



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



TRABAJO FINAL DE GRADO

Simulación de la evolución del desgaste del hilo de contacto en catenarias ferroviarias de alta velocidad

Grado en Ingeniería Mecánica

Autor: **David Escrivá Valleres**

Tutor: **Santiago Gregori Verdú**

Septiembre de 2021

Universitat Politècnica de València

RESUMEN

La catenaria ferroviaria es la estructura aérea de cables situada a lo largo del trazado de la vía encargada del suministro eléctrico del tren. Dicho suministro se realiza mediante la interacción del hilo de contacto con los frotadores del pantógrafo, mecanismo ubicado en la parte superior de la locomotora. Debido a las elevadas velocidades de deslizamiento y a la fuerza de interacción entre ambos sistemas en contacto, se produce un elevado desgaste tanto en el hilo de contacto como en los frotadores que finalmente obliga a reemplazar estos componentes.

En este trabajo se estudia la evolución a largo plazo del desgaste del hilo de contacto en función de diferentes parámetros operativos como la velocidad del tren o la fuerza de contacto entre el hilo de contacto y el pantógrafo. Para ello se emplea el software PACDIN, código desarrollado en Matlab por miembros del Instituto de Ingeniería Mecánica y Biomecánica de la UPV.

Durante el proyecto se explica cómo se utiliza este software y se analizan los resultados tras simular con un mismo modelo de catenaria inicial el desgaste del hilo de contacto después de interaccionar con el pantógrafo. Estos resultados de desgaste se analizan variando la velocidad de circulación y la fuerza estática de empuje del pantógrafo sobre el hilo de contacto.

Finalmente se concluye observando cuáles son los parámetros más importantes que influyen en el desgaste del hilo de contacto y así poder estimar la vida útil del hilo de contacto para distintas condiciones de funcionamiento.

Palabras clave: Catenaria, hilo de contacto, pantógrafo, desgaste.

ABSTRACT

The railway catenary is the aerial cable structure located along the track's route in charge of the train's electricity supply. Said supply is carried out through the interaction of the contact wire with the rubbers of the pantograph, a mechanism located in the upper part of the train. Due to the high sliding speeds and the interaction force between both systems in contact, there is high wear on both the contact wire and the rubbers, which ultimately forces these components to be replaced.

In this study, the long-term evolution of contact wire wear is studied as a function of different operating parameters such as train speed or the contact force between the contact wire and the pantograph. For this, the PACDIN software is employed, a code developed in Matlab by members of the UPV's Institute of Mechanical and Biomechanical Engineering.

During the project, it's explained how this software is used and how the results are analyzed after simulating with the same initial catenary model the wear of the contact wire after interacting with the pantograph. These wear results are analyzed by varying the flow speed and the static force of the pantograph on the contact wire.

It is concluded by observing which are the most important parameters that influence the wear of the contact wire and estimate the useful life of the contact wire for different operating conditions.

Key words: Catenary, contact wire, panthograph, wear.

Contenido

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 OBJETIVOS.....	1
1.2 HISTORIA DEL FERROCARRIL EN ESPAÑA.....	1
2. LA CATENARIA.....	2
2.1 INTRODUCCIÓN DE LA CATENARIA.....	2
2.2 ELEMENTOS QUE COMPONEN UNA CATENARIA.....	3
2.3 ESPECIFICACIONES GEOMETRICAS DE LA CATENARIA.....	5
2.4 ESPECIFICACIONES MECÁNICAS DE LA CATENARIA.....	8
2.5 ESPECIFICACIONES ELECTRICAS DE LA CATENARIA.....	9
3. PANTÓGRAFO.....	9
4. DESCRIPCIÓN DE MODELOS.....	10
4.1 MODELO DE LA CATENARIA.....	10
4.2 MODELO DEL PANTÓGRAFO.....	11
4.3 MODELO DE INTERACCIÓN.....	12
4.4 MODELO DE DESGASTE.....	13
4.4.1 INTRODUCCIÓN AL MODELO DE DESGASTE.....	13
4.4.2 PRUEBAS EXPERIMENTALES.....	14
4.4.3 RESULTADOS DEL LABORATORIO.....	15
5. ALGORITMO Y PACDIN.....	20
5.1 INTRODUCCIÓN AL PROGRAMA.....	20
5.2 ENTARDA DE DATOS.....	20
5.3 GENCAT.....	30
5.4 INTERACCIÓN PANTÓGRAFO CATENARIA (SIMULACIÓN DINÁMICA).....	32
5.5 MODELO DE DESGASTE.....	33
5.6 SECCIÓN RESULTANTE Y EQUILIBRIO ESTÁTICO.....	34
6. RESULTADOS NUMÉRICOS.....	36
6.1-VARIACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DEL SISTEMA EN FUNCIÓN DEL DESGASTE.....	37
6.2 VARIACIÓN DEL DESGASTE EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD DEL PANTÓGRAFO.....	41
6.2.1 FUERZAS DE CONTACTO.....	42
6.2.3 PORCENTAJE DE ÁREA DESGASTADA.....	47
6.2.4 TABLAS COMPARATIVAS.....	50

6.3 VARIACIÓN DEL DESGASTE EN FUNCIÓN DE LA FUERZA DE PRECARGA ESTÁTICA DEL PANTÓGRAFO	51
6.3.1 FUERZAS DE CONTACTO	52
6.3.2 TASAS DE DESGASTE	54
6.3.3 PORCENTAJE DE ÁREA DESGASTADA	57
6.3.4 TABLAS COMPARATIVAS	60
CONCLUSIONES	61
PRESUPUESTO	62
PLIEGO DE CONDICIONES	64
NORMATIVA	64
LICENCIAS	64
CONOCIMIENTOS REQUERIDOS	64
BIBLIOGRAFÍA	65

Índice de tablas

Tabla 1- Altura del sistema de una catenaria [9].	6
Tabla 2 - Altura del hilo de contacto [9].	6
Tabla 3 - Descentramiento del hilo de contacto en curva [11].	7
Tabla 4 - Pendiente del hilo de contacto [9].	7
Tabla 5 - Vano máximo según el radio de la vía [11].	8
Tabla 6 - Parámetros utilizados en las pruebas de desgaste [17].	15
Tabla 7 - parámetros del modelo de desgaste [17].	17
Tabla 8 - Tabla comparativa de la fuerza de contacto para una velocidad de 300 km/h y una fuerza estática de 142.8 N sobre una catenaria nominal y una final.	41
Tabla 9 -Tabla comparativa de la fuerza de contacto para las distintas velocidades de simulación con una fuerza eterna de 142.8 N.	50
Tabla 10 - Tabla comparativa de la fuerza de contacto para las distintas fuerzas estática con una velocidad constante de 300 km/h.	60
Tabla 11 - Costes del equipo informático.	62
Tabla 12 - Costes indirectos.	63
Tabla 13 - Presupuesto final	63

Índice de figuras

Figura 1 – Solape de cantones [5].	2
Figura 2 - Elementos estructurales de una catenaria [8].	4
Figura 3 - Sistema de tensionado de una catenaria [8].	5
Figura 4 - Descentramiento del hilo de contacto.	7
Figura 5 – Pantógrafo [8].	10
Figura 6 – Mallado de catenaria [13].	11
Figura 7 - Modelo de pantógrafo [15].	12
Figura 8 - Modelo de interacción [16].	13
Figura 9 - Rueda de fibra de vidrio del banco de pruebas [17].	14
Figura 10 - Resultados de tasa de desgaste obtenidos en los ensayos [17].	16
Figura 11 - Resultados de tasa de desgaste y su contribución mecánica, eléctrica y por arco eléctrico [13].	18
Figura 12 - Resultados de tasa de desgaste para distintas velocidades [13].	18
Figura 13 - Resultados de tasa de desgaste para distintas fuerzas de contacto [13].	19
Figura 14 - Algoritmo del software PACDIN.	20
Figura 15 - Parámetros del trazado de la vía.	21
Figura 16 - Altura de los soportes del sustentador.	22
Figura 17 - Distancia entre postes.	22
Figura 18 – Parámetros del brazo de registro.	23
Figura 19 - Valores del descentramiento del hilo de contacto.	23
Figura 20 - Altura del cable de contacto en los brazos de registro.	24
Figura 21 - Parámetros de las poleas y grifas.	24
Figura 22 - Tensiones en los cables.	25
Figura 23 - Parámetros de los materiales de los elementos de la catenaria.	25
Figura 24 - Parámetros del mallado de la catenaria.	26
Figura 25 - Número de péndolas por vano y distancia entre ellas.	27
Figura 26 - Tolerancias para verificar la convergencia.	28
Figura 27 - Parámetros del pantógrafo.	28
Figura 28 - Parámetros de la simulación.	29
Figura 29 - Parámetros de la solución.	29
Figura 30 - Parámetros de amortiguamiento.	30
Figura 31 - Método Newton-Raphson [18].	31
Figura 32 - Configuración del modelo de catenaria inicial [13].	32
Figura 33 - Fuerza de contacto entre el pantógrafo y el hilo de contacto.	33
Figura 34 - Sección resultante [19].	34
Figura 35 - Pérdida de sección del hilo de contacto.	35
Figura 36 - Altura del hilo de contacto nominal y final.	36
Figura 37 - Altura hilo de contacto nominal y final para una velocidad de 300 km/h y una fuerza estática de 142.8 N.	37
Figura 38 - Fuerza de contacto inicial y final para una velocidad de 300 km/h y una fuerza estática de 142.8 N.	38
Figura 39 - Fuerza de contacto inicial y final para una velocidad de 300 km/h y una fuerza estática de 142.8 N (ampliada).	38

Figura 40 - Tasa de desgaste inicial y final para una velocidad de 300 km/h y una fuerza estática de 142.8 N.	39
Figura 41 - Tasa de desgaste inicial y final para una velocidad de 300 km/h y una fuerza estática de 142.8 N (ampliada).	39
Figura 42 - Pérdida de sección del hilo de contacto para una velocidad de 300 km/h y una fuerza estática de 142.8N.	40
Figura 43 - Altura de desgaste del hilo de contacto para una velocidad de 300 km/h y una fuerza estática de 142.8 N.	40
Figura 44 - Fuerza de contacto para una velocidad de 200 km/h y una fuerza estática de 142.8 N.	42
Figura 45 - Fuerza de contacto para una velocidad de 250 km/h y una fuerza estática de 142.8 N.	43
Figura 46 - Fuerza de contacto para una velocidad de 300 km/h y una fuerza estática de 142.8N.	44
Figura 47 - Fuerza de contacto para una velocidad de 350 km/h y una fuerza estática de 142.8 N.	44
Figura 48 - Tasa de desgaste para una velocidad de 200 km/h y una fuerza estática de 142.8 N.	45
Figura 49 - Tasa de desgaste para una velocidad de 250 km/h y una fuerza estática de 142.8 N.	46
Figura 50 - Tasa de desgaste para una velocidad de 300 km/h y una fuerza estática de 142.8 N.	46
Figura 51 - Tasa de desgaste para una velocidad de 350 km/h y una fuerza estática de 142.8 N.	47
Figura 52 - Perdida de sección del hilo de contacto para una velocidad de 200 km/h y una fuerza estática de 142.8 N.	48
Figura 53 - Perdida de sección del hilo de contacto para una velocidad de 250 km/h y una fuerza estática de 142.8 N.	48
Figura 54 - Perdida de sección del hilo de contacto para una velocidad de 300 km/h y una fuerza estática de 142.8 N.	49
Figura 55 - Perdida de sección del hilo de contacto para una velocidad de 350 km/h y una fuerza estática de 142.8 N.	49
Figura 56 - Fuerza de contacto para una velocidad de 300 km/h y una fuerza estática de 50 N.	52
Figura 57 - Fuerza de contacto para una velocidad de 300 km/h y una fuerza estática de 100 N.	53
Figura 58 - Fuerza de contacto para una velocidad de 300 km/h y una fuerza estática de 150 N.	53
Figura 59 - Fuerza de contacto para una velocidad de 300 km/h y una fuerza estática de 200 N.	54
Figura 60 - Tasa de desgaste para una velocidad de 300 km/h y una fuerza estática de 50 N.	55
Figura 61 - Tasa de desgaste para una velocidad de 300 km/h y una fuerza estática de 100 N.	55
Figura 62 - Tasa de desgaste para una velocidad de 300 km/h y una fuerza estática de 150 N.	56

Figura 63 - Tasa de desgaste para una velocidad de 300 km/h y una fuerza estática de 200 N.....	56
Figura 64 - Pérdida de sección del hilo de contacto para una velocidad de 300 km/h y una fuerza estática de 50 N.	57
Figura 65 - Pérdida de sección del hilo de contacto para una velocidad de 300 km/h y una fuerza estática de 100 N.	58
Figura 66 - Pérdida de sección del hilo de contacto para una velocidad de 300 km/h y una fuerza estática de 150 N.	58
Figura 67 - Pérdida de sección del hilo de contacto para una velocidad de 300 km/h y una fuerza estática de 200 N.	59

1. INTRODUCCIÓN

1.1 OBJETIVOS

Este Trabajo Final de Grado tiene como objetivo el análisis del desgaste del hilo de contacto de una catenaria. En este análisis se tienen en cuenta diferentes parámetros de operación como son la velocidad de circulación del tren o la fuerza de elevación del pantógrafo. Estos estudios se realizan con una herramienta de simulación la cual es un software llamado PACDIN (PAntograph Catenary Dynamic INteraction).

Las simulaciones se realizarán con el software PACDIN, código desarrollado en Matlab por miembros del Instituto de Ingeniería Mecánica y Biomecánica de la UPV. En las simulaciones se considera tanto la dinámica acoplada entre pantógrafo y catenaria para obtener la fuerza de interacción entre ambos, como el efecto en la catenaria de la pérdida de sección del hilo de contacto en cada pasada del pantógrafo.

Es por tanto muy interesante para el diseñador de catenarias conocer estos datos sobre el desgaste que se producirá en el cable de contacto para así poder estimar la vida útil restante de una determinada catenaria, así como diseñar catenarias con una vida útil más prolongada ante este fenómeno.

1.2 HISTORIA DEL FERROCARRIL EN ESPAÑA

La historia del ferrocarril en la península ibérica comienza en 1848 con una línea ferroviaria de Barcelona a Mataró. Esta línea contaba con 29.1km de longitud.

Desde entonces el servicio ferroviario en España se fue expandiendo y destaca que en 1992 se inaugura la línea de alta velocidad que une Madrid-Sevilla. Estas líneas se han ido expandiendo por España hasta construir una nueva red de alta velocidad AVE [1].

