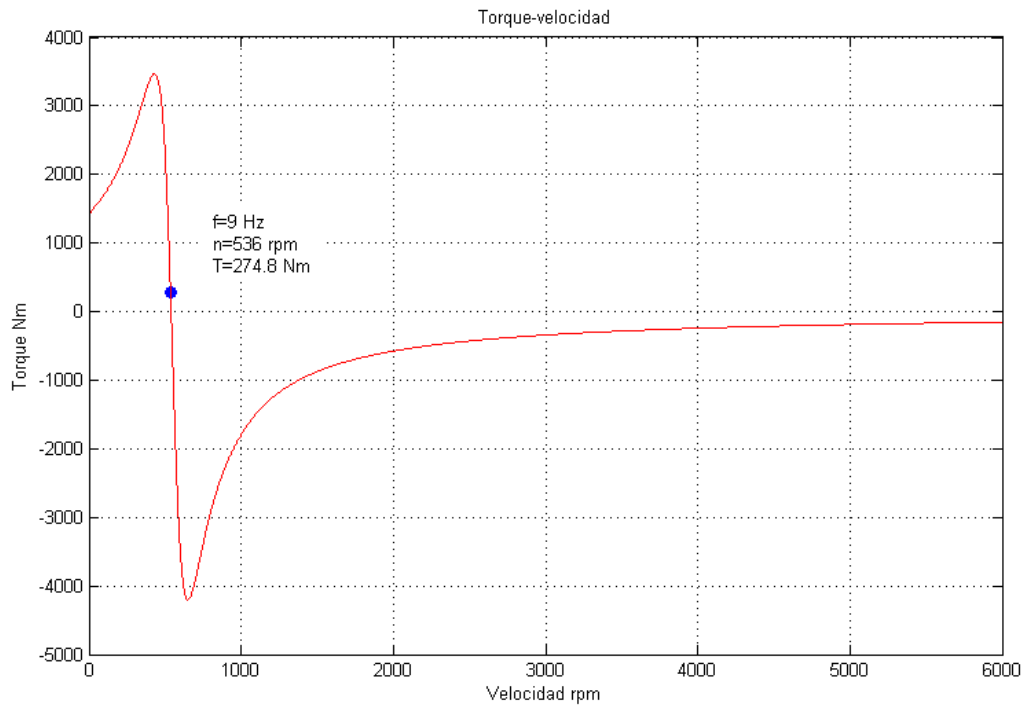


Figura 3.29: Curva torque-velocidad de la máquina de 450 kW y 2 polos para $v=100$ km/h.

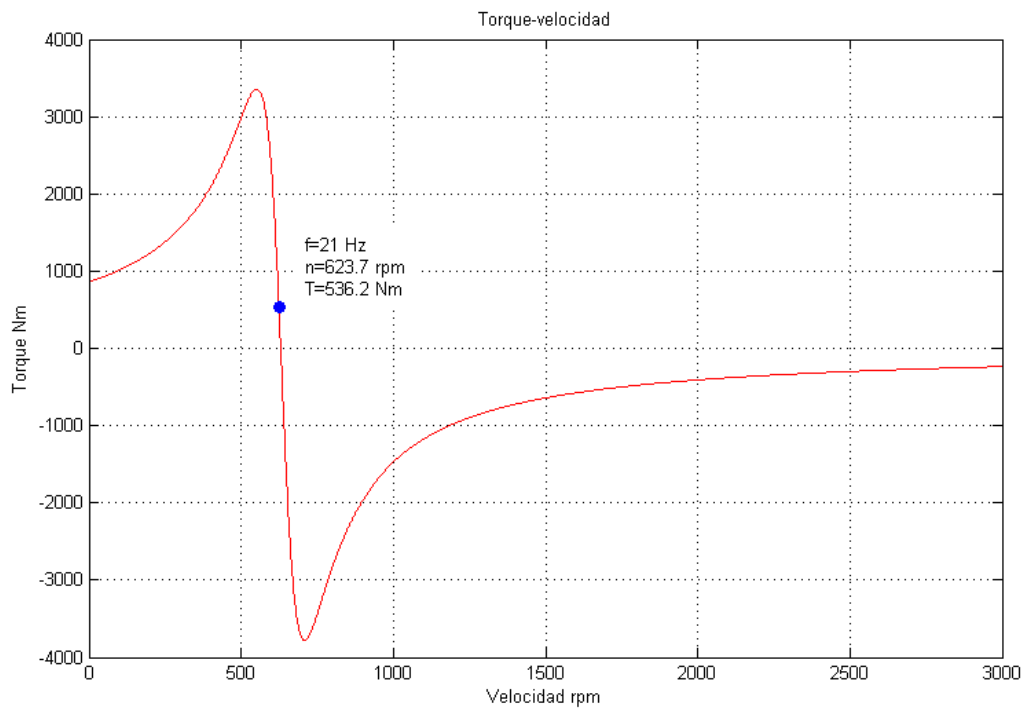


Figura 3.30: Curva torque-velocidad de la máquina de 200 kW y 4 polos para $v=100$ km/h.

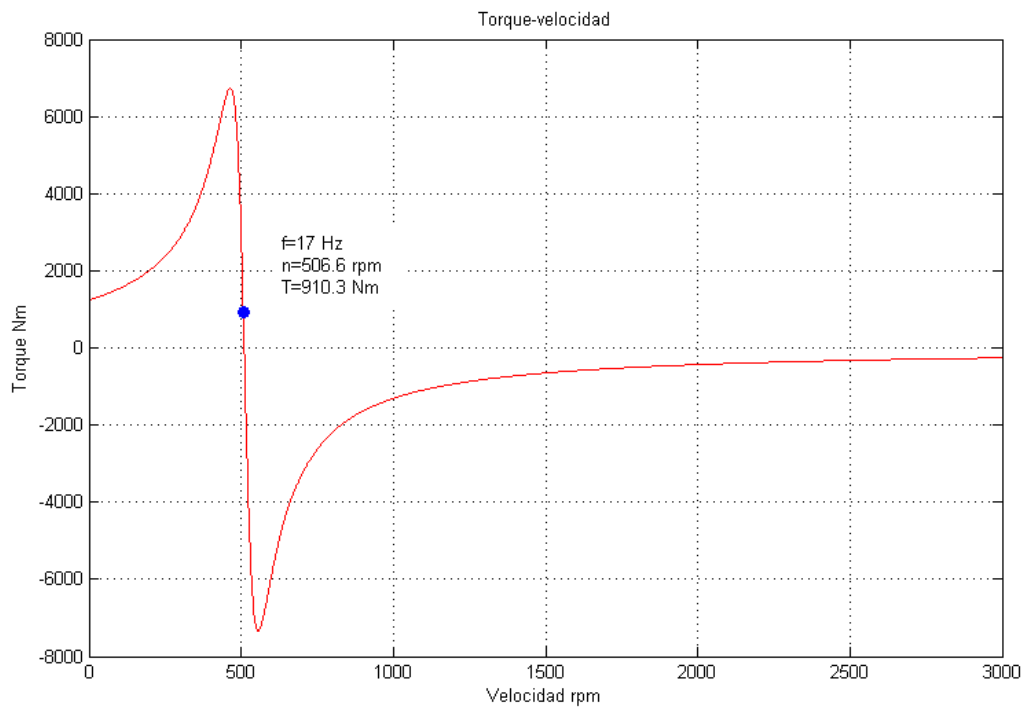


Figura 3.31: Curva torque-velocidad de la máquina de 450 kW y 4 polos para $v=100$ km/h.

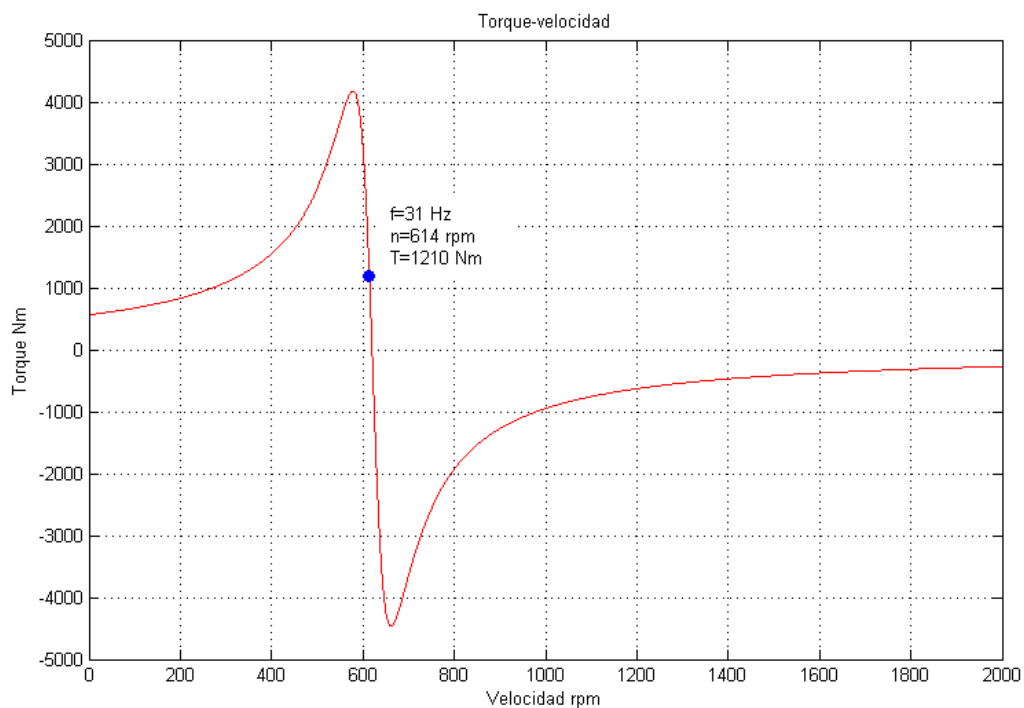


Figura 3.32: Curva torque-velocidad de la máquina de 200 kW y 6 polos para $v=100$ km/h.

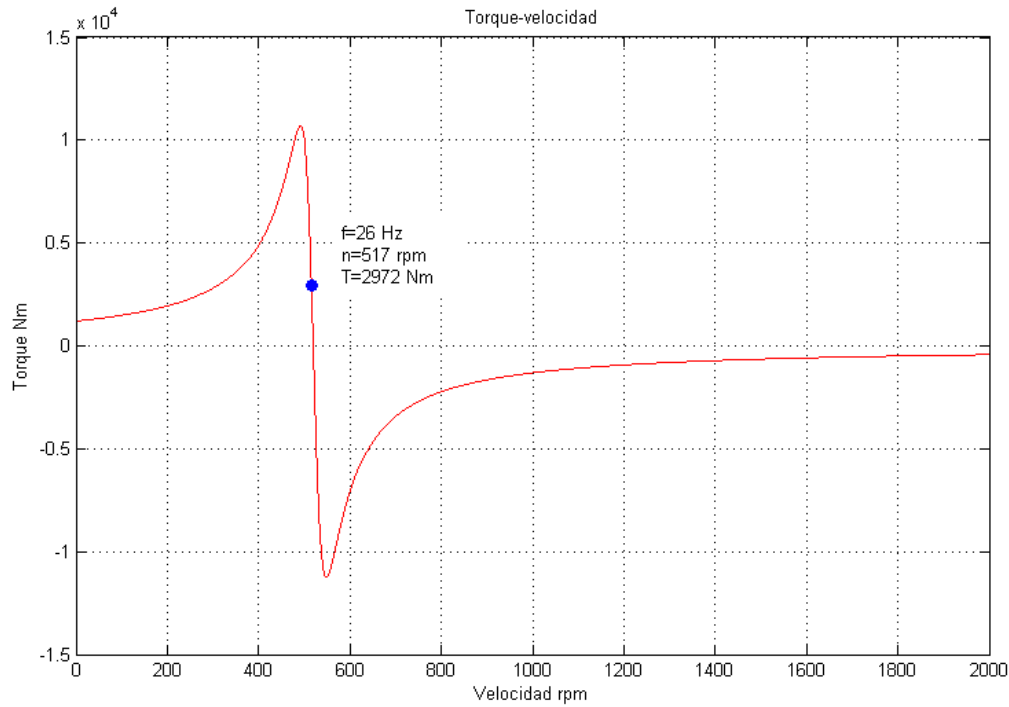


Figura 3.33: Curva torque-velocidad de la máquina de 450 kW y 6 polos para $v=100$ km/h.

Potencia [kW]	Polos	Torque [Nm]
200	2	130
450	2	274,8
200	4	536,2
450	4	910,3
200	6	1.210
450	6	2.972

Tabla 3.14: Torques en las velocidades calculadas.

Los torques son mucho menores que los requeridos de la tabla 3.11.

3.5.1.2 Caja de engranajes

En este caso la máquina trabaja a 50 Hz en el punto de operación nominal y con la adición de una caja de engranajes entre el eje de la máquina y el eje de las ruedas se disminuye la velocidad angular.

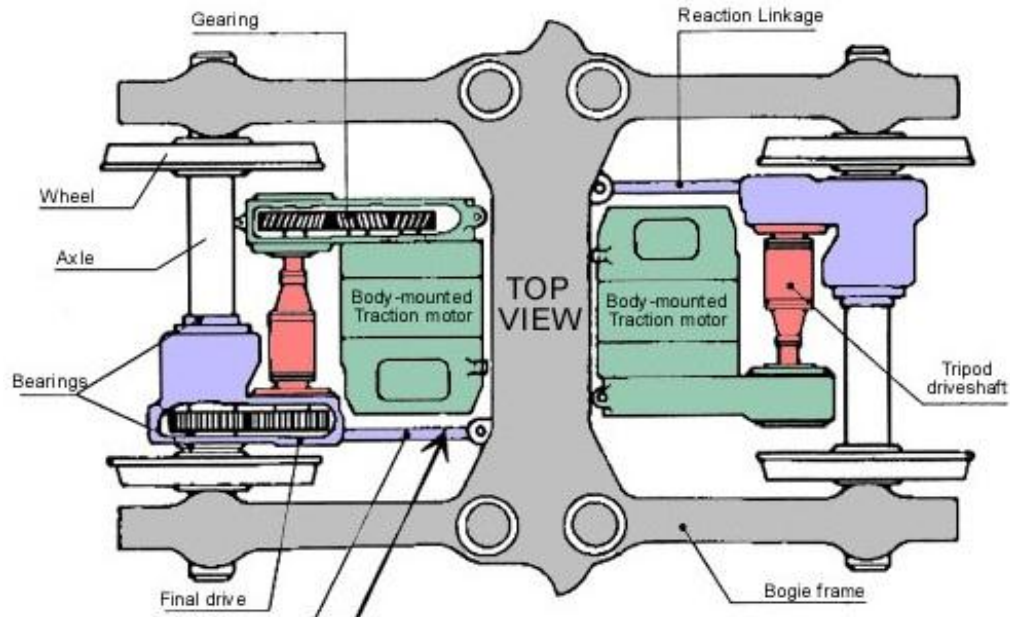


Figura 3.34: Sistema de transmisión “trípode” de un TGV.

El resultado del empleo de engranajes es el cambio en la velocidad angular y en el torque.

En el punto de contacto entre dos engranajes A y B que ruedan sin resbalar, se tiene la misma velocidad, por lo que existe una relación entre las velocidades angulares de ambos engranajes y también en el torque proporcionado.

$$v = r_A \omega_A = r_B \omega_B \Rightarrow G = \frac{\omega_A}{\omega_B} = \frac{r_B}{r_A} = \frac{\tau_B}{\tau_A} \quad (3.42)$$

Para las máquinas en estudio ω_A es la velocidad nominal, ω_B es la velocidad angular para 100 km/h, τ_A es el torque nominal y τ_B es el torque de salida en las ruedas.

Potencia [kW]	Polos	G	τ_A [Nm]	τ_B [Nm]
200	2	4,821:1	650,41	3.135,65
450	2	5,838:1	1.455	8.494,29
200	4	2,407:1	1.300,32	3.130,23
450	4	2,921:1	2.906,72	8.490,32
200	6	1,605:1	1.946,1	3.123,2
450	6	1,949:1	4.360,2	8.496,25

Tabla 3.15: Torques en la rueda usando una caja de engranajes.

Los torques son mayores que los de la tabla 3.11 para todas las máquinas.

3.5.2 Condiciones de velocidad máxima

La velocidad máxima se especifica en la tabla 3.5. Sin embargo para el trazado elegido la velocidad máxima se impone a 250 km/h en ambos trenes.

	Resistencia [kN]	Resistencia por motor [kN]	Radio de las ruedas [m]	Torque por motor [Nm]	Velocidad para 250 km/h rpm
<i>Shinkansen serie 700</i>	64,608	1,346	0,43	578,782	1.542,2
<i>Talgo 350</i>	37,376	4,672	0,52	2.429,45	1.275,28

Tabla 3.16: Torque necesario por motor para la condición de velocidad máxima.

Al igual que en la condición de gradiente máxima se analiza el comportamiento con un variador de frecuencia y con una caja de engranajes.

3.5.2.1 Variador de frecuencia

Con el mismo procedimiento de 3.5.1.1 se confecciona la tabla 3.17

Potencia [kW]	Polos	Frecuencia [Hz]	Velocidad sincrónica rpm	Velocidad a s_{nom} rpm	Velocidad [km/h]
200	2	26	1.560	1.546	251
450	2	21	1.260	1.251	245
200	4	52	1.560	1.544	250
450	4	43	1.290	1.281	251
200	6	78	1.560	1.544	250
450	6	64	1.280	1.272	249

Tabla 3.17: Frecuencias de operación.

Las curvas torque-velocidad para las frecuencias se muestran con el punto de operación.

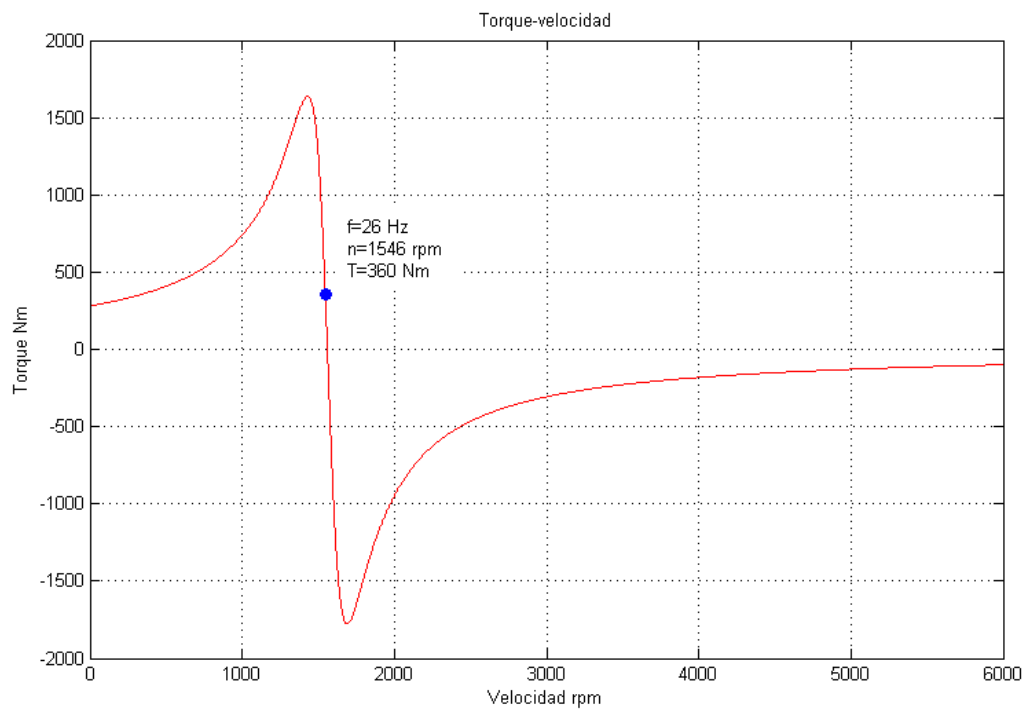


Figura 3.35: Curva torque-velocidad de la máquina de 200 kW y 2 polos para $v=250$ km/h.