AVE es el servicio ferroviario de Alta Velocidad Española de la operadora Renfe. Estos trenes de alta velocidad pueden alcanzar una velocidad comercial operativa de 300 km/h ofreciendo recorrer largas distancias en menor tiempo.

Hoy en día España cuenta con una extensa red ferroviaria de alta velocidad a lo largo de toda la Península Ibérica [2].

Esta red ferroviaria cuenta con 3400 km en servicio aproximadamente siendo la red ferroviaria de alta velocidad más extensa de Europa y la segunda del mundo después de China [3].

2. LA CATENARIA

2.1 INTRODUCCIÓN DE LA CATENARIA

En temas ferroviarios se utiliza la palabra catenaria para referirse a la Línea Aérea de Contacto (L.A.C). Esta línea es el conjunto de cables que se encuentran suspendidos sobre la vía y que se encargan de transmitir energía eléctrica a los trenes.

A través de los cables de la catenaria se alimentan los motores de los trenes con tensiones que van desde 600V a 3kV en corriente continua o entre 15kV y 25 kV en corriente alterna. Estas corrientes son recibidas por el tren a través del pantógrafo, que es el mecanismo articulado situado encima de la locomotora [4].

La catenaria tiene que seguir el mismo recorrido que la vía y como no es practico tener un único cable continuo de tanta longitud, debido a que se dificulta su mantenimiento y es más seguro dividirlo en varios tramos, esta se divide en cantones. El cantón es un tramo que suele tener una longitud aproximada de 1 kilómetro, el cual incluye un sistema de tensionado de cable al inicio y final de este. El sistema de tensionado consigue que se mantenga una tensión constante en el cable de contacto y en el sustentador ante las dilataciones térmicas producidas por cambios de temperatura. Esto no sería posible si únicamente hubiera un cable durante todo el recorrido de la vía. Además, al tener la división de la catenaria en cantones se hace más sencillo realizar las operaciones de mantenimiento.

Como se observa en la figura 1, los cantones son solapados unos con otros de manera que en ningún punto del recorrido el pantógrafo deja de estar en contacto con la catenaria y, por lo tanto, nunca deja de recibir alimentación eléctrica. El cantón que finaliza va aumentando gradualmente la altura de su hilo de contacto al mismo tiempo que el cantón que inicia va disminuyendo la altura de su hilo de contacto.

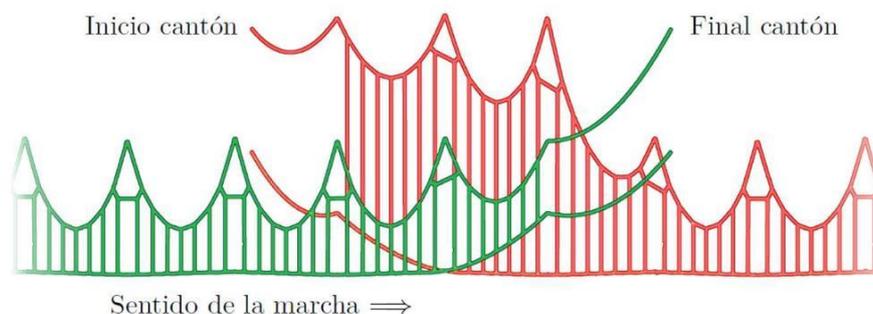


FIGURA 1 – SOLAPE DE CANTONES [5].

Las catenarias están constituidas principalmente por dos cables: el cable sustentador y el hilo de contacto. El objetivo primordial del primero es mantener al segundo cable paralelo al plano de rodadura siendo sostenido mediante elementos colgantes denominados péndolas. Para entender cómo funciona se necesita conocer los elementos que componen la catenaria.

2.2 ELEMENTOS QUE COMPONEN UNA CATENARIA

-Hilo de contacto:

El hilo de contacto es el elemento principal en las catenarias, es el único elemento que se encuentra en contacto con el pantógrafo y es el encargado de transmitir toda la energía eléctrica al pantógrafo. El hilo de contacto se mantiene a una altura casi constante respecto al tren durante todo el recorrido de la vía. Además, tiene un ligero descentramiento respecto a la vía que va variando durante el recorrido para uniformizar el desgaste del pantógrafo.

-Cable sustentador:

Este cable se encarga de mantener la altura del hilo de contacto en un intervalo de valores necesarios para el correcto funcionamiento de la línea.

Para mejorar este objetivo se disponen de falsos sustentadores, también conocidos como péndolas en Y. La función de estos cables es de reducir la rigidez vertical en las zonas cercanas a los soportes. El inconveniente de los falsos sustentadores es que requieren de un montaje muy preciso [2].

-Péndolas:

Es el conjunto de cables que permiten distribuir el peso del hilo de contacto sobre el sustentador. Su función es mantener el hilo de contacto a la altura adecuada transmitiendo los esfuerzos provocados por el peso del hilo de contacto directamente al cable sustentador. Las péndolas se unen al hilo de contacto y al sustentador mediante grifas. Estas grifas son elementos que se utilizan para la conexión eléctrica y mecánica en un sistema electrificado [7].

Las péndolas se distribuyen a lo largo de los vanos. A mayor número de péndolas se consigue una rigidez más uniforme, pero también se encarecen los costes de la instalación y de mantenimiento [2].

Las péndolas situadas al principio y final de los vanos pueden estar colocadas en Y mediante un falso sustentador. El inconveniente de este tipo de péndolas

es que el coste de montaje y mantenimiento aumenta debido a su mayor complejidad.

-Ménsulas:

Son los elementos de sustentación que permiten sostener el peso de la catenaria en la posición adecuada. Las ménsulas se fijan en los postes [8].

-Postes:

Son los elementos estructurales que soportan el peso total del conjunto de la catenaria. Tienen la altura necesaria para sostener las ménsulas a la altura correcta. Están hechos en su gran mayoría de metal o de hormigón armado. La distancia que existen entre la vía y estos postes se llama distancia de gálibo de la instalación.

Los elementos comentados anteriormente se pueden apreciar en la figura 2.

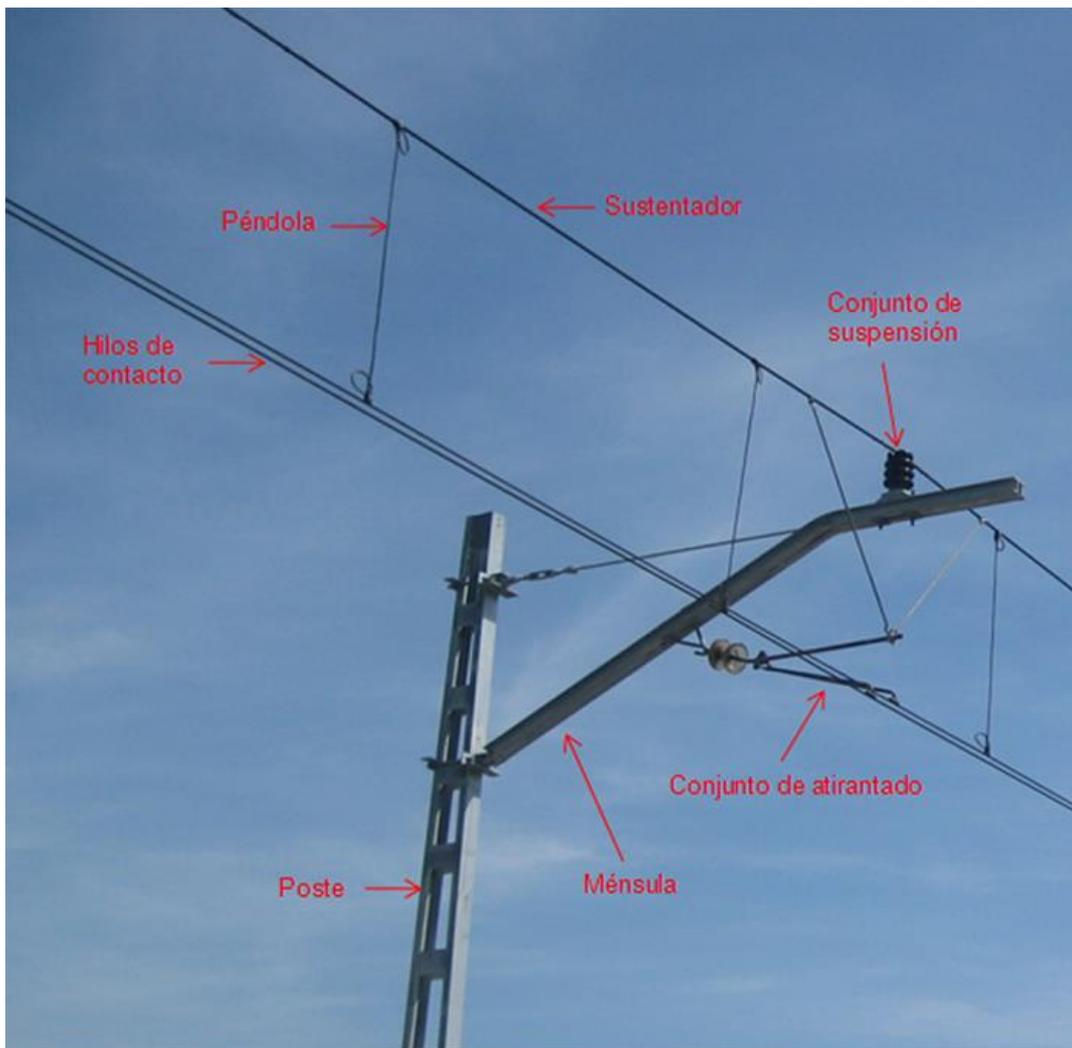


FIGURA 2 - ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE UNA CATENARIA [8].

-Sistema de tensionado:

Debido a que la catenaria se encuentra expuesta a cambios ambientales precisa de un sistema de tensionado para los cables, ya que, al variar la temperatura del ambiente, varía la longitud de los cables debido a la dilatación térmica de los materiales.

El sistema de tensionado es el encargado de garantizar una tensión constante en los hilos de contacto y sustentador con independencia de la temperatura.

El sistema comúnmente utilizado es un sistema mecánico que cuenta con una polea y unos contrapesos encargados de ejercer una tracción sobre el hilo de contacto, generando una tensión constante que elimina el problema de la dilatación del material.



FIGURA 3 - SISTEMA DE TENSIONADO DE UNA CATENARIA [8].

2.3 ESPECIFICACIONES GEOMETRICAS DE LA CATENARIA

-Altura del sistema:

La altura del sistema es la distancia vertical entre el eje del sustentador y el eje longitudinal de los hilos de contacto en el apoyo. Los valores de la altura nominal y las tolerancias del sistema se resumen en la tabla 1.

Valor nominal		Tolerancia
Trayectos y estaciones	1400 mm	±10 mm
Zonas de gálibo reducido (túneles, pasos superiores, etc)	853 mm 462 mm	

TABLA 1 - ALTURA DEL SISTEMA DE UNA CATENARIA [9].

-Altura del hilo de contacto

Es la distancia entre el plano medio de rodadura y el hilo de contacto. La altura del hilo de contacto tiene que mantenerse constante en el recorrido para garantizar un contacto óptimo con el pantógrafo.

Los valores de altura se pueden ver en la tabla 2 y dependen directamente de los siguientes factores:

- De la velocidad de explotación y longitud del vano, las cuales afectan a la oscilación dinámica de la catenaria.
- La probabilidad de formación de manguitos de hielo en la catenaria, lo que está relacionado con la altura sobre el nivel del mar.
- Si el vano queda limitado al tratarse de una catenaria en un túnel o si se encuentra a cielo abierto.

Valores		Tolerancias
Altura mínima	4600 mm	±10 mm
Altura máxima	6000 mm	
Altura normal	5300 mm	

TABLA 2 - ALTURA DEL HILO DE CONTACTO [9].

-Descentramiento del hilo de contacto:

El descentramiento es la distancia existente entre el eje del pantógrafo y el hilo de contacto. Se basa en que el hilo de contacto describa un trazado en zigzag para evitar que haya fricción siempre en el mismo punto del pantógrafo y así alargar más su vida útil. Así se asegura un desgaste uniforme en las pletinas del pantógrafo [10]. En la figura 4 se aprecia como el descentramiento es la variación de distancia entre el eje de la vía en verde y el hilo de contacto en rojo, viendo como el hilo de contacto tiene una trayectoria en zigzag.



FIGURA 4 - DESCENTRAMIENTO DEL HILO DE CONTACTO.

El descentramiento de los hilos de contacto cuando el trazado tiene una trayectoria recta es de ± 250 mm. Los valores del descentramiento cuando el trazado tiene una trayectoria curva se resumen en la tabla 3.

DESCENTRAMIENTO DE LOS HILOS DE CONTACTO EN CURVA		
Radio (m)	Descentramientos	
	d1(mm)	d2(mm)
1.900>R> 1.600	+200	+130
2.300>R> 1.900	+200	+100
2.700>R> 2.300	+200	+50
3.200>R> 2.700	+200	+0
5.000>R> 3.200	+200	-50
8.000>R> 5.000	+200	-100
12.000>R> 8.000	+200	-150
18.000>R> 12.000	+200	-180
∞ >R> 18.000	+200	-200

TABLA 3 - DESCENTRAMIENTO DEL HILO DE CONTACTO EN CURVA [11].

-Pendiente de los hilos de contacto:

Hace referencia a la diferencia de alturas entre el inicio y el final del vano dividido por la longitud del vano. Los valores de pendiente máxima y su variación se aprecian en la tabla 4.

VARIACIÓN DE ALTURA EN LOS HILOS DE CONTACTO	
Pendiente máxima	2 ‰
Variación de pendiente máxima	0.5 ‰

TABLA 4 - PENDIENTE DEL HILO DE CONTACTO [9].

-Flecha del hilo de contacto:

Es la diferencia de altura existente entre el inicio de la primera péndola y el centro del vano.

2.4 ESPECIFICACIONES MECÁNICAS DE LA CATENARIA

-Tensión mecánica de los cables conductores:

Es la tensión a la que se someten el cable sustentador, el falso sustentador y el hilo de contacto para evitar el aumento o disminución de la flecha debido a la dilatación térmica del material, ya que está sometido a la variación de temperatura ambiental.

-Vano:

El vano es la separación existente entre dos postes consecutivos que sustenten la misma línea de contacto, considerando el sentido longitudinal de la vía. El vano máximo en cualquier caso será de 60 metros, aunque puede ser menor en función de parámetros como la altura del sistema de catenaria, el radio de la curva, el tense de los conductores, la velocidad del viento y el gálibo del pantógrafo. El vano según el radio de la vía se resume en la tabla 5.