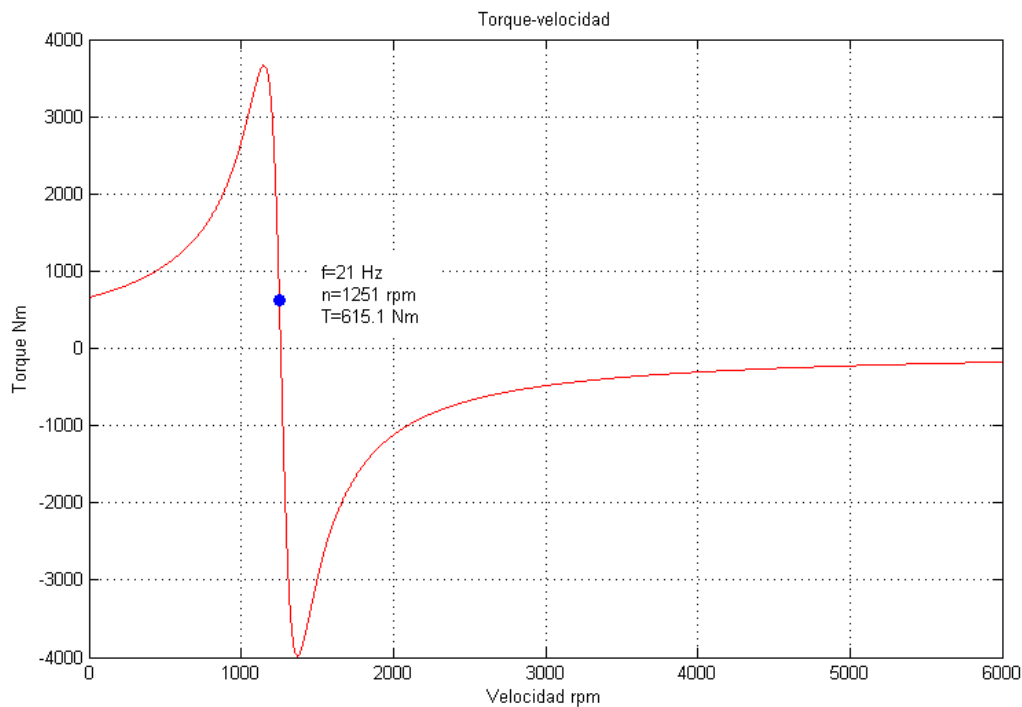


Figura 3.36: Curva torque-velocidad de la máquina de 450 kW y 2 polos para $v=250$ km/h.

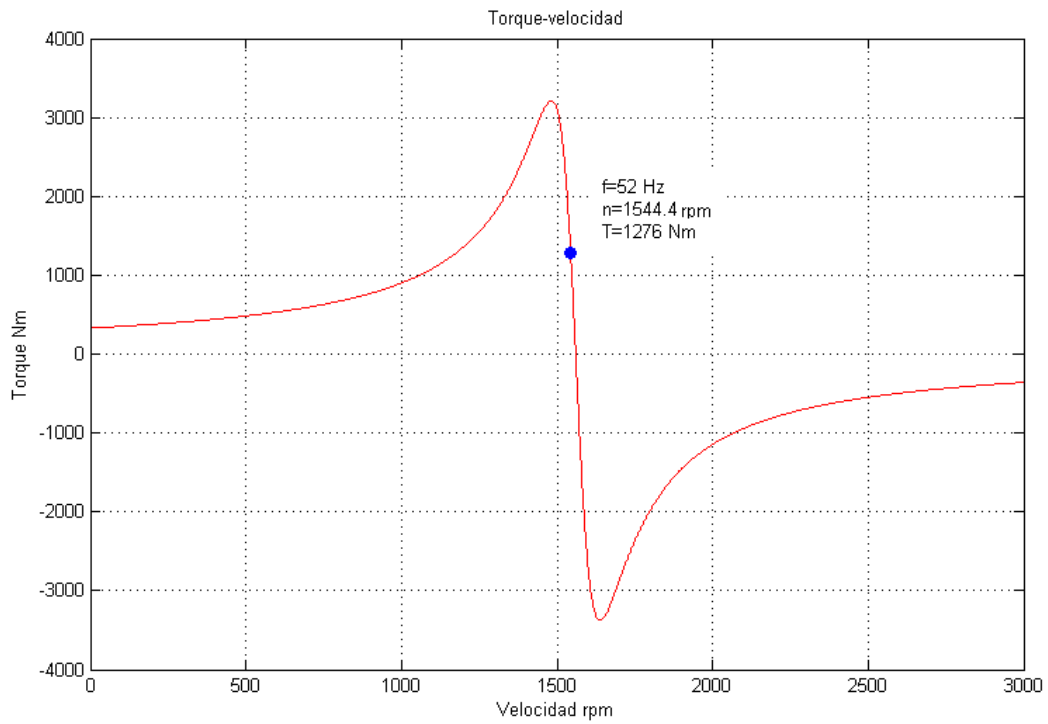


Figura 3.37: Curva torque-velocidad de la máquina de 200 kW y 4 polos para $v=250$ km/h.

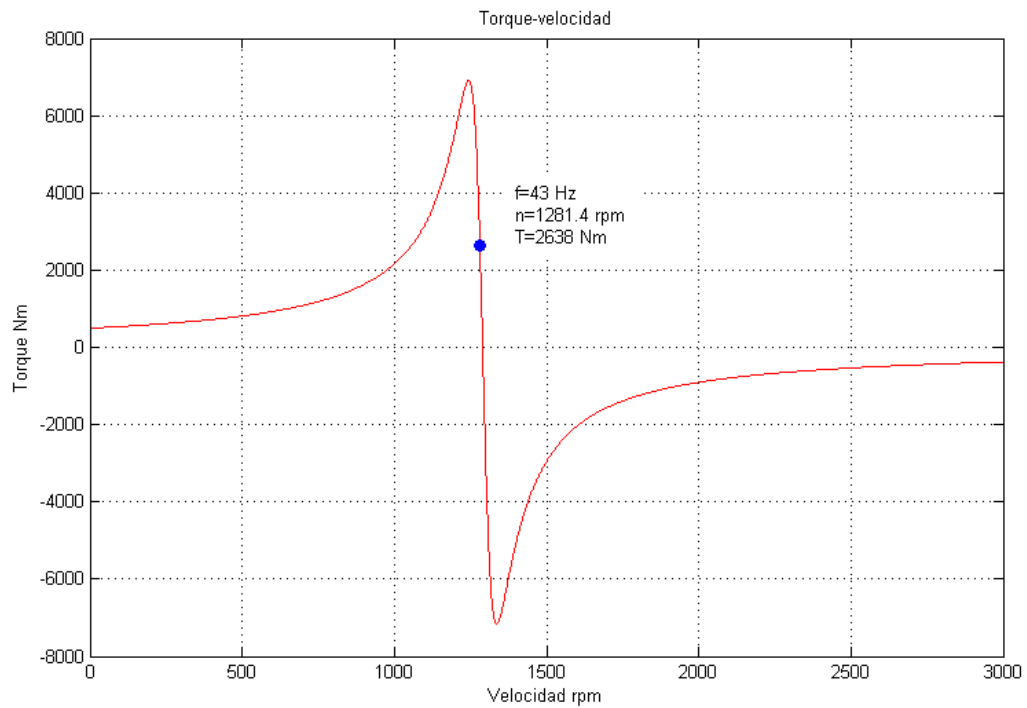


Figura 3.38: Curva torque-velocidad de la máquina de 450 kW y 4 polos para $v=250$ km/h.

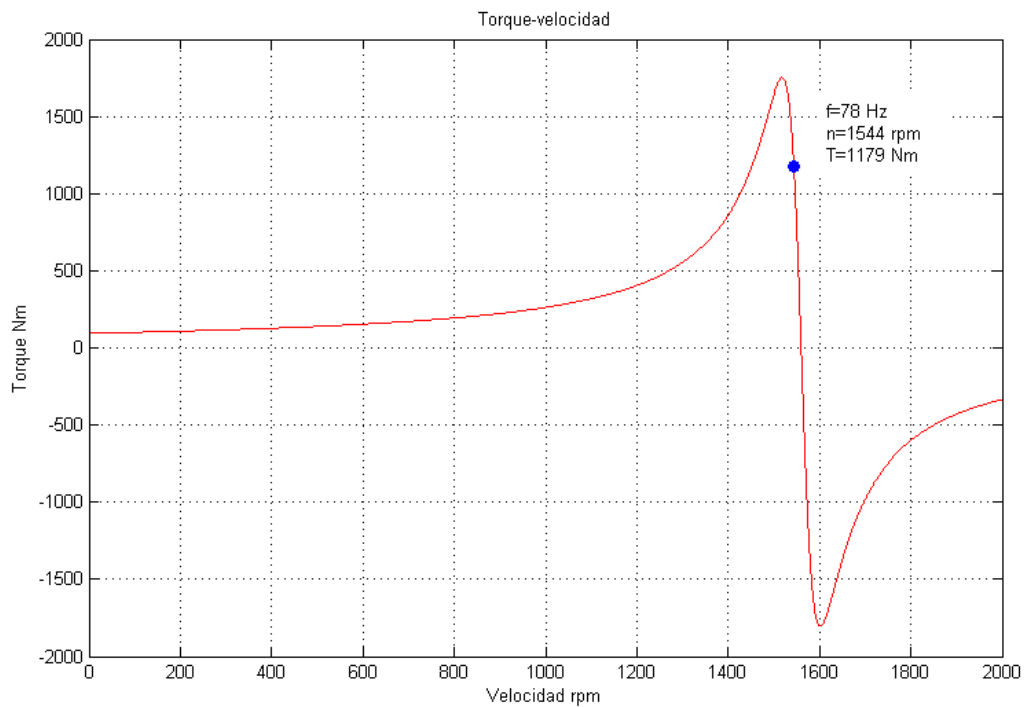


Figura 3.39: Curva torque-velocidad de la máquina de 200 kW y 6 polos para $v=250$ km/h.

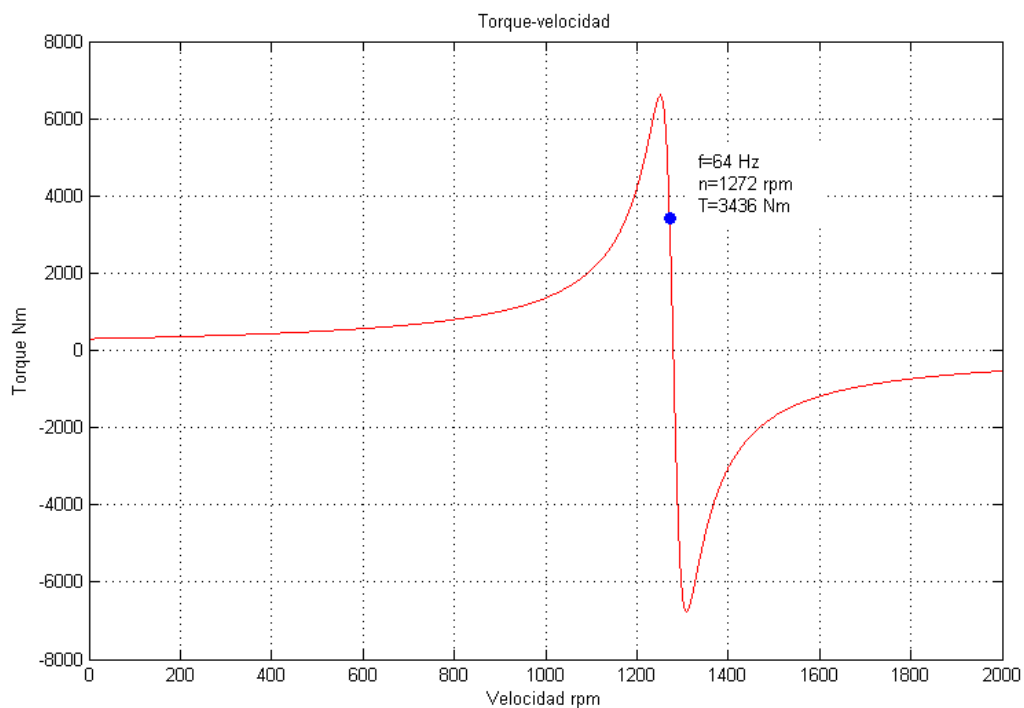


Figura 3.40: Curva torque-velocidad de la máquina de 450 kW y 6 polos para $v=250$ km/h.

Potencia [kW]	Polos	Torque [Nm]
200	2	360
450	2	615,1
200	4	1.276
450	4	2.638
200	6	1.179
450	6	3.436

Tabla 3.18: Torques en las velocidades calculadas.

A excepción de las máquinas de 2 polos, los torques son mayores que los de la tabla 3.16.

3.5.2.2 Caja de engranajes

Como en 3.5.1.2 ω_A es la velocidad nominal, ω_B es la velocidad angular para 250 km/h, τ_A es el torque nominal y τ_B es el torque de salida en las ruedas.

Potencia [kW]	Polos	G	τ_A [Nm]	τ_B [Nm]
200	2	1,928:1	650,41	1.254,26
450	2	2,335:1	1.455	3.397,68
200	4	0,963:1	1.300,32	1.252,09
450	4	1,168:1	2.906,72	3.396,13
200	6	0,642:1	1.946,1	1.249,28
450	6	0,779:1	4.360,2	3.398,5

Tabla 3.19: Torques en la rueda usando una caja de engranajes.

Los torques son mayores que los de la tabla 3.16 para todas las máquinas.

3.5.3 Condiciones en la partida

La fuerza resistente en la partida se calcula mediante la tabla de la sección 3.1.2.4 y la resistencia al avance con velocidad nula. De acuerdo a la ecuación (3.10), el único término independiente de la velocidad es la constante A, a la que se agrega la resistencia al arranque en ausencia de gradientes.

$$R_{ar} = A + r_{a0}M \quad (3.43)$$

Los resultados para los trenes seleccionados son:

	Resistencia de partida [kN]	Resistencia de partida por motor [kN]	Radio de las ruedas [m]	Torque de partida por motor [Nm]
<i>Shinkansen serie 700</i>	62,36	1,299	0,43	558,641
<i>Talgo 350</i>	25,084	3,136	0,52	1.630,447

Al inicio de la marcha, los motores son operados en baja frecuencia, de forma de obtener un torque elevado.

A 10 Hz de frecuencia se tiene:

Potencia [kW]	Polos	Torque en la partida [Nm]
200	2	670,280
450	2	1.652,96
200	4	1.622,04
450	4	2.045,58
200	6	1.648,33
450	6	3.014,60

Tabla 3.20: Torque en la partida con f=10 Hz.

Los torques son mayores que los requeridos.

Las máquinas son aptas para las tres condiciones descritas. La elección dependerá entonces de la menor masa total.

	Número de motores	Potencia [kW]	Polos	Masa por motor [kg]	Masa total t
<i>Shinkansen</i> serie 700	48	200	2	1.680	80,64
		200	4	1.220	58,56
		200	6	1.850	88,8
<i>Talgo 350</i>	8	450	2	2.900	23,2
		450	4	2.880	23,04
		450	6	3.090	24,72

Tabla 3.21: Masa total de las máquinas.

Finalmente se escogen las máquinas de 4 polos por pesar menos y tener un buen desempeño en las situaciones presentadas.

En la práctica los trenes utilizan conjuntamente variadores de frecuencia y cajas de engranajes, los que se complementan. Sin embargo se prefirió analizarlos separadamente para observar las diferencias respectivas.

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS ECONÓMICO

4.1 COSTOS ASOCIADOS A LA INVERSIÓN INICIAL

El estudio económico es de carácter preliminar, a nivel del costo de inversión del proyecto. Los costos asociados son por infraestructura y material rodante.

4.1.1 Infraestructura

La infraestructura implica la construcción de todas las obras de ingeniería necesarias para que el tren pueda circular a alta velocidad: compra de terreno, construcción de vías, alimentación, señalética, sistemas de control y seguridad [37].

En promedio los costos de infraestructura por kilómetro varían entre 6 y 30 millones de dólares, dependiendo de las condiciones geográficas [38].

Para el caso en estudio se dividió el recorrido de la tabla 3.4 en tres zonas:

- Zona normal: Desde Colina hasta Rungue y desde Ocoa hasta Peñablanca con un costo de 6 millones US\$/km.
- Zona urbana: Desde Alameda hasta Quilicura y desde Villa Alemana hasta Puerto con un costo de 10 millones US\$/km.
- Zona montañosa: Desde Montenegro hasta Llay-Llay con un costo de 12 millones US\$/km.

El costo total de la infraestructura se ve en la tabla 4.1.

	Costo US\$/km	Extensión [km]	Subtotal US\$
Normal	\$ 6.000.000	114	\$ 684.000.000
Urbana	\$ 10.000.000	40,1	\$ 401.000.000
Montañosa	\$ 12.000.000	32,4	\$ 388.800.000
Total		186,5	\$ 1.473.800.000

Tabla 4.1: Costos de infraestructura por zonas.

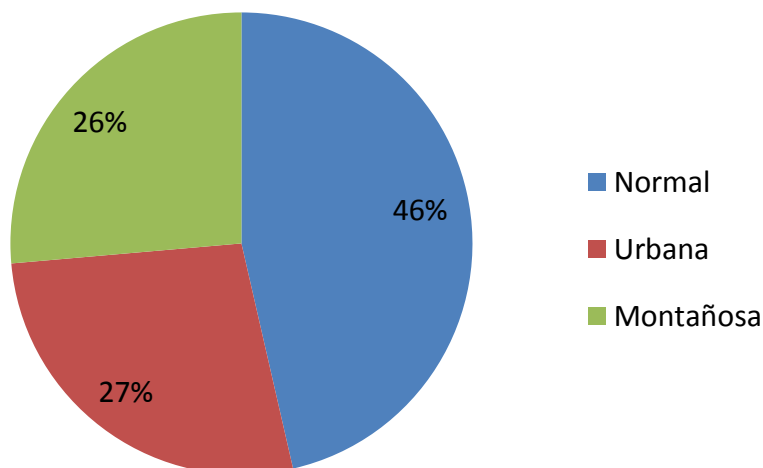


Figura 4.1: Proporción de costos en el valor total de la infraestructura.

El costo medio por kilómetro en este caso es \$ 7.902.413 US\$/km. Comparando con el servicio francés TGV del año 1994. [38].