VANO MÁXIMO SEGÚN EL RADIO DE LA VÍA	
$R > 1500$	60 m
$1500 > R > 1260$	55 m
$1260 > R > 1042$	50 m
$1042 > R > 844$	45 m
$844 > R > 667$	40 m
$667 > R > 510$	35 m
$510 > R > 375$	30 m
$375 > R > 260$	25 m
$260 > R > 167$	20 m

TABLA 5 - VANO MÁXIMO SEGÚN EL RADIO DE LA VÍA [11].

-Cantón:

Es cada tramo independiente en el cual se divide la línea de contacto para evitar los efectos de la dilatación térmica y el aumento de longitud en el cable de contacto que esto supondría. Esta división también facilita el mantenimiento de la línea.

2.5 ESPECIFICACIONES ELECTRICAS DE LA CATENARIA

-Resistencia o impedancia del circuito:

Es la resistencia total de la catenaria y el circuito de retorno, compuesto por los carriles y los conductos de retorno.

-Corriente máxima:

Es el valor de la intensidad máxima que puede circular por la catenaria. Es determinada por la temperatura máxima admisible de los conductores y condiciones ambientales.

-Tensiones normalizadas:

Tensiones reguladas por la norma europea que se pueden emplear para la tracción eléctrica.

3. PANTÓGRAFO

El pantógrafo es el equipo encargado de captar la energía eléctrica procedente del hilo de contacto [8].

Es un mecanismo articulado que permite el desplazamiento vertical de la cabeza del pantógrafo para mantener un contacto óptimo con el hilo de contacto. Se encuentra situado en la parte superior del tren.

Las partes principales del pantógrafo que se aprecian en la figura 5 son:

- Bastidor base: Se trata de la parte fija del pantógrafo encargada de soportar el bastidor que se sitúa fijada al techo del vehículo
- Bastidor: Estructura articulada que permite movimiento en dirección vertical del cabezal colector con respecto al bastidor base del pantógrafo.
- Cabezal colector: Parte del pantógrafo sujeta por el bastidor que incluye las tiras de contacto (piezas sustituibles que se desgastan por el rozamiento con los hilos de contacto), los trocadores (extremos del cabezal colector que garantizan un paso suave al hilo de contacto) y puede incluir una suspensión.
- Sistema de elevación: Dispositivo que suministra una fuerza para poder elevar o bajar el pantógrafo.

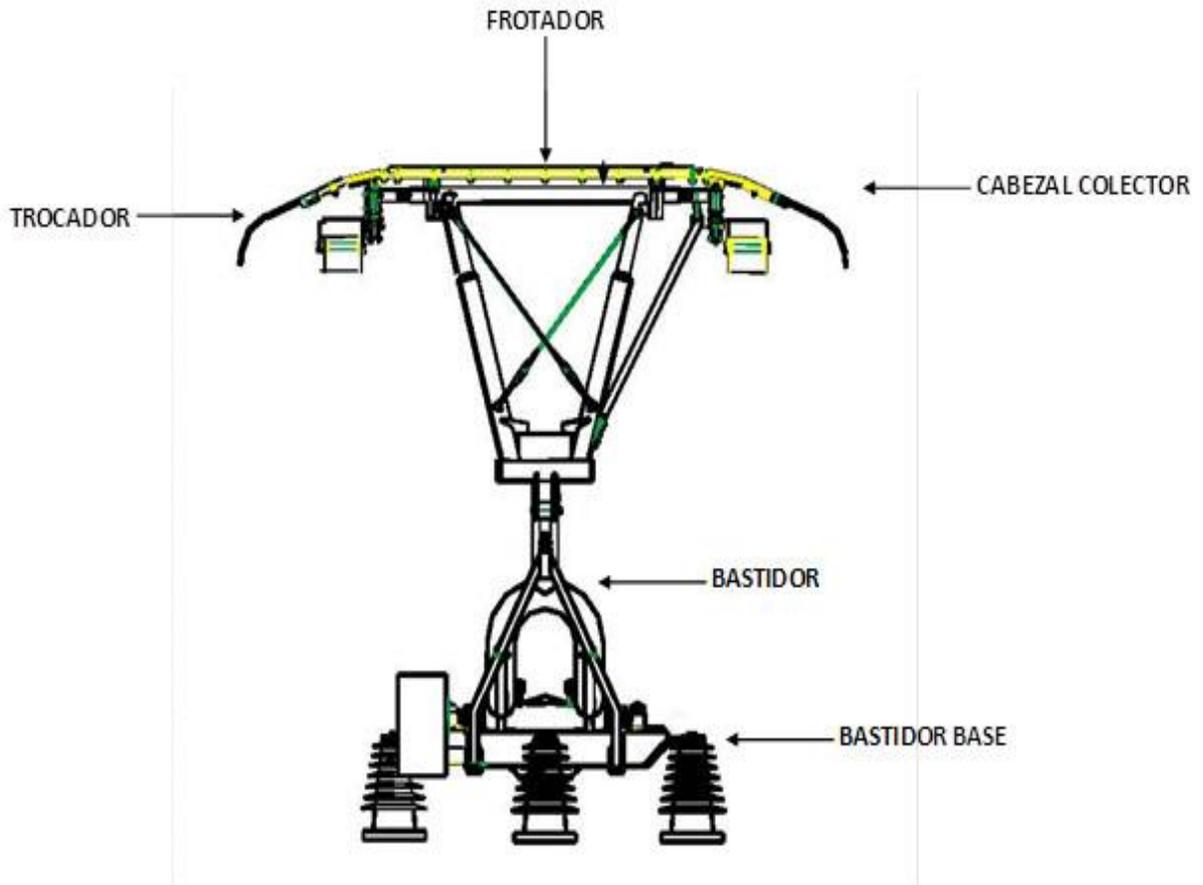


FIGURA 5 – PANTÓGRAFO [8].

4. DESCRIPCIÓN DE MODELOS

4.1 MODELO DE LA CATENARIA

La catenaria sobre la cual se realiza el estudio se diseña en elementos finitos siendo capaz de incorporar todos los elementos que son necesarios para poder estudiar el comportamiento dinámico de la catenaria, representada en la figura 6. Este método permite realizar simulaciones en un modelo de catenaria, representado en la figura 6, de la forma más realista posible, teniendo en cuenta elementos como el cable de contacto, el cable sustentador, cables Y, las péndolas y el brazo de registro. El diseño de catenaria también incorpora masas puntuales para representar elementos como grifas y otras uniones.

Además, se hace una suposición de que los postes y las ménsulas tienen una rigidez muy elevada y no intervienen de forma significativa en la interacción con

el pantógrafo. Es por esto por lo que no son tenidos en cuenta en la dinámica del sistema, ya que se sustituyen por unas condiciones de contorno apropiadas [12].

Se han empleado dos tipos de elementos, elementos tipo viga y elementos tipo barra. El elemento cable puede deformarse a tracción y flexión. El elemento barra por su parte sólo incorpora grados de libertad de desplazamientos y por tanto sólo transmite esfuerzos axiales. Para ambos tipos de elementos es necesario definir una longitud del elemento sin deformar.

La definición geométrica del cantón se realiza a partir de un fichero de configuración con la información estructurada en diferentes apartados, relacionados con los diferentes elementos que constituyen la catenaria.

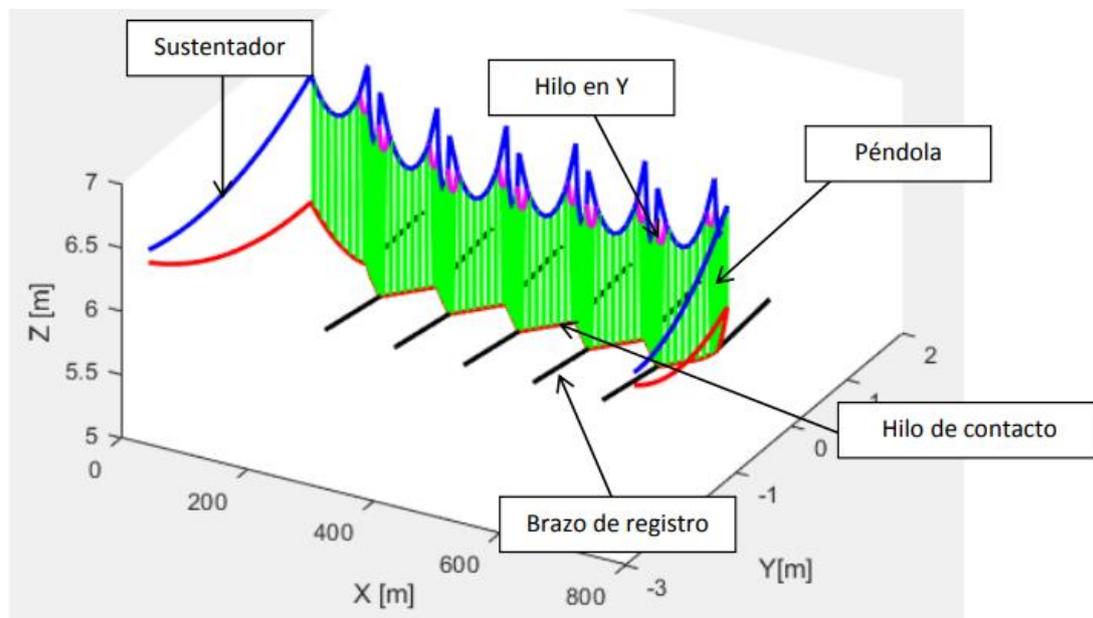


FIGURA 6 – MALLADO DE CATENARIA [13].

4.2 MODELO DEL PANTÓGRAFO

El modelo de pantógrafo que se ha empleado para obtener los resultados es un sistema de masas y resortes de tres etapas, como se puede observar en la figura 7. Este modelo de masas concentradas se modela mediante matrices de masa, amortiguamiento y rigidez consiguiendo simular el funcionamiento real de un pantógrafo [14].

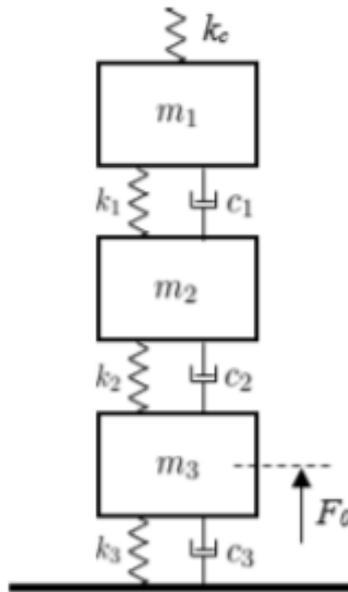


FIGURA 7 - MODELO DE PANTÓGRAFO [15].

La fuerza de elevación actúa sobre la masa inferior, simulando la fuerza ejercida por el mecanismo de elevación.

4.3 MODELO DE INTERACCIÓN

La interacción se simula mediante el método de penalti. Este método introduce un elemento elástico de alta rigidez que conecta la cabeza del pantógrafo con el cable de contacto.

En un instante t , la interacción del pantógrafo con la catenaria corresponde a un elemento finito del hilo de contacto. Para modelar el contacto se define un elemento que relaciona los grados de libertad asociados a la catenaria con la posición vertical del pantógrafo. Este modelo de interacción queda representado en la figura 8.

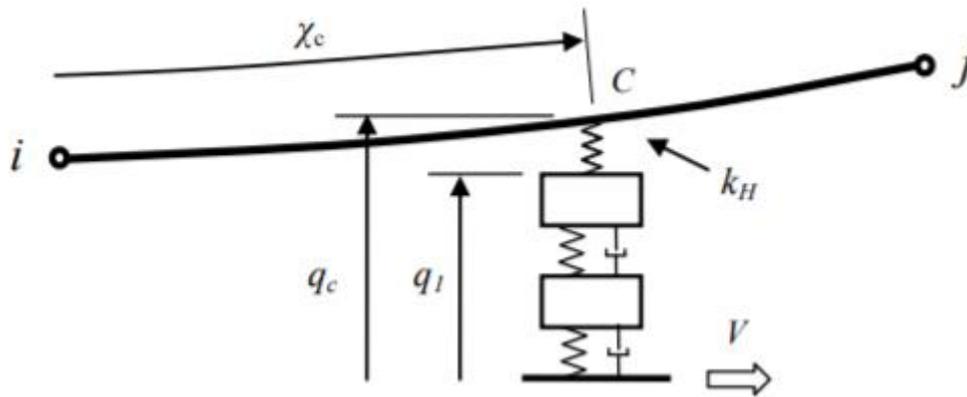


FIGURA 8 - MODELO DE INTERACCIÓN [16].

4.4 MODELO DE DESGASTE

4.4.1 INTRODUCCIÓN AL MODELO DE DESGASTE

El deslizamiento entre los frotadores del pantógrafo y el hilo de contacto de la catenaria provoca fenómenos electromecánicos que afectan al rendimiento de estos. Estos fenómenos electromecánicos provocan un desgaste en los frotadores y el hilo de contacto lo que supone un coste de mantenimiento necesario para el correcto funcionamiento de la línea.

El coste de mantenimiento de una línea ferroviaria es muy elevado, además se tiene que paralizar el servicio para poder realizar el mantenimiento del cable de contacto, por lo que es muy interesante estudiar para unas condiciones reales cuando es el mejor momento para realizar el mantenimiento necesario de la línea y poder optimizar al máximo el buen funcionamiento de la línea ferroviaria.

Para poder estudiar estas situaciones se desarrolló un modelo de desgaste capaz de estimar una tasa de desgaste en unas condiciones muy similares a las reales para poder reducir los costes de mantenimiento de la línea ferroviaria.

El modelo de desgaste que se utiliza en este proyecto ha sido desarrollado por el Departamento de Ingeniería Mecánica de Milán, las pruebas experimentales realizadas y los resultados obtenidos se explican al detalle en [17].

4.4.2 PRUEBAS EXPERIMENTALES

El equipo necesario para realizar los ensayos correspondientes para determinar el modelo de desgaste se rige por una serie de parámetros [17]:

- Velocidad de deslizamiento entre el frotador y el cable de hasta 220 km/h.
- Corriente eléctrica que fluye entre la tira y el cable de hasta 1400 A en corriente continua, 500 A en corriente alterna 16 ⅔ Hz y 350 A en corriente alterna 50 Hz. Reproduciendo así el suministro europeo de energía ferroviaria.
- Precarga estática vertical entre la tira y el cable de hasta 120 N.

El elemento principal del banco de pruebas es una rueda de fibra de vidrio representada en la figura 9, de 2.2 metros de radio que gira alrededor de un eje vertical. Tiene un hilo de contacto a lo largo de todo su perímetro sujeto gracias a 36 soportes flexibles.