	Distancia [km]	Costo US\$ (1994)	Costo US\$/km (1994)	Costo US\$/km (Junio 2013)
Sud Este	1.004	\$ 2.058.000.000	\$ 2.049.000	\$ 2.945.966
Atlántico	726	\$ 1.724.000.000	\$ 2.375.000	\$ 3.414.675
Mediterráneo	800	\$ 4.047.000.000	\$ 5.058.000	\$ 7.367.254
Este	1.080	\$ 4.371.000.000	\$ 4.047.000	\$ 5.818.607
Total	3.610	\$ 12.200.000.000	\$ 3.380.000	\$ 4.858.904

Tabla 4.2: Costos de infraestructura del servicio TGV en 1994.

La zona del Mediterráneo presenta una topografía similar a la existente en el recorrido. Si se multiplica la extensión del trazado por el costo por kilómetro de esta zona se tiene:

Distancia [km]	Costo US\$/km	Total US\$
186,5	\$ 7.367.254	\$ 1.373.992.871

Tabla 4.3: Costo de la infraestructura de acuerdo a datos del TGV.

Hay una diferencia de aproximadamente 100 millones de dólares con respecto al total de la tabla 4.1.

4.1.2 Material rodante

El primer paso para determinar la cantidad de trenes y su costo es estimar el flujo de pasajeros que potencialmente utilicen este medio de transporte.

En la tabla 4.4 se muestra la llegada de pasajeros chilenos a Santiago y Valparaíso para los años 2011 y 2012 .

	2011	2012
Pasajeros de Valparaíso a Santiago	36.896	79.605
Pasajeros de Santiago a Valparaíso	406.524	836.953
TOTAL	443.420	916.558

Tabla 4.4: Llegada de chilenos a Valparaíso y Santiago.

Se pretende que el proyecto entre en funcionamiento para el año 2023, por lo que se estima el flujo de pasajeros para ese año con un incremento de 10% de la demanda respecto del año anterior. [39], [40]

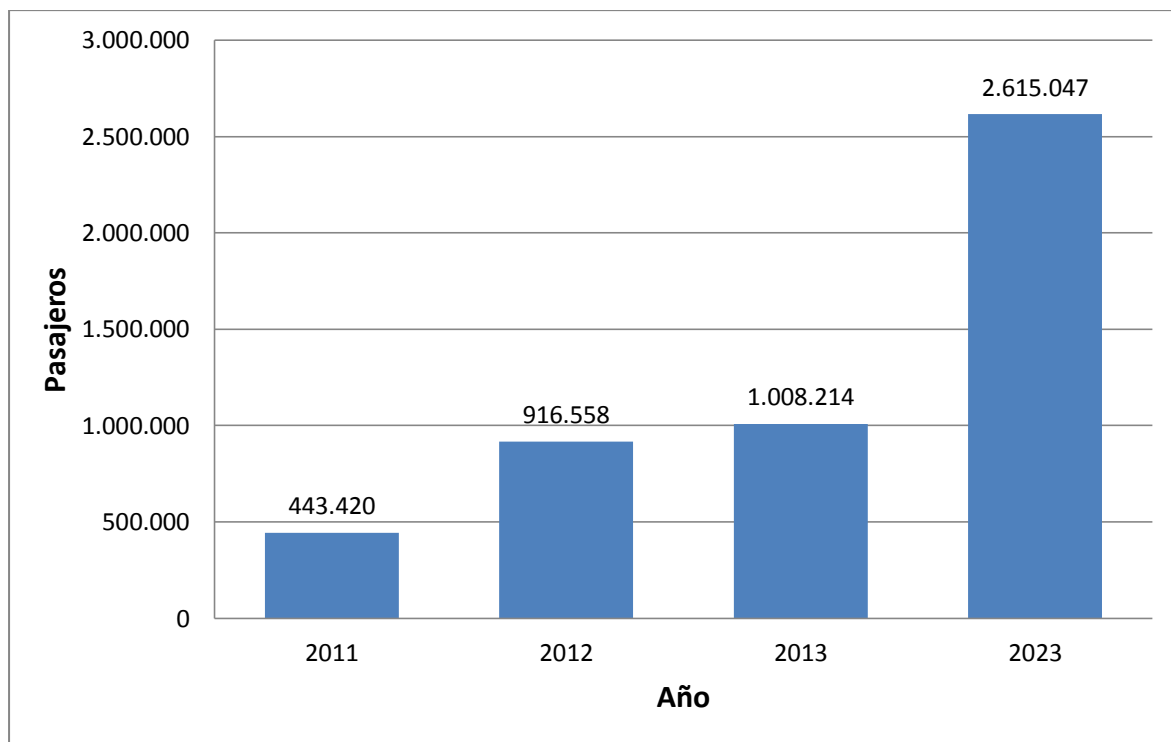


Figura 4.2: Pasajeros estimados para los años 2013 y 2023.

Esto corresponde a un crecimiento del tipo conservador, dado que entre el año 2011 y 2012, la demanda aumentó más del 10%.

El número de trenes a adquirir se calcula con la fórmula de la ecuación (4.1).

$$N_t = \frac{AMD}{VD \cdot A_t} \quad (4.1)$$

N_t Número de trenes
 AMD Afluencia media diaria
 VD Recorridos diarios
 A_t Asientos por tren

Se asumen 3 recorridos por día: uno en la hora punta mañana (07:00), uno en la hora valle (13:00) y el último en la hora punta tarde (19:00).

La afluencia media diaria es la cantidad de pasajeros transportados en un año dividido por 365, considerando el sentido del recorrido: Santiago a Valparaíso y Valparaíso a Santiago.

	2012	Porcentaje 2012	2023	Afluencia media diaria 2023
Pasajeros de Valparaíso a Santiago	79.605	9%	227.122	622
Pasajeros de Santiago a Valparaíso	836.953	91%	2.387.925	6.542
TOTAL	916.558	100%	2.615.047	7.165

Tabla 4.5: Afluencia media diaria en el año 2023.

Así se calcula el precio total de los trenes.

	Costo unitario US\$	Asientos	Número de trenes (S-V)	Número de trenes (V-S)	Total US\$
<i>Shinkansen</i> serie 700	\$ 41.358.537	1.323	2	1	\$ 124.075.610
<i>Talgo</i> 350	\$ 32.635.704	318	7	1	\$ 261.085.631

Tabla 4.6: Costo de los trenes.

El precio del *Shinkansen* 700 es de 4.000 millones de yenes [41] y del *Talgo* 350 es 24,74 millones de euros [42]. Los precios están ajustados a dólares en Junio del 2013.

De acuerdo a la tabla 3.5, las potencias de los motores que vienen de fábrica de ambos trenes son mayores que las que entregan los motores de la tabla 3.9. Esto implica que los trenes son capaces de seguir el trazado en las condiciones expuestas, sin ser necesario modificarlos. Por lo anterior los motores especificados no son considerados como parte de la inversión.

Para tener de referencia el precio, se consultó directamente a ABB Chile. El *Shinkansen 700* utiliza 48 motores y el *Talgo 350* utiliza 8 motores.

	Potencia [kW]	Polos	Costo unitario US\$	Cantidad total de motores	Total US\$
<i>Shinkansen serie 700</i>	200	4	\$ 49.000	144	\$ 7.056.000
<i>Talgo 350</i>	450	4	\$ 58.000	64	\$ 3.712.000

Tabla 4.7: Costo de los motores.

4.2 COSTO DE INVERSIÓN DEL PROYECTO

Como la construcción de la infraestructura es necesaria para los dos trenes, la decisión de cual implementar en Chile depende exclusivamente del menor valor por el precio total del material rodante.

Por la tabla 4.6 el tren de alta velocidad seleccionado es el *Shinkansen 700* de 16 coches, costando las tres unidades un 52% menos que las ocho unidades del tren *Talgo 350* de 12 coches. La diferencia se debe principalmente a la mayor capacidad del tren japonés, siendo capaz de transportar cuatro veces más pasajeros al mismo tiempo.

El costo estimado de la inversión del proyecto:

	Precio unitario US\$	Cantidad	Subtotal US\$
Infraestructura	\$ 7.902.413	186,5 km	\$ 1.473.800.000
<i>Shinkansen serie 700</i>	\$ 41.358.537	3 trenes	\$ 124.075.610
Total US\$			\$ 1.597.875.610

Tabla 4.8: Costo de inversión del proyecto.

Gran parte de la inversión es debido a la infraestructura que implica la construcción de una vía óptima. Una alternativa para disminuir costos es adecuar las vías existentes para permitir la circulación a alta velocidad, como es el caso de la vía Berlín-Hamburgo modificada para 230 km/h con un costo de 2,4 millones €/km (3,15 millones US\$/km) [43].

La velocidad media del *Shinkansen 700* en el recorrido Santiago-Valparaíso es de 201 km/h, con una velocidad máxima impuesta de 250 km/h, por lo tanto el tiempo por viaje entre las ciudades es aproximadamente 56 minutos.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

5.1 RECOPIACIÓN Y COMENTARIOS

En este trabajo se ha realizado un estudio para evaluar la factibilidad técnica de implementar de un servicio de trenes de alta velocidad entre las ciudades de Santiago y Valparaíso.

En primer lugar se presentó el panorama actual de la alta velocidad en el mundo junto con la tecnología MAGLEV que promete ser el estándar en el futuro. Se explicó el funcionamiento de las máquinas de inducción, de uso preferente en alta velocidad por su facilidad de construcción y las características de motores de tracción.

Se investigó la dinámica del tren a altas velocidades, donde las componentes longitudinales de las fuerzas presentes son las de mayor relevancia. Se determinó la resistencia al avance en horizontal que el tren presenta en contra del movimiento a través de la fórmula de Davis. Parte importante de la resistencia total está dada por las curvas y la gradiente que presenta el terreno por donde se construye la vía. La combinación de estos dos efectos origina la denominada gradiente ficticia cuyo valor es agregado a la resistencia al avance en horizontal, obteniéndose curvas de resistencia distintas para cada pendiente o rampa en el trazado.

El recorrido elegido corresponde a la del antiguo ferrocarril construido en el siglo XIX que unía ambas ciudades y operada en la actualidad por FEPASA para transporte de carga. La mayor gradiente ficticia se encuentra entre las estaciones Enrique Meiggs y Llay-Llay, alcanzándose un valor de 27,946 mm/m. Se calcularon los coeficientes de Davis y resistencia al avance en esta gradiente para once distintos trenes de alta velocidad provenientes de Japón, Francia y España.

La potencia que debe ser suministrada para movilizar el tren y vagones se refleja en el esfuerzo de tracción, que es una fuerza variable con la velocidad y cuya curva al intersectarla con la curva de resistencia al avance (en presencia o ausencia de gradientes) permite calcular la velocidad de régimen continuo. Para el tramo del recorrido que presenta la gradiente máxima se decidió que el tren viajara a 100 km/h. Con esta restricción se pudo obtener las potencias que cada motor debe entregar, las que resultaron distintas para cada modelo de tren de acuerdo con sus curvas características. Otro aspecto en consideración es la fuerza de adherencia entre el riel y las ruedas con la que se determinó la velocidad crítica de circulación.

Todos los trenes de alta velocidad resultaron ser aptos para el trazado porque la potencia requerida es menor que la suministrada por los motores que tienen de fábrica. Sin embargo se escogieron dos de ellos en particular: *Shinkansen 700* y *Talgo 350* debido a que solicitan una menor potencia en comparación con los demás candidatos. Para el *Shinkansen 700* son necesarios 48 motores de 152 kW cada uno y para el *Talgo 350* son necesarios 8 motores de 406 kW.

Para especificar los motores de inducción que suministren esta potencia se debió estimar los parámetros eléctricos a partir de los datos que entrega el fabricante. En este proceso se utilizó el algoritmo de mínimos cuadrados a través del método numérico de Gauss-Newton debido a la no linealidad del sistema de ecuaciones. Para simplificar el análisis se consideraron algunos parámetros independientes, como la reactancia y resistencia del estator, lo que disminuyó el número de ecuaciones a cuatro. Este proceso se aplicó a seis máquinas de inducción del fabricante ABB de igual tensión de entrada: tres de 200 kW y tres de 450 kW, cada una de ellas con distinto números de polos.

Con los parámetros establecidos para estas máquinas se observó el comportamiento para las siguientes exigencias: alcanzar una velocidad igual a 100 km/h en la gradiente máxima, capacidad de iniciar la marcha y alcanzar la velocidad máxima impuesta de 250 km/h. Lo determinante en estas condiciones es el torque entregado a las ruedas además de su velocidad de giro. Para ello se recurrió a analizar dos situaciones: cambiar la frecuencia de alimentación y por lo tanto la velocidad del motor, o usar cajas de engranajes. La primera opción no resultó satisfactoria debido al bajo torque desarrollado para las velocidades de giro requeridas. La segunda opción significó una disminución en las revoluciones y un aumento del torque, lo que junto a operar en condiciones nominales hizo de esta alternativa la elegida. Para la partida se observó que las máquinas se comportaron adecuadamente a una frecuencia de 10 Hz. Finalmente las máquinas seleccionadas fueron las de cuatro polos por tener la menor masa total entre todas.

En el aspecto económico se estimó el valor de inversión del proyecto, compuesto por el costo de infraestructura y adquisición de material rodante. El costo de infraestructura representó a la mayor parte de la inversión y se calculó dividiendo el recorrido en tres zonas caracterizadas por la dificultad del terreno para construir vías de alta velocidad. Para la obtención del costo del material rodante fue requisito conocer el flujo proyectado de pasajeros para el año 2023, suponiendo que para esa fecha el proyecto entraría en funcionamiento. Se determinaron en total tres *Shinkansen* 700 y ocho *Talgo* 350 para satisfacer la demanda, debido a la mayor capacidad del tren japonés. Por este motivo y por el menor costo de adquisición, el tren de alta velocidad elegido para el recorrido Santiago-Valparaíso fue el *Shinkansen* 700. No se consideró el precio del motor especificado para este tren porque el que viene de fábrica es suficiente para las exigencias. Igualmente se incluyó el precio de los mismos como referencia.

El costo total de inversión del proyecto se estimó en 1.597.875.610 dólares, siendo 92% de esta cifra debido a la infraestructura, demostrando la importancia y cuidado que hay que poner en la construcción de las vías y elementos anexos que sustenten el servicio.

En este trabajo se logró el objetivo de determinar un tren de alta velocidad compatible con el trazado escogido, además de especificar un motor que tiene las características para cumplir condiciones especiales.

5.2 TRABAJO FUTURO

Como trabajo futuro se plantea la posibilidad de estudiar un trazado distinto, incluso planificar uno nuevo debido a que el elegido no tiene vías aptas para alta velocidad. La idea es que el trazado no presente dificultades para la construcción de las obras y que permita un viaje más expreso. Como la topografía entre Santiago y Valparaíso es accidentada se podría tomar en consideración evaluar recorridos que conecten otras ciudades del país.

Las máquinas de inducción analizadas son de propósito general y no de tracción como deben ser. Estas máquinas presentan mejor comportamiento entregando torques elevados en la partida y una característica torque-velocidad más constante con la velocidad. El desempeño y comportamiento de los motores debiese ser mejor que el presentado.

Se plantea un desarrollo más profundo del análisis económico porque el expuesto sólo abarcó los costos de inversión, dejando de lado por ejemplo el precio de los pasajes que implica conocer costos de mantención de infraestructura, costos de operación y mantención de los trenes, flota efectiva de trenes calculada por medio de simulaciones, costos sociales y ambientales entre otros lo que puede ser decisivo para la implementación real del proyecto.

REFERENCIAS

- [1] International Union of Railways UIC. (2010, Julio) International Union of Railways UIC. [Online]. www.uic.org/spip.php?article971
- [2] Federal Railroad Administration, "Vision for high-speed rail in america," U.S. Department of Transportation, Febrero 2009.
- [3] Railway technical web pages. (2012, Mayo) Electric locomotive glossary. [Online]. <http://www.railway-technical.com/elec-loco-bloc.shtml#Cooling-Fans>
- [4] (2012, Junio) Eastern Asia map 2011. [Online]. http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/f/f3/Eastern_Asia_HSR2011.svg/1000px-Eastern_Asia_HSR2011.svg.png
- [5] (2012, Junio) High speed railroad map Europe 2011. [Online]. http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/e/ea/High_Speed_Railroad_Map_Europe_2011.svg/1000px-High_Speed_Railroad_Map_Europe_2011.svg.png
- [6] C. J. Taylor. (2007) World Speed Survey 2007. [Online]. http://www.railwaygazette.com/fileadmin/user_upload/railwaygazette.com/PDF/RailwayGazetteWorldSpeedSurvey2007.pdf
- [7] RailEurope. (2013) TGV. [Online]. <http://www.raileurope.cl/train/tgv-436>
- [8] TGV Web. (2000) TGV Web. [Online]. <http://www.trainweb.org/tgvpages/spotter.html>
- [9] RailEurope. (2013) ICE. [Online]. <http://www.raileurope.cl/train/ice-428>
- [10] Tobias Benjamin Köhler. (2001) InterCityExpress. [Online]. <http://www.railfaneurope.net/ice/>
- [11] (2012, Agosto) Shinkansen Map. [Online]. http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/d/d4/Shinkansen_map_201208_en.png/744px-Shinkansen_map_201208_en.png
- [12] M. Yoshizawa, T. Fukushima K. Sato, "Traction systems using power electronics for Shinkansen High-speed Electric Multiple Units," in *Power Electronics Conference (IPEC), 2010 International*, 2010, pp. 2859-2866.
- [13] Central Japan Railway Company. (2010) Rolling stock Tokaido Shinkansen. [Online]. http://english.jr-central.co.jp/about/_pdf/about_rolling_stock.pdf
- [14] (2011, Septiembre) Spain High Speed Rail. [Online]. http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/c/c4/Spain_High_Speed_Rail.svg/994px-Spain_High_Speed_Rail.svg.png
- [15] RENFE. (2012, Marzo) Nuestros Trenes. [Online]. http://www.renfe.com/viajeros/nuestros_trenes/index.html
- [16] K. Kim y J. Lee H. Lee, "Review of MAGLEV Train Technologies," *IEEE transactions on magnetics*, vol. 42, no. 7, pp. 1917-1925, Julio 2006.
- [17] North American MAGLEV Transport Institute. (2012) MAGLEV vs train comparisons. [Online]. http://namti.org/?page_id=2166
- [18] A. R. Eastman y W. F. Hayes, "MAGLEV systems development status," *IEEE AES Magazine*, pp. 21-30, Enero 1988.