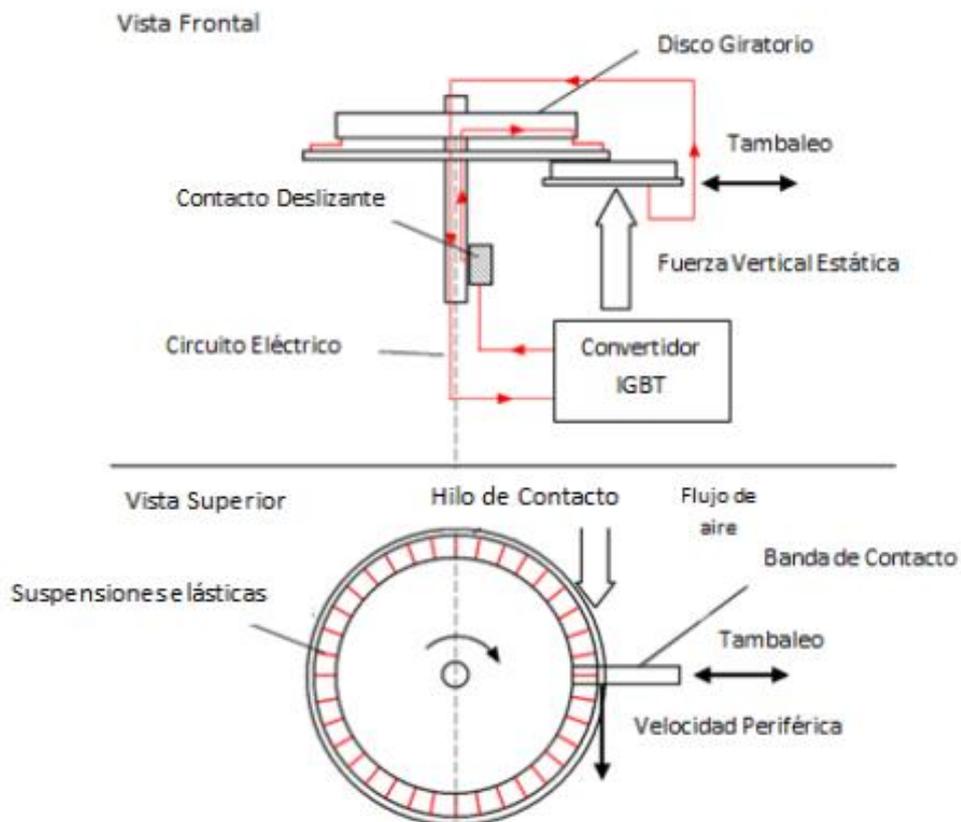


FIGURA 9 - RUEDA DE FIBRA DE VIDRIO DEL BANCO DE PRUEBAS [17].

La tira colectora está colocada sobre dos suspensiones conectadas a una base impulsada con movimiento controlado por un motor de corriente alterna sin escobillas en la dirección radial de la rueda, con el fin de reproducir el movimiento relativo debido al escalonamiento del hilo de contacto. Así se reproduce un movimiento en zigzag.

El banco de ensayos cuenta con un disipador de calor el cual transmite un flujo de aire proporcional a la velocidad de deslizamiento. Este disipador de calor tiene un impacto importante sobre el rendimiento del material de la tira.

La fuerza de contacto entre el colector y el hilo de contacto se genera mediante un actuador hidráulico montado en la plataforma móvil.

4.4.3 RESULTADOS DEL LABORATORIO

Las pruebas de desgaste estudian la interacción entre la tira y el hilo para distintos parámetros de funcionamiento. Estos parámetros son la velocidad de deslizamiento entre el hilo de contacto de la rueda giratoria y el frotador, corriente eléctrica del sistema y precarga estática. Se han realizado diferentes pruebas con diferentes parámetros para obtener unos resultados más precisos.

Nº	Velocidad	Precarga Estática	Corriente Eléctrica (c.c)
1	160 km/h	60 N	300 A
2			750 A
3		90 N	300 A
4			750 A
5	200 km/h	90 N+ dynamics	1000 A
6			
7			
8	160 km/h	90 N	
9			300 A
10			500 A
11			750 A
12			1000 A
13			300 A
14			0 A
15			100 A
16	200 A		

TABLA 6 - PARÁMETROS UTILIZADOS EN LAS PRUEBAS DE DESGASTE [17].

Tras realizar los ensayos con los distintos parámetros que se observan en la tabla 6 se obtienen resultados que permiten obtener la tasa de desgaste, que se define como la relación entre el volumen desgastado (mm^3) por cada kilómetro recorrido en la fórmula (1).

$$NWR = \frac{Vol}{s} \left(\frac{\text{mm}^3}{\text{km}} \right) \quad (1)$$

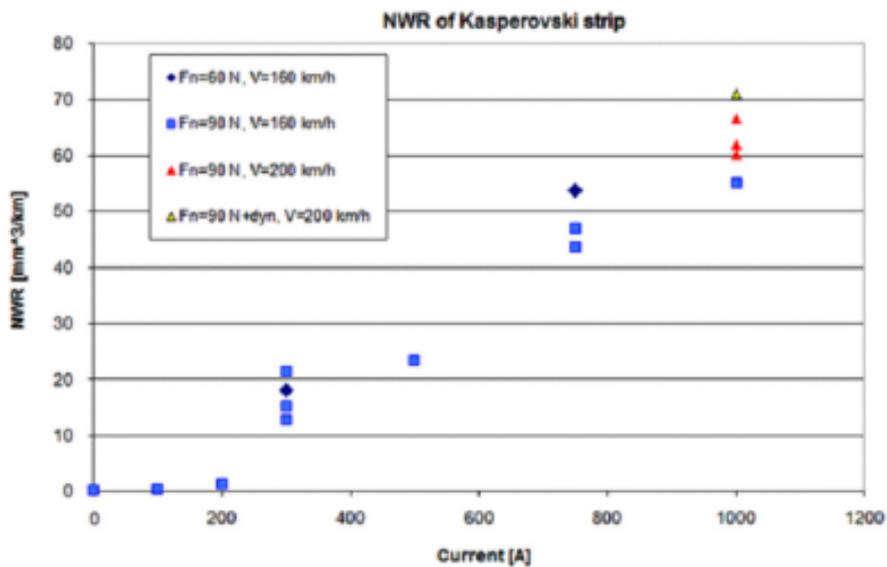


FIGURA 10 - RESULTADOS DE TASA DE DESGASTE OBTENIDOS EN LOS ENSAYOS [17].

En la figura 10 se puede apreciar como a medida que la corriente eléctrica aumenta también aumenta la tasa de desgaste. Al mismo tiempo se aprecia que al aumentar la fuerza de contacto o la velocidad la tasa de desgaste aumenta ligeramente con respecto a la variación de la corriente eléctrica.

Por lo tanto, el desgaste del hilo de contacto es causado principalmente por tres contribuciones:

- Contribución mecánica causada por la fricción.
- Contribución eléctrica debida a la potencia disipada.
- Contribución por arco eléctrico generados en los puntos de pérdida de contacto.

Estas contribuciones no actúan de forma independiente, sino que están relacionadas y actúan de forma simultánea. La contribución mecánica depende de la corriente eléctrica y la variación de la fuerza de contacto influye en la

contribución eléctrica. Los arcos eléctricos se producen con la pérdida de contacto por lo que también están relacionados con la fuerza de contacto. Estas tres contribuciones dan paso a la ecuación (2) del modelo [17]:

$$NWR = k_1 \left(\frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{I_c}{I_0} \right) \right)^{-\alpha} \cdot \left(\frac{F_m}{F_0} \right)^\beta \cdot \frac{F_m}{H} + k_2 \cdot \frac{R_c(F_m) \cdot I_c^2}{H \cdot V} \cdot (1 - u) \quad (2)$$

$$+ k_3 \cdot u \cdot \frac{V_a \cdot I_c}{V \cdot H_m \cdot \rho}$$

La expresión de la resistencia al contacto eléctrico en función a la fuerza de contacto se representa en la fórmula (3):

$$R_c(F_m) = 0.015 + 0.18 \cdot e^{-\frac{F_m - 4}{7}} \quad (3)$$

Todas las variables que forman parte de la ecuación (2) se recogen en la tabla:

Símbolo	Significado	Valor
F _m	Valor medio de la fuerza de contacto [N]	22.4
k ₁	Coeficiente de contribución mecánica en el desgaste	10.3
k ₂	Coeficiente de contribución eléctrica en el desgaste	0.4
k ₃	Coeficiente de contribución debida a los arcos eléctricos para el desgaste	4.5
α	Coeficiente de dependencia de la contribución mecánica de la corriente eléctrica	1.8
β	Coeficiente de dependencia no lineal de la contribución mecánica al valor medio de la fuerza de contacto	500
I ₀	Valor de referencia de la corriente eléctrica [A]	-
I _c	Corriente eléctrica nominal durante los ensayos [A]	90
F ₀	Valore de referencia de la fuerza de contacto [N]	700
H	Dureza del material [N/mm ²]	-
R _c	Resistencia de contacto eléctrico entre la tira y el hilo [Ω]	-
V	Velocidad de deslizamiento en los ensayos [m/s]	
V ₀	Valor de referencia de la velocidad de deslizamiento [m/s]	44.4
u	Fracción decimal del valor de referencia de la pérdida de contacto	-
V _a	Voltaje del arco eléctrico [V]	50
H _m	Calor latente de fusión del cobre [kJ/kg]	205
ρ	Densidad del cobre [kg/m ³]	8940

TABLA 7 - PARÁMETROS DEL MODELO DE DESGASTE [17].

En las siguientes gráficas se representan las variaciones del modelo de desgaste en función a distintos parámetros.

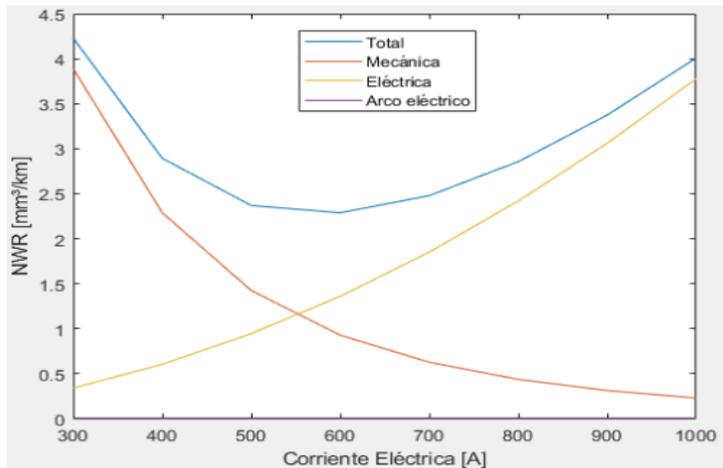


FIGURA 11 - RESULTADOS DE TASA DE DESGASTE Y SU CONTRIBUCIÓN MECÁNICA, ELÉCTRICA Y POR ARCO ELÉCTRICO [13].

En la figura 11 se observa un ejemplo de cómo varía la tasa de desgaste en función del aumento de la corriente eléctrica, para un valor de velocidad fijo de 200 km/h y una fuerza de contacto de 70 N.

Se aprecia como la contribución al desgaste por arco eléctrico es despreciable frente a las demás contribuciones, debido a un porcentaje de pérdida de contacto muy bajo. En la norma EN50317 se marca un valor máximo de pérdida por arco eléctrico en las líneas de alta velocidad del 0.2%.

En la gráfica se ve claramente como al aumentar la corriente eléctrica la tasa de desgaste debido a la contribución mecánica disminuye al mismo tiempo que la contribución eléctrica aumenta cruzándose en un punto entorno a los 540 A, siendo este el punto más bajo de la tasa de desgaste.

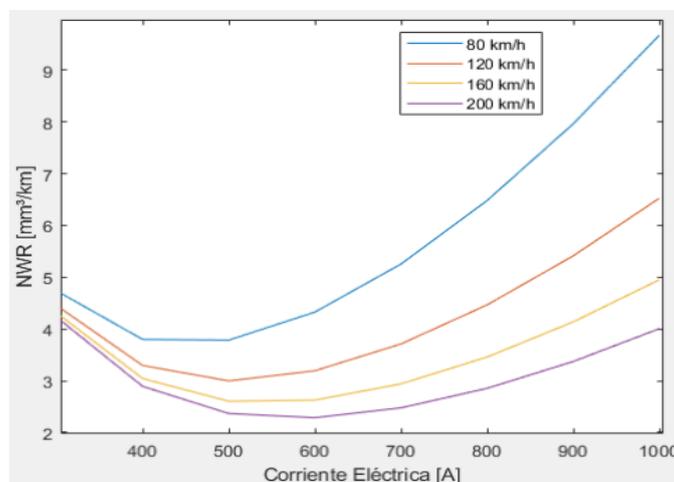


FIGURA 12 - RESULTADOS DE TASA DE DESGASTE PARA DISTINTAS VELOCIDADES [13].

En la figura 12 se observa un ejemplo de cómo varía la tasa de desgaste en función del aumento de la corriente eléctrica y de la velocidad del pantógrafo, para un valor de fuerza de contacto de 70N fijo y un porcentaje de pérdida por arco eléctrico del 0.05%.

Se puede apreciar que en altos valores de corriente eléctrica se produce una menor tasa de desgaste para mayores velocidades. Esto es debido a que una mayor velocidad de deslizamiento produce un mayor flujo de aire que reduce la temperatura en la zona de contacto reduciendo así los valores de potencia disipada.

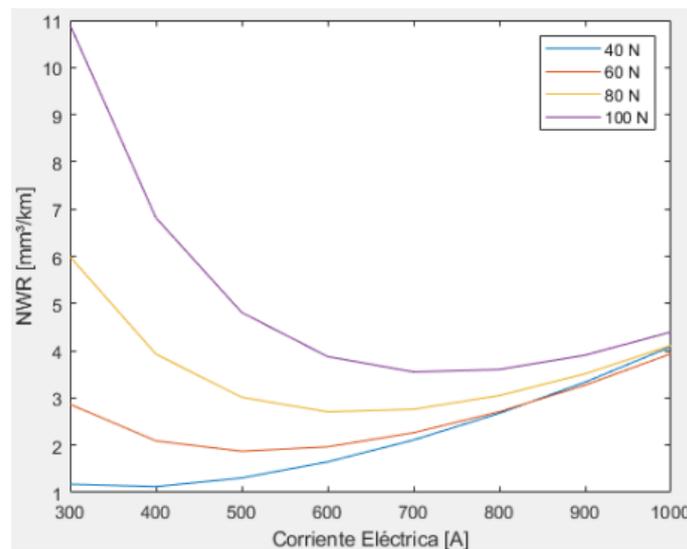


FIGURA 13 - RESULTADOS DE TASA DE DESGASTE PARA DISTINTAS FUERZAS DE CONTACTO [13].