- [19] Jorge Romo and Luis Vargas, "EL42C Conversión Electromecánica de la Energía," Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Capítulo 6, Máquinas de Inducción 2007.
- [20] Joaquín Pedra, "On the Determination of Induction Motor Parameters," *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS*, vol. 28, no. 4, Noviembre 2008.
- [21] R. J. Hill, "Electric railway traction Part 2 Traction drives with three-phase," *POWER ENGINEERING JOURNAL*, Junio 1994.
- [22] Railway Technical Web Pages. (2013) Electronic power for trains. [Online]. <http://www.railway-technical.com/tract-02.shtml>
- [23] Alberto García Álvarez, *Dinámica de los trenes en alta velocidad*, Sexta ed.: Fundación de los Ferrocarriles Españoles, 2010, 103p.
- [24] Eduardo Aragón Gurría, "Determinación de las condiciones óptimas de conducción como forma de reducir el consumo energético de los trenes," Universidad Pontificia Comillas, Madrid, Proyecto fin de carrera 2005.
- [25] SECTRA - Libra Ingenieros Consultores, "OperaTren Modelo de Operación Ferroviaria," Ministerio de Planificación y Cooperación MIDEPLAN, Santiago, 2003.
- [26] José A. Jiménez Redondo. (2010) American Public Transportation Association. [Online]. <http://www.apta.com/mc/hsr/previous/2010/HighSpeed%20Rail%20Presentations/High-Speed-Trains-Overview.pdf>
- [27] Juan Pablo Martínez, "Ingeniería del Transporte I," Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Fisicomatemáticas e Ingeniería, Unidad 6 Dinámica de la tracción ferroviaria, apuntes de curso 2008.
- [28] Ernesto Vargas Cádiz. (2007) Historia del Ferrocarril de Valparaíso a Santiago. [Online]. <http://www.amigosdeltren.cl/historia-ferroviaria/historia-ferrocarril-valparaiso-santiago>
- [29] Ministerio de Obras Públicas. Conexión Ferroviaria Santiago - V Región. [Online]. http://www.concesiones.cl/proyectos/Paginas/detalle_adjudicacion.aspx?item=150
- [30] Carla Vásquez, "MOP agrega a su cartera de proyectos el tren rápido Santiago-Valparaíso," *La Tercera*, p. 18, Febrero 2010.
- [31] M. H. Haque, "Determination of NEMA Design Induction Motor," *IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION*, vol. 23, no. 4, Diciembre 2008.
- [32] ABB. (2011) High voltage cast iron motors. [Online]. [http://www05.abb.com/global/scot/scot234.nsf/veritydisplay/593ffc2bb0b08efac1257917003fae1c/\\$file/HV_Induction_motors_technical_IEC_catalog_FINAL_EN_092011_lowres.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot234.nsf/veritydisplay/593ffc2bb0b08efac1257917003fae1c/$file/HV_Induction_motors_technical_IEC_catalog_FINAL_EN_092011_lowres.pdf)
- [33] ABB. (2011) Process performance IE2 high efficiency cast iron motors. [Online]. [http://www05.abb.com/global/scot/scot234.nsf/veritydisplay/c4fabac2479e4a1dc125798a0024d79d/\\$file/Catalog%20Process%20perf%209AKK104556%20EN%2005_2011%20RevC.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot234.nsf/veritydisplay/c4fabac2479e4a1dc125798a0024d79d/$file/Catalog%20Process%20perf%209AKK104556%20EN%2005_2011%20RevC.pdf)
- [34] ABB. (2013) Frameless Traction Motors. [Online]. [http://www05.abb.com/global/scot/scot234.nsf/veritydisplay/8d97662e6c8b457ac125784f00380271/\\$file/Fram%20induction.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot234.nsf/veritydisplay/8d97662e6c8b457ac125784f00380271/$file/Fram%20induction.pdf)

- [35] Isao Sakamoto, "Shinkansen Bogies," *Railway Technology Today*, pp. 46-53, Marzo 1999. [Online]. <http://jrtr.net/jrtr19/pdf/Technology.pdf>
- [36] Bombardier. (2012) FLEXX Power Bogies. [Online]. http://www.bombardier.com/files/en/supporting_docs/BT-Bogies-FLEXX_Power.pdf
- [37] Ginés de Rus. (2008) International transport forum. [Online]. <http://www.internationaltransportforum.org/jtrc/discussionpapers/dp200816.pdf>
- [38] David Levinson, Jean Michel Mathieu, and et al., "The full cost of high-speed rail: an engineering approach," *The Annals of Regional Science*, no. 31, pp. 189-215, 1997.
- [39] SERNATUR. (2013, Febrero) Documentos Estadísticos Informe Anual 2012. [Online]. <http://www.sernatur.cl/estudios-y-estadisticas?did=369>
- [40] SERNATUR. (2012, Febrero) Documentos Estadísticos Informe Anual 2011. [Online]. <http://www.sernatur.cl/estudios-y-estadisticas?did=259>
- [41] The National System of High-Speed Movement. (2012) HSR in the World - Shinkansen. [Online]. http://speedrail.ru/en/scm_in_the_world/high_speed_trains_in_the_world/detail73.html
- [42] Ferropedia. (2006) Costo por plaza. [Online]. http://web.archive.org/web/20130609194127/http://ferropedia.es/wiki/Costo_por_plaza
- [43] Ferropedia. (2013) Costos de construcción de infraestructura. [Online]. http://web.archive.org/web/20130617095547/http://ferropedia.es/wiki/Costos_de_construcci%C3%B3n_de_infraestructura

ANEXOS

A. FAMILIA DE CURVAS TORQUE-VELOCIDAD DE LAS MÁQUINAS PARA DISTINTAS FRECUENCIAS

La frecuencia nominal (50 Hz) se presenta en azul.

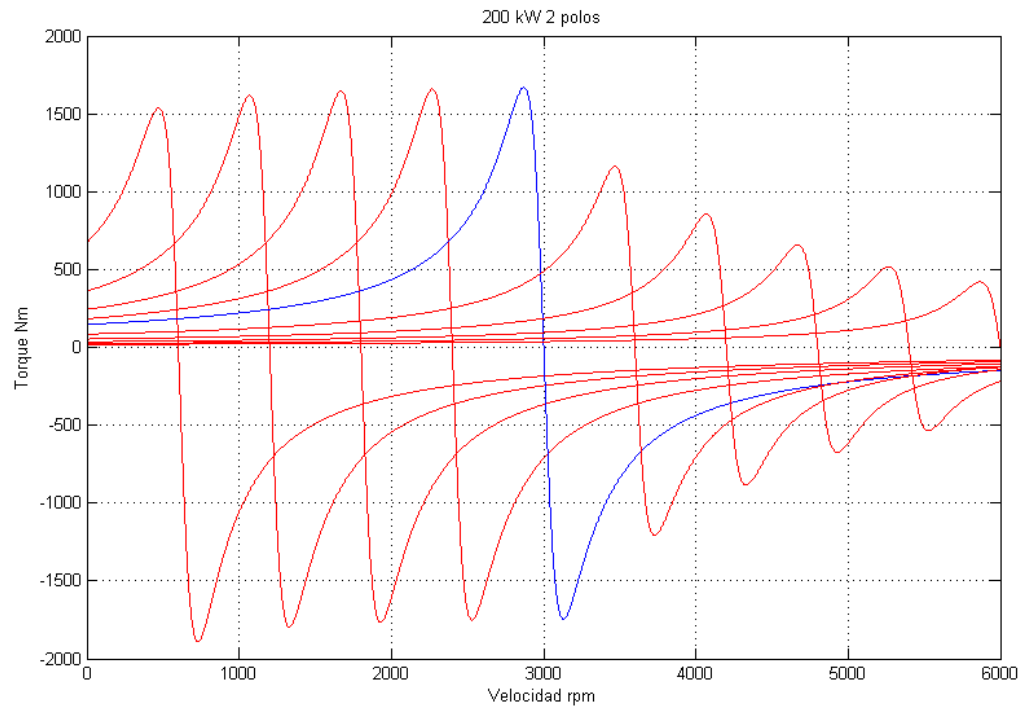


Figura A.1: Curvas torque-velocidad de la máquina de 200 kW y 2 polos.

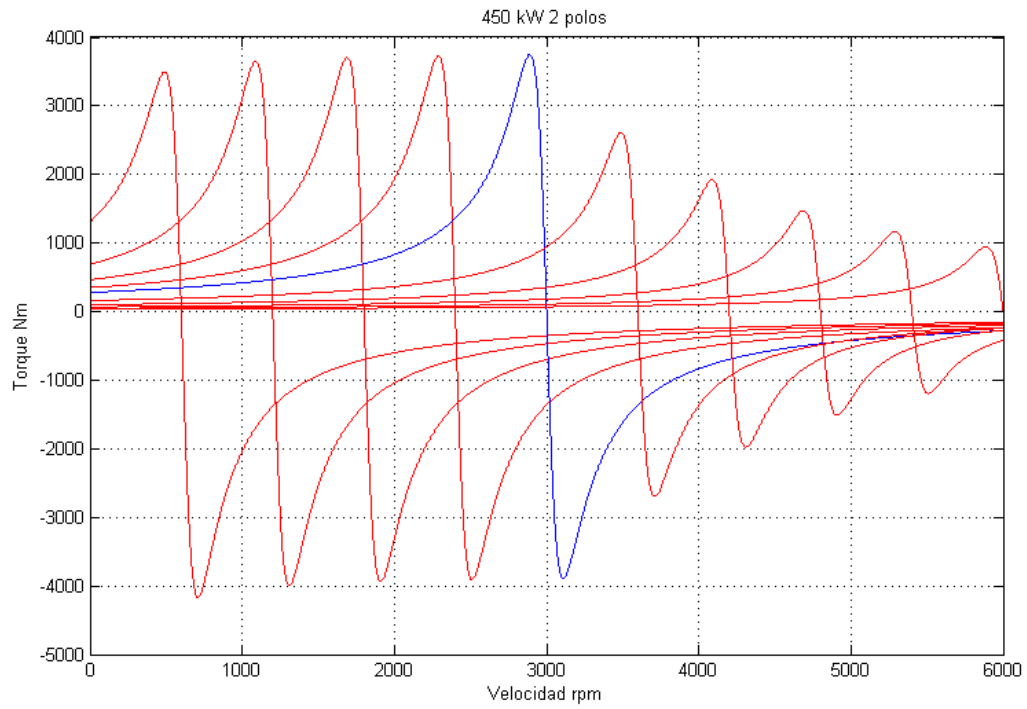


Figura A.2: Curvas torque-velocidad de la máquina de 450 kW y 2 polos.