En la figura 13 se observa un ejemplo de cómo varía la tasa de desgaste en función del aumento de la corriente eléctrica para diferentes valores de la fuerza de contacto, manteniendo una velocidad de deslizamiento constante de 200 km/h y un porcentaje de pérdida por arco eléctrico del 0.05%.

Se observa claramente como la fuerza de contacto tiene mucha importancia sobre la tasa de desgaste. Especialmente a bajos valores de corriente eléctrica, a mayor fuerza de contacto se obtiene una mayor tasa de desgaste. Esto es debido a los efectos de la disipación de energía dadas por la fricción. A mayores valores de corriente eléctrica el valor de la tasa de desgaste disminuye al aumentar la fuerza de contacto debido a la contribución del efecto Joule.

5. ALGORITMO Y PACDIN

5.1 INTRODUCCIÓN AL PROGRAMA

El software PACDIN es un código de Matlab desarrollado por miembros del Instituto de ingeniería Mecánica y Biomecánica de la UPV. Este software es una herramienta capaz de simular el desgaste del hilo de contacto de una catenaria.

Para simular este desgaste el software modela una catenaria y pantógrafo en elementos finitos y realiza interacciones entre ellos.

Antes de empezar a simular es necesario entender cómo funciona el algoritmo y las funciones de cada bloque del programa. En figura 14 se representan las partes principales del software y el orden en las que hay que empezar a trabajar.

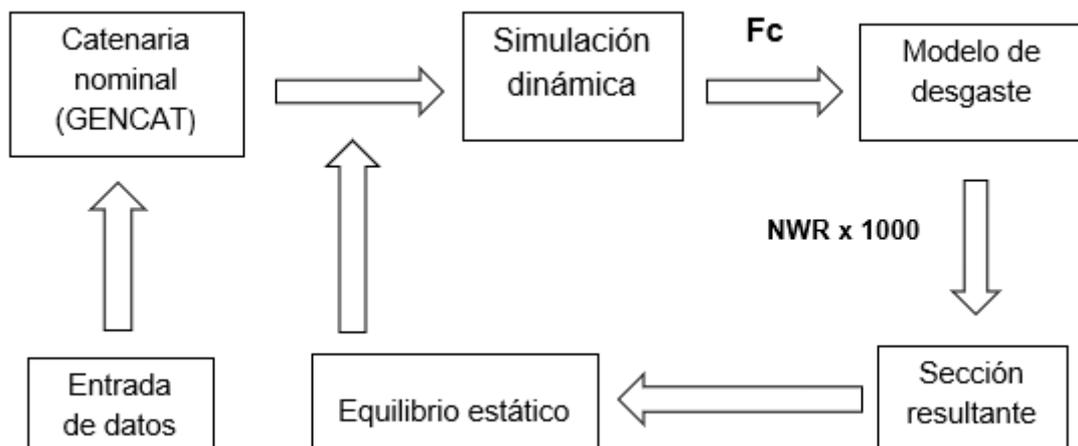


FIGURA 14 - ALGORITMO DEL SOFTWARE PACDIN.

5.2 ENTARDA DE DATOS

Primero de todo, el programa necesita una entrada de datos para generar el modelo de catenaria de elementos finitos y las condiciones de funcionamiento deseadas. Estos datos se introducen en Matlab mediante ficheros de texto que se pueden modificar para generar distintos tipos de modelos de catenarias y condiciones de funcionamiento y así poder realizar simulaciones sobre catenarias con gran similitud a las reales.

En un primer fichero llamado Trazado.txt se describen los parámetros del trazado de la vía sobre la cual se quiere generar un modelo de catenaria.

```

--- FICHERO DE DEFINICIÓN DEL TRAZADO DE LA VÍA -----
-----
-Ancho de la vía
435
- Número de tramos que definen el trazado:

- Definición de cada tramo:
n° Tramo // PKini [km] // PKfin [km] // Curv Ini [m-1]
      1      -10      1300      0
// Curv Fin [m-1] // Canto Ini [mm] // Canto Fin [mm]
      0      0      0
|// Elev ini [m] // Elev Fin [m]
      0      0

```

FIGURA 15 - PARÁMETROS DEL TRAZADO DE LA VÍA.

En este fichero, como se puede ver en la figura 15, se elige el ancho de la vía, el número de tramos que definen el trazado y se define cada tramo. En cada tramo se definen valores como el punto kilométrico inicial y final del tramo, si el tramo tiene una trayectoria curva, el canto inicial y final y la elevación inicial y final.

En un segundo fichero se describe los parámetros necesarios para generar la catenaria. Este fichero se puede modificar para generar la estructura de la catenaria que se quiere modelar. En este proyecto se genera una catenaria siguiendo la norma EN50318.

Los datos más relevantes para la definición del cantón en este fichero son:

- Número total de cantones. Solo se realizan simulaciones sobre 1 cantón.
- Punto kilométrico de inicio del cantón. Sirve para situar la catenaria en la vía.
- Número total de postes y distancia del poste a la vía. Se elige el número de postes que forman el modelo de catenaria. Este modelo de catenaria cuenta con 23 postes separados 2.5 metros de la vía.
- Altura de los soportes del sustentador. Depende de la posición del poste y varía su valore entre 6.2 y 7.6 metros como se puede ver en la figura 16.

-Altura de los soportes del sustentador:

1	6.2	13	7.15
2	7.6	14	7.234
3	7.6	15	7.11
4	6.85	16	7.194
5	6.85	17	7.17
6	7.141	18	7.069
7	7.156	19	7.1
8	7.222	20	7.1
9	7.159	21	7.6
10	7.103	22	7.6
11	7.121	23	6.2
12	7.184		

FIGURA 16 - ALTURA DE LOS SOPORTES DEL SUSTENTADOR.

- Distancia entre postes. Esta distancia entre postes marca la longitud de los vanos. Para la generación del modelo de catenaria se emplean las distancias de la figura 17.

%-Distancia entre postes (longitud de vanos):

1	47.28	12	61.98
2	46.98	13	62.98
3	46.03	14	62.98
4	47.96	15	62.98
5	49.82	16	62.98
6	54.99	17	57.98
7	62.98	18	48.78
8	62.98	19	46.98
9	62.98	20	46.03
10	62.98	21	47.96
11	62.98	22	48.32

FIGURA 17 - DISTANCIA ENTRE POSTES.

- Tipos de ménsula. Las ménsulas pueden ser de tipo 1 y tipo 2, a excepción de que en el primer y último poste no hay ménsula (tipo 0) y en el segundo y penúltimo poste es de tipo 3.
- Lado de la vía en el que se sitúan los postes. Puede ser en el lado izquierdo (1) o en el lado derecho (-1).

- Longitud y altura de los brazos de registro. En el primer y último poste no existe brazo de registro. Los valores se pueden ver en la figura 18.

%-Brazos de registro (Longitud/Altura(m) :

1	0	0	13	1.15	1.49e-01
2	1.35	1.49e-01	14	1.25	1.49e-01
3	1.35	1.49e-01	15	1.15	1.49e-01
4	1.15	1.49e-01	16	1.25	1.49e-01
5	1.15	1.49e-01	17	1.15	1.49e-01
6	1.15	1.49e-01	18	1.15	1.49e-01
7	1.15	1.49e-01	19	1.15	1.49e-01
8	1.25	1.49e-01	20	1.15	1.49e-01
9	1.15	1.49e-01	21	1.35	1.49e-01
10	1.25	1.49e-01	22	1.35	1.49e-01
11	1.15	1.49e-01	23	0	0
12	1.25	1.49e-01			

FIGURA 18 – PARÁMETROS DEL BRAZO DE REGISTRO.

- Descentramiento del hilo de contacto y del cable sustentador. Toma valores positivos y negativos en el centro del tramo, representados en la figura 19, para conseguir que el hilo de contacto siga una trayectoria en zigzag.

%-Descentramiento (Sust/Cont) :

1	4.2	3.7	13	0.3	0.3
2	-0.5	-0.5	14	-0.25	-0.25
3	0.1	0.1	15	0.3	0.3
4	-0.3	-0.3	16	-0.25	-0.25
5	0.3	0.3	17	0.3	0.3
6	-0.3	-0.3	18	-0.3	-0.3
7	0.3	0.3	19	0.3	0.3
8	-0.25	-0.25	20	-0.3	-0.3
9	0.3	0.3	21	-0.15	-0.15
10	-0.25	-0.25	22	-0.75	-0.75
11	0.3	0.3	23	4.2	3.7
12	-0.25	-0.25			

FIGURA 19 - VALORES DEL DESCENTRAMIENTO DEL HILO DE CONTACTO.

- Altura del hilo de contacto en los brazos de registro. Es más elevada al inicio y final del cantón hasta llegar a 6.2 metros debido al solape de cantones y se mantiene constante en la zona media del cantón en 5.3 metros. Estos valores se recogen en la figura 20.

`%-Altura del cable de contacto en los brazos de registro:`

1	6.2	13	5.3
2	5.8	14	5.3
3	5.45	15	5.3
4	5.3	16	5.3
5	5.3	17	5.3
6	5.3	18	5.3
7	5.3	19	5.3
8	5.3	20	5.3
9	5.3	21	5.45
10	5.3	22	5.8
11	5.3	23	6.2
12	5.3		

FIGURA 20 - ALTURA DEL CABLE DE CONTACTO EN LOS BRAZOS DE REGISTRO.

- Parámetros de las poleas y grifas de la catenaria. Estos parámetros se aprecian en la figura 21.

```

%----- POLEAS -----%
%-----
%-Simulación de la masa de compensación en CS:
1 1
%-Simulación de la masa de compensación en CC:
1 1
%-Rigidez en la dirección del cable:
1e-15 1e-15
%-Rigidez en la dirección perpendicular al cable:
1e15 1e15
%-Radio de la polea en el contrapeso:
6e-1 1
%-Radio de la polea en el cable:
2.000000e-01 2.000000e-01
%-----
%----- GRIFAS -----%
%-----
%-Masa de las grifas de conexión de péndolas con el CS:
0.155
%-Masa de las grifas de conexión de péndolas con el CC:
0.14
%-Masa de las grifas de conexión de péndolas con el CY:
0.101
%-Masa de las grifas de conexión del cable Y con el CS:
0.38
%-Masa de las grifas de conexión del BR con el CC:
0.46

```

FIGURA 21 - PARÁMETROS DE LAS POLEAS Y GRIFAS.

- Tensiones en los cables y distancias entre cable z y la péndola. Para este modelo de catenaria no se tiene cable Z ni cable de anclaje en el poste central. Las tensiones quedan representadas en la figura 22.

```

%----- TENSION EN CABLES
%-----
%-Fuerza de pretensado del CS:
21000
%-Fuerza de pretensado del CC:
27000
%-Fuerza de pretensado del CY:
3500
%-Fuerza de pretensado del CZ:
1
%-Fuerza de pretensado del CPF:
16000

```

FIGURA 22 - TENSIONES EN LOS CABLES.

- Datos de los materiales que forman los distintos elementos de la catenaria. Se incluye información sobre el módulo de Young, la sección transversal, la densidad y el momento de inercia representados en la figura 23.

```

%-----
%----- MATERIALES -----
%-----
%-Número de materiales:
6
%-Material 1 (Sustentador):
  1.13e+11  1.17e-04  9.059e+03  1.08e-09
%-Material 2 (Cable de contacto):
  1.20e+11  1.20e-04  8.89e+03  1.14e-09
%-Material 3 (Péndolas):
  1.03e+11  0.10e-04  8.90e+03  1.00e+00
%-Material 4 (Cable en Y):
  1.13e+11  0.35e-04  8.85e+03  0.00e+00
%-Material 5 (Cable Z):
  1.10e+11  5.0e-05  8.92e+03  1.00e+00
%-Material 6 (Brazos de registro):
  0.70e+11  9.23e-04  2.70e+03  0.00e+00
% 0.70e+11  2.75e-04  2.83e+03  0
-

```

FIGURA 23 - PARÁMETROS DE LOS MATERIALES DE LOS ELEMENTOS DE LA CATENARIA.

- Parámetros del mallado de la catenaria, representados en la figura 24.

```

%----- MALLA -----%
%-----
%-Número de elementos entre péndolas en el CS:
10
%-Número de elementos entre péndolas del CC:
10
%-Número de elementos del CS en el cable en Y:
10
%-Número de elementos del CC en el cable en Y:
10
%-Número de elementos en cada tramo del cable en Y:
1
%-Número de elementos del tramo largo de CS en el cable en Z:
7
%-Número de elementos del tramo largo de CC en el cable en Z:
8
%-Número de elementos del vano inicial y final del CS:
20
%-Número de elementos del vano inicial y final del CC:
20
%-Número de elementos del cable de anclaje en el poste central:
20

```

FIGURA 24 - PARÁMETROS DEL MALLADO DE LA CATENARIA.

- Indicador de cable Y en los postes. En los tres primeros y los tres últimos postes no hay cable en Y por lo que el valor es 0. En los demás postes el valor es 1 indicando que existe el cable en Y.
- Rigidez y amortiguamiento en los soportes del sustentador. En los soportes del sustentador existe un empotramiento por lo que no hay valores de rigidez ni amortiguación.
- Número de péndolas por vano y su distancia entre ellas. En la parte central de la catenaria donde se realiza el estudio hay 7 péndolas por vano separadas 8.83 metros entre las 6 primeras y 5 metros la última péndola. Es importante que existan distancias entre todas las péndolas existentes. En la figura 25 se pueden ver el número total de péndolas y sus respectivas distancias.

% - Número de péndolas		% - Distancia entre péndolas:	
% por vano:			
1	0	1	0
2	5	2	8.8 8.79 8.8 8.79 8.8 3
3	5	3	3 9.76 9.76 9.75 10.03 3.73
4	5	4	4 9.99 9.99 9.99 9.99 4
5	6	5	4 8.36 8.37 8.36 8.37 8.36 4
6	6	6	4 9.2 9.2 9.19 9.2 9.2 5
7	7	7	5 8.83 8.83 8.83 8.83 8.83 8.83 5
8	7	8	5 8.83 8.83 8.83 8.83 8.83 8.83 5
9	7	9	5 8.83 8.83 8.83 8.83 8.83 8.83 5
10	7	10	5 8.83 8.83 8.83 8.83 8.83 8.83 5
11	7	11	5 8.83 8.83 8.83 8.83 8.83 8.83 5
12	7	12	5 8.66 8.67 8.66 8.66 8.67 8.66 5
13	7	13	5 8.83 8.83 8.83 8.83 8.83 8.83 5
14	7	14	5 8.83 8.83 8.83 8.83 8.83 8.83 5
15	7	15	5 8.83 8.83 8.83 8.83 8.83 8.83 5
16	7	16	5 8.83 8.83 8.83 8.83 8.83 8.83 5
17	6	17	5 9.8 9.79 9.8 9.79 9.8 4
18	6	18	4 8.16 8.15 8.16 8.15 8.16 4
19	5	19	4 9.75 9.74 9.75 9.74 4
20	5	20	4 9.76 9.76 9.75 9.76 3
21	5	21	3 8.99 8.99 9 8.99 8.99
22	0	22	0

FIGURA 25 - NÚMERO DE PÉNDOLAS POR VANO Y DISTANCIA ENTRE ELLAS.

- Altura del cable de contacto en las uniones con las péndolas. En la parte central de la catenaria la altura del cable de contacto es de 5.3 metros.

Los datos más relevantes para la definición de la simulación son:

- Formulación del tipo de elementos barra y viga.
- Número máximo de iteraciones. Para la solución del problema estático y de configuración inicial se determina un máximo de 20 iteraciones. Para la solución del problema de optimización se determinan 25 iteraciones.
- Tolerancias para verificar la convergencia representadas en la figura 26.

Tolerancias para verificar la convergencia

```
-----  
Tolerancia relativa incrementos  
4.9999999999999998e-07  
Tolerancia relativa residuo  
4.9999999999999998e-07  
Tolerancia relativa norma energética (Residuo*Incremento)  
5.0000000000000000e-15
```

FIGURA 26 - TOLERANCIAS PARA VERIFICAR LA CONVERGENCIA.

- Restricciones de diseño y tipo de optimización. Se determina un tipo de optimización puntual.
- El número de puntos del interior de un elemento donde se evalúa la altura será de 20 puntos.
- Parámetros del pantógrafo. Los diferentes parámetros del pantógrafo se resumen en la figura 27.

```
% Número de pantógrafos  
1  
% Nombre de los pantógrafos  
AC_Stitched  
% N° de gdl de los pantógrafos  
3  
% Rigidez de contacto pantógrafos-cable de contacto (método penalty)  
5.0000000000000000e+04  
% Punto kilométrico de inicio de simulación (m)  
100  
% Alturas de referencia objetivo  
5.3  
% Alturas de referencia iniciales  
5.2  
% Distancias de subida de los pantógrafos  
80  
% Punto kilométrico de inicio de rampa (m)  
100
```

FIGURA 27 - PARÁMETROS DEL PANTÓGRAFO.

- Parámetros de la simulación. En este apartado destaca la velocidad de simulación que puede variar para así elegir la velocidad del ferrocarril real en un tramo que se quiera estudiar. Todos estos parámetros se observan en la figura 28.

```

% Parámetros de la simulación
%
%-----
% Tipo de solver [0: No Lineal; 1: Lineal; 2: Lineal RT; 3: Lineal Exp.]
2
% Velocidad de la simulación (km/h)
3.0000000000000e+02
% Distancia de simulación (m)
7.5000000000000e+02
% Imponer valor medio de la fuerza de contacto
0
% Punto km de inicio de imposición de la Fmed
293
% Punto km de fin de imposición de la Fmed
922
% Reubicación de pantógrafos
1

```

FIGURA 28 - PARÁMETROS DE LA SIMULACIÓN.

- Parámetros de la solución, representados en la figura 29. El incremento del tiempo es un factor importante ya que determina el número de puntos a lo largo del hilo de contacto sobre los cual se realiza el estudio del desgaste.

```

% Selección del algoritmo de integración [1: HHT; 2: Newmark]
1
% Criterio para determinar péndolas a compresión [Long; Fuerza]
Fuerza
% Incremento de tiempo
1.000000e-03
% Tolerancia de integración
1.000000e-08
% Parámetro alpha (método HHT)
-5.000000e-02
% Parámetro gamma (Newmark)
5.000000e-01
% Parámetro beta (Newmark)
2.500000e-01

```

FIGURA 29 - PARÁMETROS DE LA SOLUCIÓN.

- Parámetros de amortiguamiento. Estos parámetros se resumen en la figura 30.

```

% Incorporación de amortiguamiento [0: Sin amortiguamiento; 1: Amortiguado]
1
% Eliminación de amortiguamiento en péndolas a compresión
0
% parametros beta y gamma de amortiguamiento
1.0000000000000000e-04
1.2500000000000000e-02
-

```

FIGURA 30 - PARÁMETROS DE AMORTIGUAMIENTO.

- Ficheros de animación e información gráfica y por pantalla. Se determina un nivel 2 de verbosidad, esto quiere decir que el programa genera texto y gráficas cuando obtenga los resultados.

También es importante conocer que existe una carpeta llamada “FuncionesM” que contiene ficheros que recogen funciones de Matlab.

- Destacan funciones necesarias para el cálculo dinámico y estático.
- Ensamblado y elemento barra y cable.
- Información sobre el modelo de desgaste como la intensidad que circula por el cable.

Y por último una carpeta que recoge la información referente al pantógrafo. En esta carpeta destacan datos como:

- Fuerza de precarga estática del pantógrafo. Esta es la fuerza de elevación que ejerce un mecanismo neumático situado en el pantógrafo sobre el hilo de contacto de forma estática. Este valor de fuerza afecta directamente a la fuerza de contacto que ejerce el pantógrafo sobre el hilo de contacto en una simulación dinámica. El valor de precarga estática es de 142.8 N.
- Grados de libertad.
- Masa del pantógrafo.
- Valores de su amortiguamiento rigidez y masas de sus partes.

5.3 GENCAT

El primer bloque del algoritmo genera archivos de catenaria a partir de los datos geométricos previamente introducidos. Este bloque tiene el nombre de GENCAT y genera una estimación de la posición de los nodos en la catenaria y resuelve el problema de cálculo de la configuración de equilibrio inicial para cumplir las restricciones.

Más en detalle, en este bloque se incluyen los directorios de las funciones de Matlab necesarias para calcular el equilibrio inicial, se lee el archivo de configuración de la simulación elegida previamente en la entrada de datos, los

datos de los parámetros de la catenaria y del trazado de la vía para poder generar la estructura deseada en elementos finitos.

Se genera un archivo con los datos de la malla para cada cantón y se comprueban los datos de entrada que definen el cantón.

Se calcula el equilibrio estático por el método Newton-Raphson resolviendo así el problema de configuración inicial. El método de Newton-Raphson es uno de los más utilizados para dar solución a ecuaciones algebraicas no lineales.

Si el valor inicial para la raíz es x_i , entonces se puede trazar una tangente desde el punto $[x_i, f(x_i)]$ de la curva, el punto donde esta tangente cruza al eje "x" representa una aproximación mejorada de la raíz $[18]$.

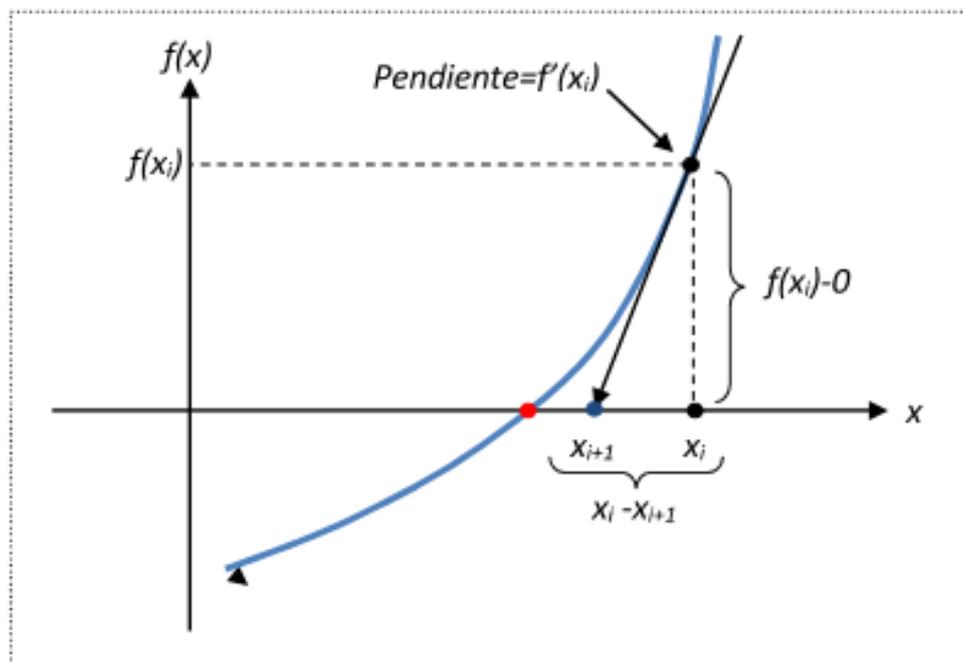


FIGURA 31 - MÉTODO NEWTON-RAPHSON [18].

El método de Newton-Raphson visto en la figura 31 se deduce a partir de esta interpretación geométrica y se tiene que la primera derivada en x es equivalente a la pendiente:

$$f'(x_i) = \frac{f(x_i)-0}{x_i-x_{i+1}} \quad (4)$$

$$x_{i+1} = x_i - \frac{f(x_i)}{f'(x_j)} \quad (5)$$

Mientras que el error aproximado porcentual se calcula con la fórmula (6):

$$E_a = \left| \frac{x_{i+1}-x_i}{x_{i+1}} \right| 100\% \quad (6)$$

Al finalizar este bloque se obtiene un modelo de configuración inicial de catenaria sobre el cual se realizan los siguientes apartados del programa. Este modelo que se representa en la figura 32 cuenta con los parámetros elegidos en la entrada de datos [17].

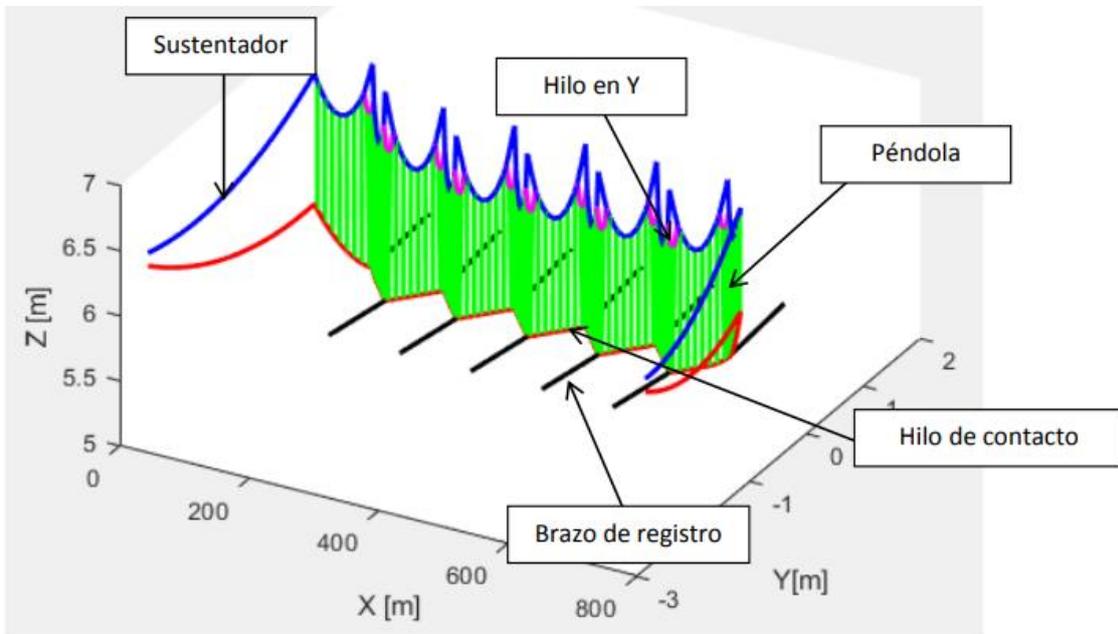


FIGURA 32 - CONFIGURACIÓN DEL MODELO DE CATENARIA INICIAL [13].

5.4 INTERACCIÓN PANTÓGRAFO CATENARIA (SIMULACIÓN DINÁMICA)

Una vez se ha completado el apartado GENCAT ya se ha generado un modelo de catenaria sobre el cual se puede realizar una simulación dinámica en la cual se estudia la interacción entre el pantógrafo y la catenaria.

Esta simulación se trata de una integración temporal de las ecuaciones del movimiento para simular la interacción pantógrafo-catenaria en un tramo de vía.

Durante esta simulación se obtiene la fuerza de contacto con respecto al tiempo en determinados puntos de la catenaria. Dependiendo de la velocidad de simulación, del incremento del tiempo y de la longitud total de la catenaria, el modelo de catenaria tendrá en cuenta más o menos puntos sobre los cuales se estudia esta interacción.

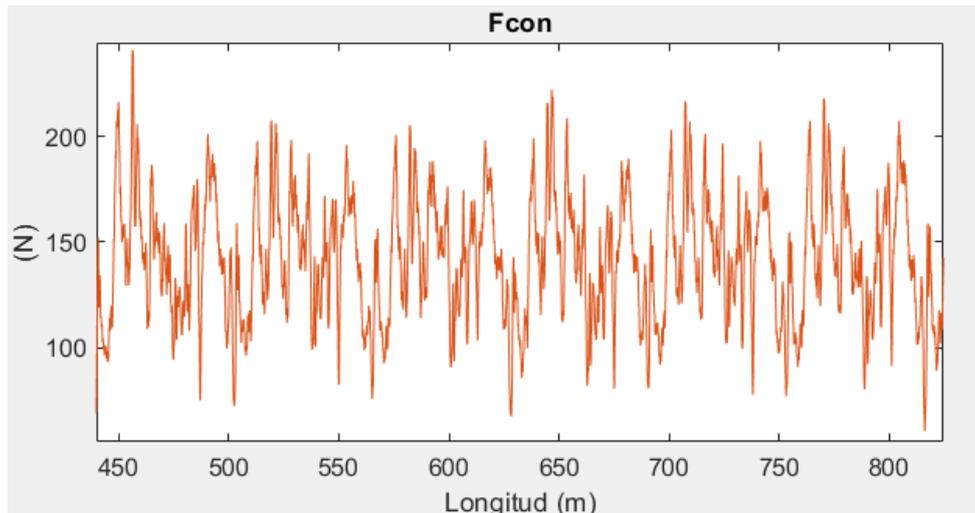


FIGURA 33 - FUERZA DE CONTACTO ENTRE EL PANTÓGRAFO Y EL HILO DE CONTACTO.