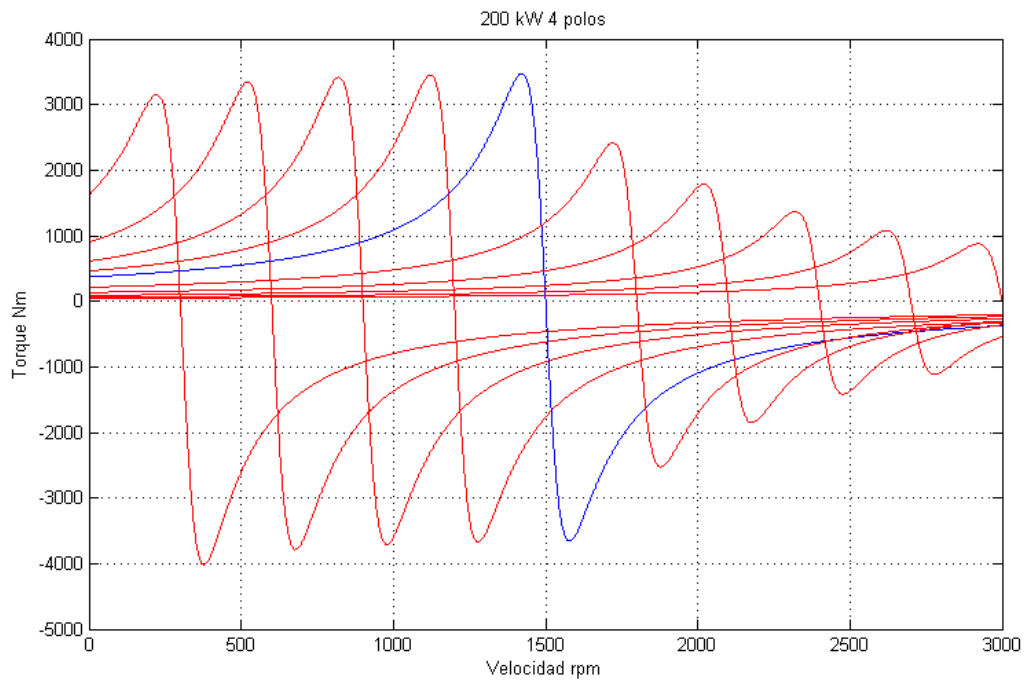


Figura A.3: Curvas torque-velocidad de la máquina de 200 kW y 4 polos.

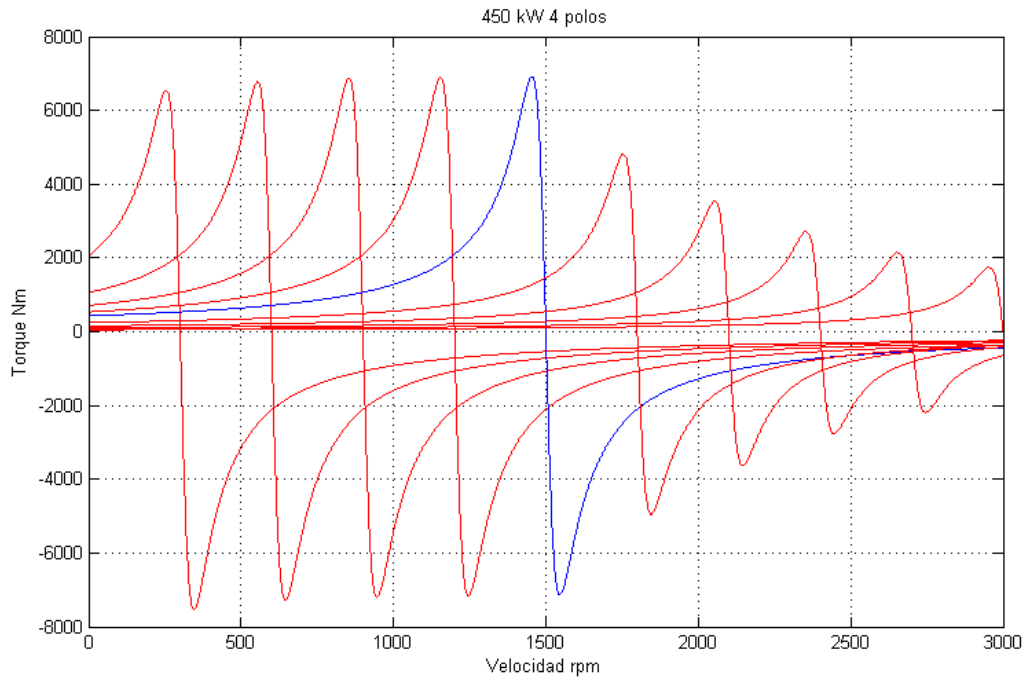


Figura A.4: Curvas torque-velocidad de la máquina de 450 kW y 4 polos.

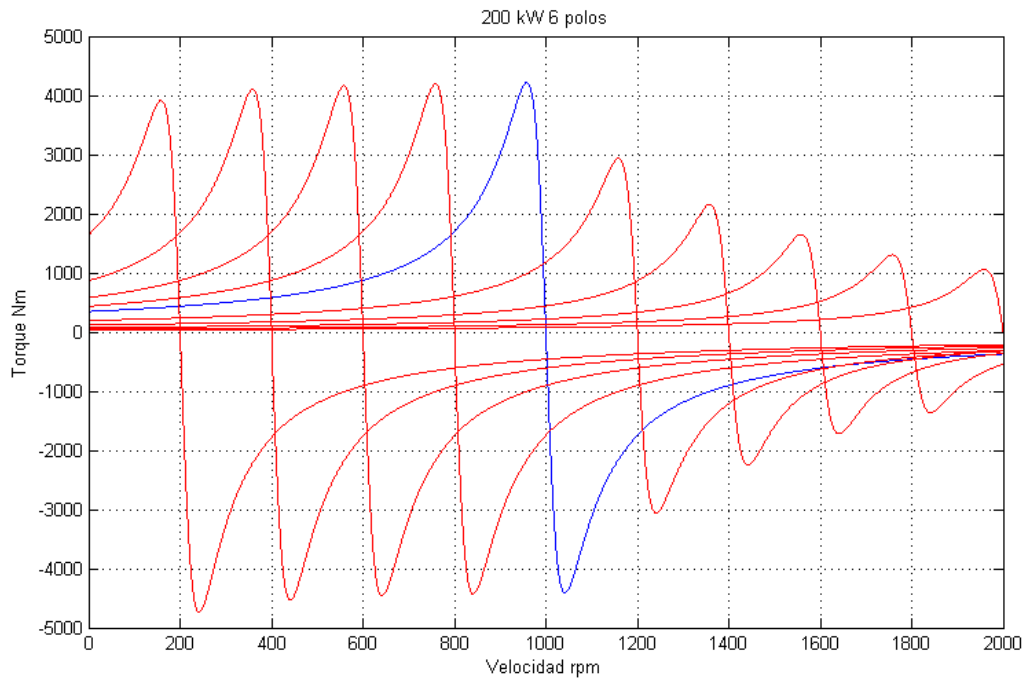


Figura A.5: Curvas torque-velocidad de la máquina de 200 kW y 6 polos.

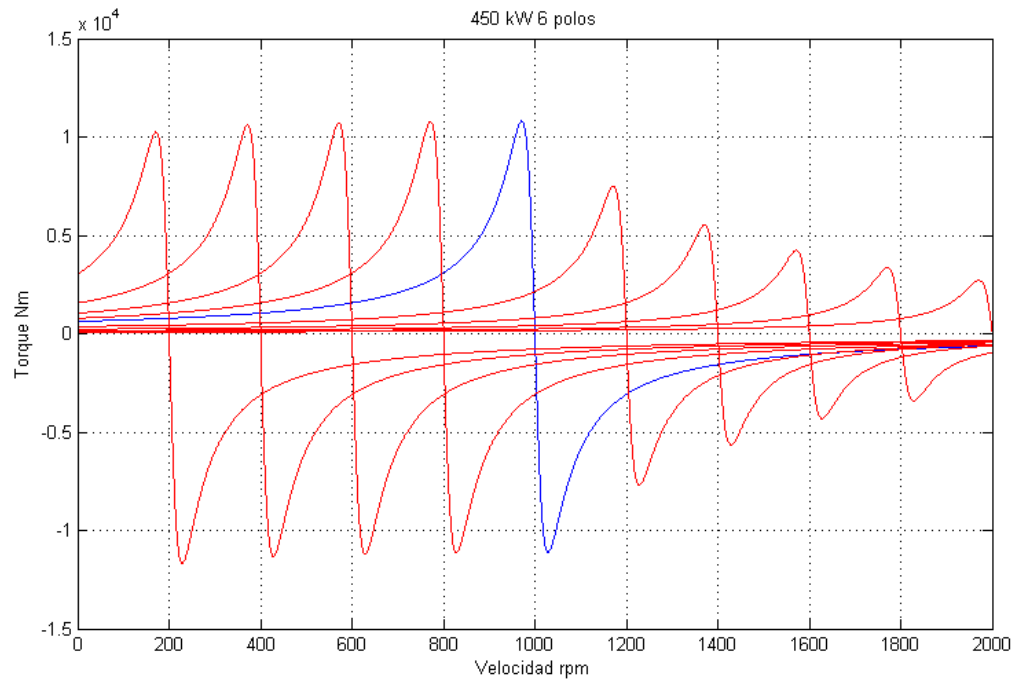


Figura A.6: Curvas torque-velocidad de la máquina de 450 kW y 6 polos.