En la figura 33 se aprecia el resultado de la fuerza de contacto resultante de la interacción pantógrafo-catenaria. Se puede observar cómo los valores se encuentran cercanos al valor de la fuerza de precarga estática del pantógrafo, que su valor es de 142.8 N.

5.5 MODELO DE DESGASTE

En este bloque se genera un desgaste resultante de la interacción de la catenaria con el pantógrafo. Para realizar este bloque es necesario seleccionar unos parámetros de desgaste:

- Sección inicial del hilo de contacto y radio.
- Porcentaje máximo del área desgastada. El porcentaje máximo admisible para el área desgastada es del 20%, es decir cuando el desgaste del área del hilo de contacto es mayor al 20% se detiene el programa y finalizan las simulaciones sobre esa catenaria.
- Número de simulación inicial y final. Este parámetro permite detener el programa en un número determinado de simulación y luego volver a reanudar el programa en el mismo número de simulación sobre el cual se ha detenido anteriormente.
- Numero de pasadas con desgaste constante. Este parámetro es muy importante ya que se encarga de multiplicar el desgaste generado en una pasada para obtener resultados de una forma más rápida.

- Puntos kilométricos de la catenaria entre los que se calcula el desgaste. Se escoge una distancia intermedia sobre la cual se quiere calcular el desgaste para así evitar efectos del transitorio inicial y efectos de rebote de ondas en el tramo final del cantón.

En el inicio de este bloque se cargan los datos del pantógrafo, catenaria y péndolas obtenidos anteriormente. También se crea una variable que recoge los puntos kilométricos de los puntos de contacto donde se mide el área desgastada.

Teniendo en cuenta los pasos anteriores se calcula la tasa de desgaste (NWR) para cada uno de los puntos de estudio. Esta tasa mide la superficie desgastada en mm^2 del hilo de contacto. Hay que tener en cuenta que en cada pasada del pantógrafo sobre el hilo de contacto se genera una NWR distinta.

Es muy importante saber que cada vez que se realiza una pasada se multiplica el valor obtenido del NWR por 1000 ya que la variación de la tasa de desgaste entre 1000 pasadas seguidas no presenta casi variación numérica y esto supone un gran ahorro de tiempo de cálculo sin añadir errores o variaciones respecto a hacerlo sin multiplicar esta tasa. Esto supone que, si la simulación del programa determina que la catenaria llega al 20% de desgaste en 300 simulaciones, realmente el pantógrafo ha pasado 300000 veces por el hilo de contacto.

5.6 SECCIÓN RESULTANTE Y EQUILIBRIO ESTÁTICO

El hilo de contacto sufre un desgaste que produce que su sección se vea reducida. Siendo R la sección del hilo de contacto y con un desgaste inicial A_0 , se puede obtener la sección desgastada mediante las ecuaciones (7) y (8) [19].

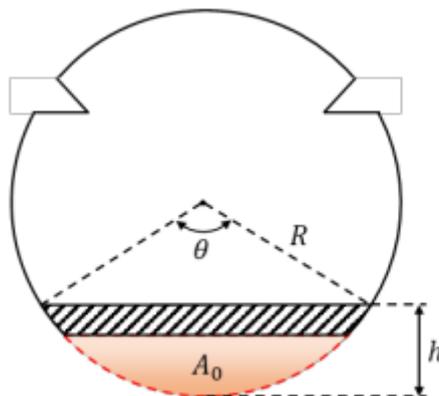


FIGURA 34 - SECCIÓN RESULTANTE [19].

$$h = R \left(1 - \cos \frac{\theta}{2} \right) \quad (7)$$

$$\frac{R^2}{2} (\theta - \sin \theta) - A = 0 \quad (8)$$

Aunque la pérdida de sección tras cada simulación es muy reducida, se tiene que realizar un equilibrio estático en la catenaria tras cada simulación. Esto es debido a que el hilo de contacto ha perdido sección tras cada pasada y por lo tanto ha perdido masa.

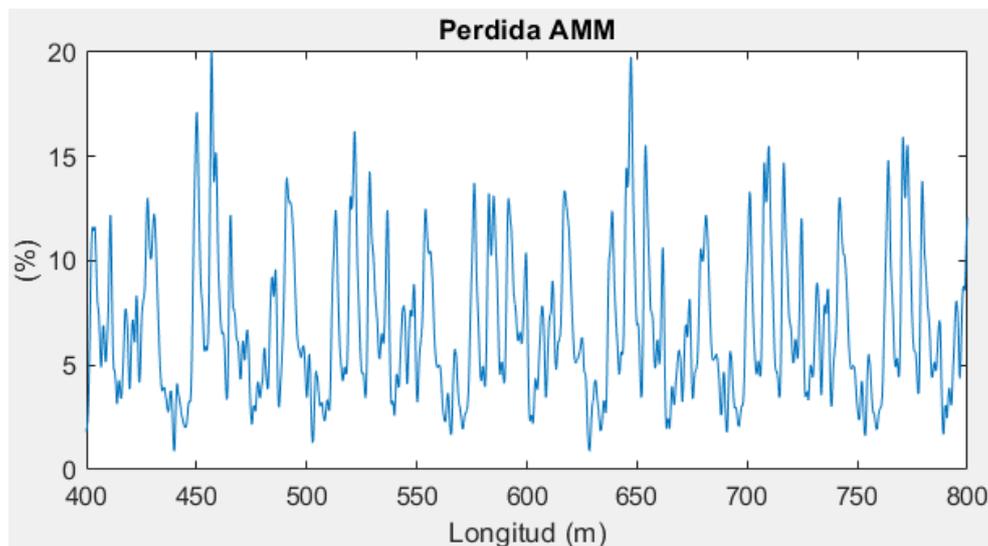


FIGURA 35 - PERDIDA DE SECCIÓN DEL HILO DE CONTACTO.

En la figura 35 se representa el porcentaje de sección desgastada a lo largo de 400 metros de hilo de contacto, con una velocidad del pantógrafo de 300 km/h y una fuerza estática de 142.8 N. Se aprecia como tras 258 simulaciones (258000 pasadas del pantógrafo sobre el hilo de contacto) el hilo de contacto presenta diferentes desgastes para cada punto de estudio.

La disminución de esta masa produce que las péndolas eleven ligeramente el hilo de contacto en la zona desgastada, obteniendo así un comportamiento dinámico distinto tras cada simulación. El hilo de contacto estará más alejado del pantógrafo variando así la fuerza de contacto que influye directamente con la tasa de desgaste.

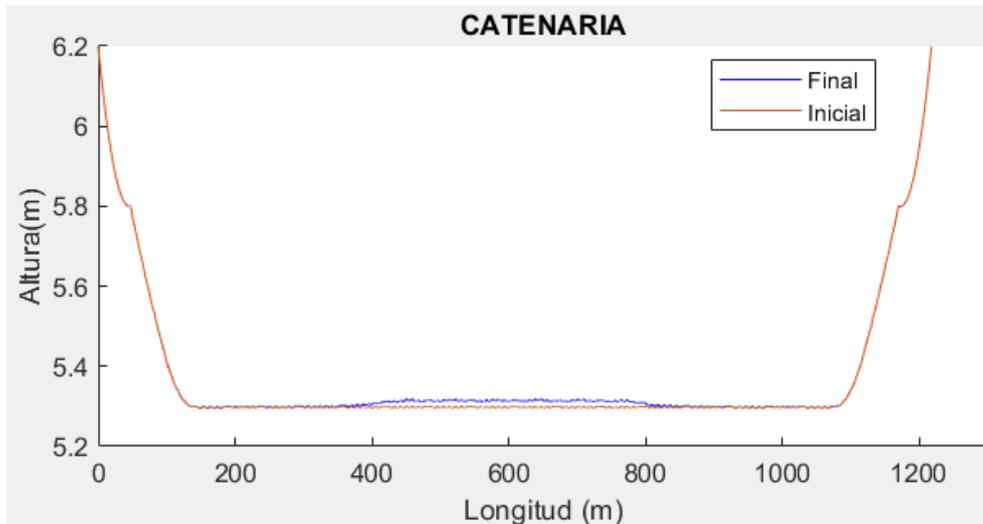


FIGURA 36 - ALTURA DEL HILO DE CONTACTO NOMINAL Y FINAL.

En la figura 36 se representa la altura inicial y final de una catenaria. En esta catenaria se estudia el desgaste en el tramo que comprende desde los 400 metros hasta los 800 metros. Se aprecia como la pérdida de sección tras 258 simulaciones ha provocado que el hilo de contacto final presente una altura más elevada que el inicial.

Como se ha visto en la gráfica, una vez el equilibrio estático es calculado se consigue una nueva catenaria sobre la cual se tiene que volver a estudiar la interacción pantógrafo-catenaria. Se vuelve a empezar por tanto el ciclo, pero esta vez sin realizar la entrada de datos y la parte de GENCAT.

6. RESULTADOS NUMÉRICOS

Los resultados numéricos se obtienen al realizar simulaciones sobre un modelo de catenaria, provocando un desgaste en el hilo de contacto y consiguiendo diferentes resultados para poder analizar como varía el desgaste en función de los parámetros de simulación explicados anteriormente.

En las gráficas de resultados se representa siempre los resultados iniciales antes de producir desgaste en la catenaria de color naranja, y resultados finales sobre una catenaria ya desgastada de color azul.

6.1-VARIACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DEL SISTEMA EN FUNCIÓN DEL DESGASTE.

Para estudiar el comportamiento dinámico del sistema se realizan simulaciones dinámicas sobre una catenaria inicial que no presenta ningún desgaste. Estas simulaciones se realizan a una velocidad del pantógrafo de 300km/h y una fuerza de precarga estática del pantógrafo de 142.8 N.

Tras realizar 258 simulaciones se obtiene un desgaste en un punto del hilo superior al 20% por lo que se detienen las simulaciones al superar la condición de desgaste máximo permitido en un punto del hilo de contacto.

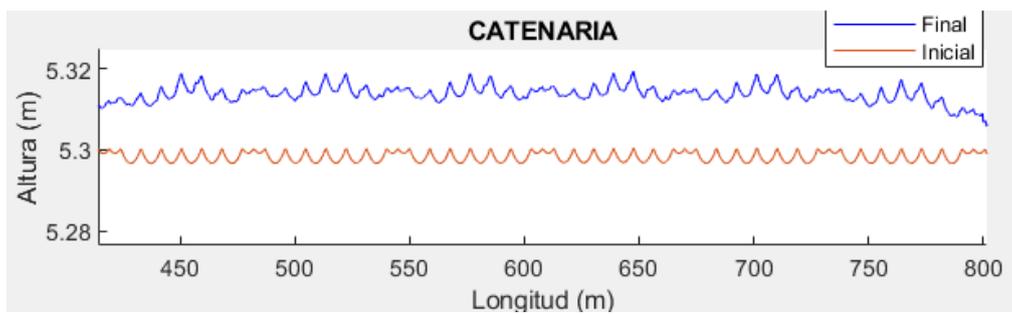


FIGURA 37 - ALTURA HILO DE CONTACTO NOMINAL Y FINAL PARA UNA VELOCIDAD DE 300 KM/H Y UNA FUERZA ESTÁTICA DE 142.8 N.

En la figura 37 se puede comparar la catenaria nominal sin desgaste con la catenaria final tras 258 simulaciones. Estas 258 simulaciones equivalen a 258000 pasadas del pantógrafo a lo largo del hilo de contacto.

Se puede apreciar como la catenaria desgastada ha incrementado su altura. Esto es debido a que el modelo de catenaria tiene en cuenta las pendolas las cuales provocan una fuerza de sujeción en el hilo de contacto, por lo que al perder masa aumenta su altura.

Esta variación de la altura de la catenaria afecta directamente a la fuerza de contacto que ejerce el pantógrafo sobre el hilo de contacto.

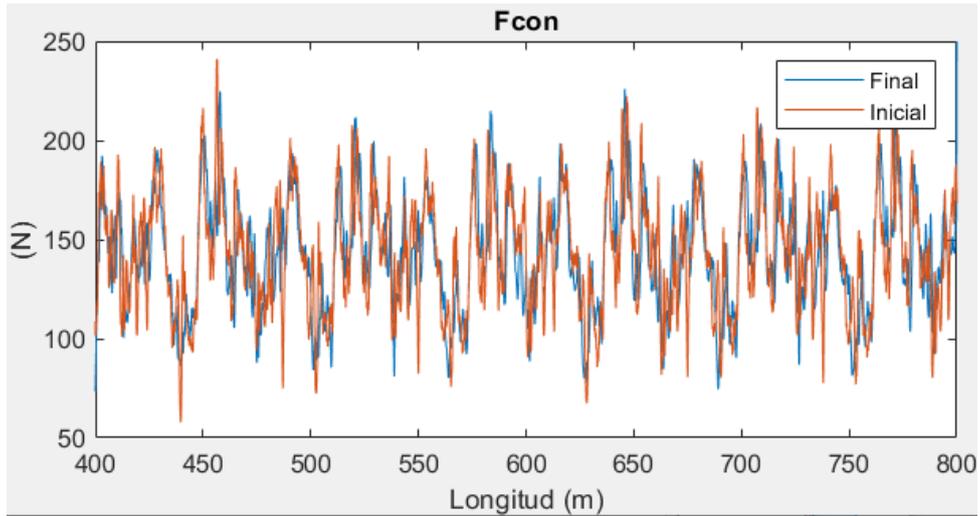


FIGURA 38 - FUERZA DE CONTACTO INICIAL Y FINAL PARA UNA VELOCIDAD DE 300 KM/H Y UNA FUERZA ESTÁTICA DE 142.8 N.

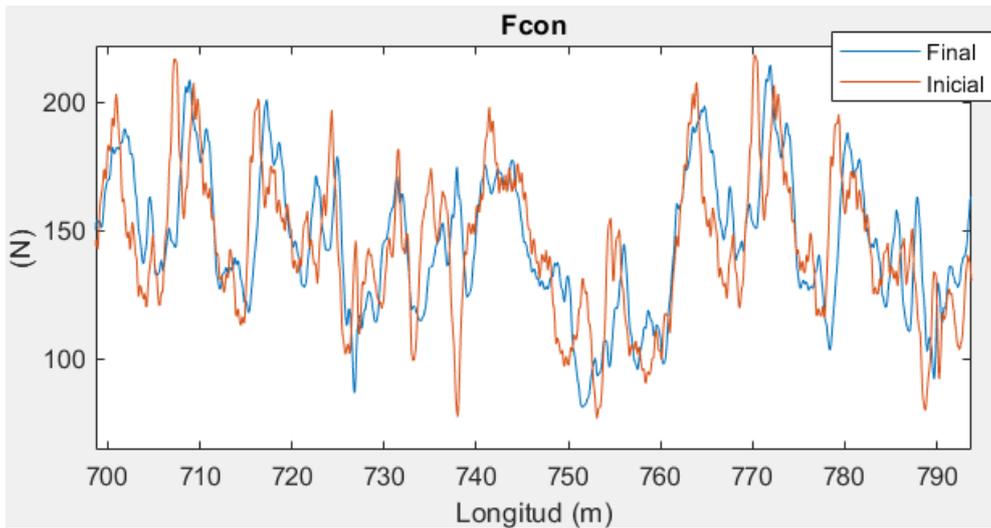


FIGURA 39 - FUERZA DE CONTACTO INICIAL Y FINAL PARA UNA VELOCIDAD DE 300 KM/H Y UNA FUERZA ESTÁTICA DE 142.8 N (AMPLIADA).

En las graficas correspondientes a las figuras 38 y 39 se compara la fuerza de contacto entre el pantógrafo y la catenaria en una pasada inicial cuando la catenaria no presenta ningún desgaste, y una pasada final cuando la catenaria ya ha sido desgastada.

Se puede apreciar como la fuerza de contacto es menor en la catenaria desgastada debido a que la altura del hilo de contacto en algunos puntos es mayor y por lo tanto se encuentra a más distancia del pantógrafo.

En la parte aumentada de la fuerza de contacto se observa claramente que en la mayoría de puntos la fuerza de contacto inicial es superior a la final. Esto supondría que el desgaste varíe a lo largo de las simulaciones a medida que se va desgastando la catenaria

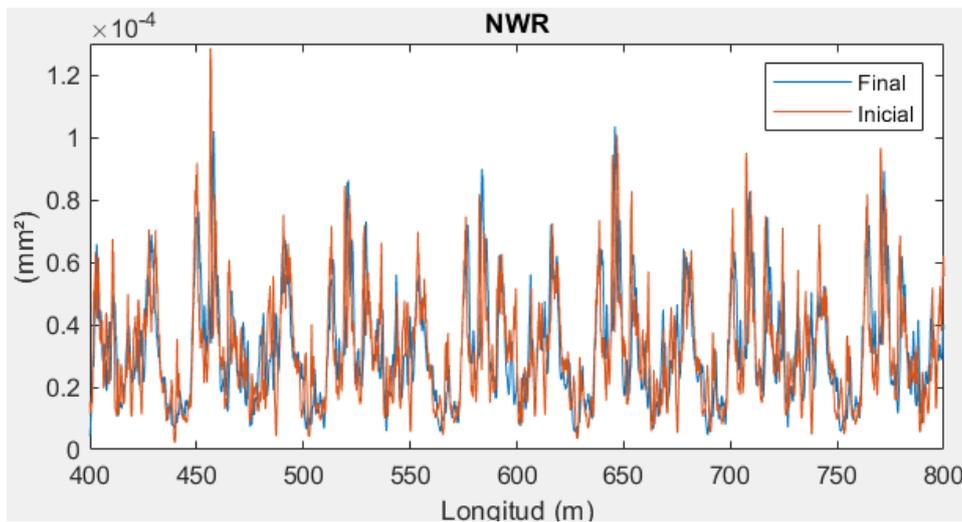


FIGURA 40 - TASA DE DESGASTE INICIAL Y FINAL PARA UNA VELOCIDAD DE 300 KM/H Y UNA FUERZA ESTÁTICA DE 142.8 N.

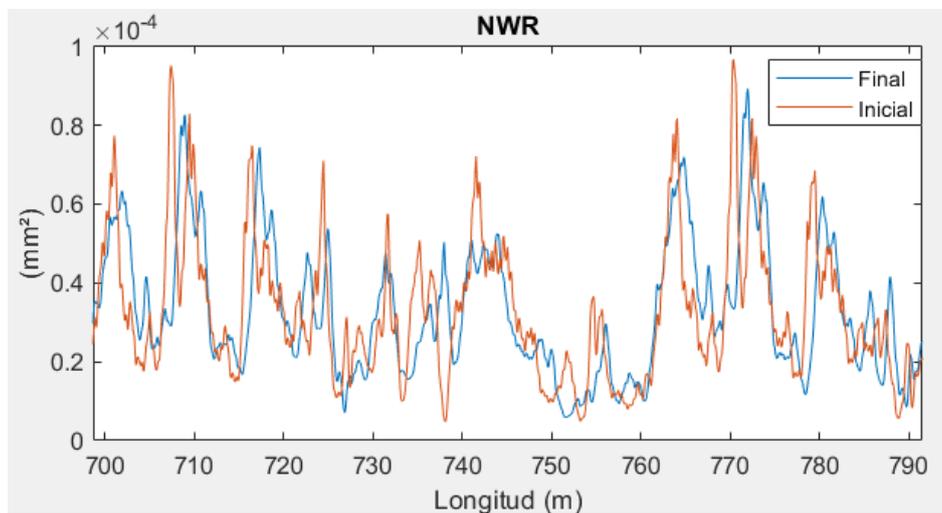


FIGURA 41 - TASA DE DESGASTE INICIAL Y FINAL PARA UNA VELOCIDAD DE 300 KM/H Y UNA FUERZA ESTÁTICA DE 142.8 N (AMPLIADA).

En las figuras 40 y 41 se puede ver como la variación de la fuerza de contacto con el desgaste provoca que también varíe la tasa de desgaste.

La tasa de desgaste también disminuye en la mayoría de puntos a medida que la catenaria presenta un mayor desgaste, debido a que la tasa de desgaste está relacionada con la fuerza de contacto entre el pantógrafo y la catenaria.

Esto significa que a medida que el hilo de contacto presenta más desgaste, tarda más en desgastarse tras cada simulación, debido a esta disminución de la tasa de desgaste.

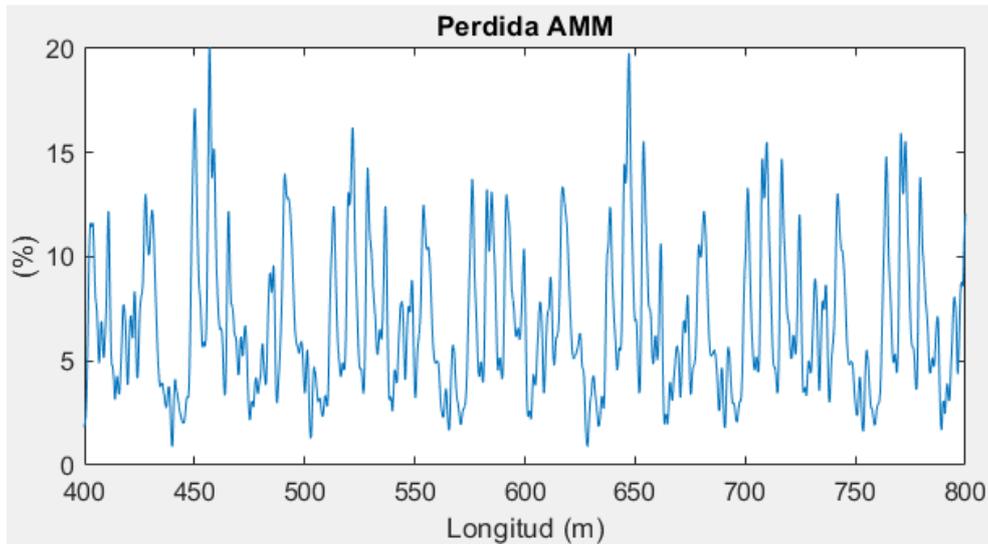


FIGURA 42 - PÉRDIDA DE SECCIÓN DEL HILO DE CONTACTO PARA UNA VELOCIDAD DE 300 KM/H Y UNA FUERZA ESTÁTICA DE 142.8N.

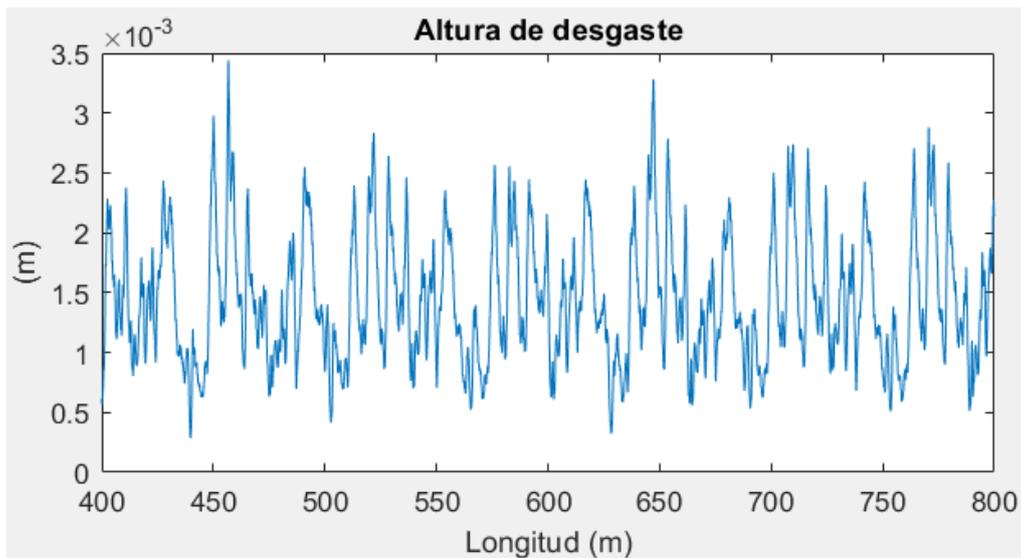


FIGURA 43 - ALTURA DE DESGASTE DEL HILO DE CONTACTO PARA UNA VELOCIDAD DE 300 KM/H Y UNA FUERZA ESTÁTICA DE 142.8 N.

Tras completar las 258 simulaciones se obtiene el porcentaje de sección desgastada y la altura desgastada en cada punto del hilo de contacto, tal como se ve en las figuras 42 y 43 respectivamente. Estas dos gráficas sirven para observar si se ha producido un desgaste regular a lo largo del hilo de contacto y recalcular el equilibrio estático de la catenaria obteniendo la altura real del hilo de contacto tras el desgaste.

Se aprecia como se obtiene un porcentaje de area desgastada del 20 % en dos puntos del hilo de contacto y en el resto no sobrepasa del 16%.

Comparando estas gráficas con las del NWR se observa que los puntos con mayor tasa de desgaste han sido los puntos que han sufrido mayor pérdida de sección en el hilo de contacto.

Fuerza de contacto (V=300 km/h, Fuerza estática=142.8 N)		
	Desviación típica	Valor Máximo
Catenaria nominal	29.12	239 N
Catenaria desgastada	28.46	224.2 N

TABLA 8 - TABLA COMPARATIVA DE LA FUERZA DE CONTACTO PARA UNA VELOCIDAD DE 300 KM/H Y UNA FUERZA ESTÁTICA DE 142.8 N SOBRE UNA CATENARIA NOMINAL Y UNA DESGASTADA.

En la tabla 8 se compara los valores de desviación típica y valor máximo de la fuerza de contacto. Para ello se han tomado los valores en la zona de estudio que comprende los puntos kilométricos de 400 a 800 metros.

Se aprecia que sobre la catenaria desgastada se obtiene un valor máximo de fuerza de contacto menor debido a este aumento de la altura del hilo de contacto y también un valor menor de desviación típica. Esto es debido a que al reducir la fuerza de contacto provoca menor osciación en el hilo de contacto obteniendo así unos valores más cercanos al valor de la fuerza de precarga estática del pantógrafo.

6.2 VARIACIÓN DEL DESGASTE EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD DEL PANTÓGRAFO

En este apartado se analiza el desgaste del hilo de contacto en función de la velocidad del pantógrafo. Al variar la velocidad del pantógrafo varia la tasa de desgaste provocando un desgaste diferente para cada velocidad de simulación.

Se analiza el desgaste sobre un mismo modelo de catenaria a distintas velocidades, manteniendo la fuerza de precarga estática del pantógrafo constante en 142.8N. Las velocidades de simulación son:

- 200 km/h.
- 250 km/h.
- 300 km/h.
- 350 km/h.

Debido a que la fuerza de contacto entre el hilo de contacto y el pantógrafo también varía con la velocidad. Para analizar los resultados es necesario comparar las fuerzas de contacto y tasas de desgaste para las distintas velocidades de simulación. También se compara el porcentaje de área desgastada del hilo de contacto.

6.2.1 FUERZAS DE CONTACTO

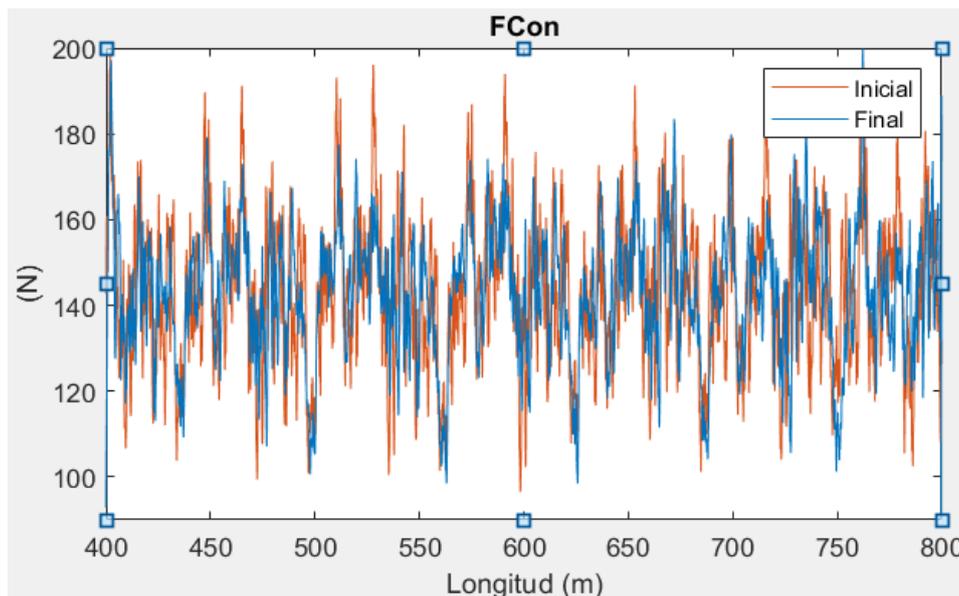


FIGURA 44 - FUERZA DE CONTACTO PARA UNA VELOCIDAD DE 200 KM/H Y UNA FUERZA ESTÁTICA DE 142.8 N.

En la figura 44 se representa el valor de la fuerza de contacto a una velocidad de 200 km/h. Se obtiene un valor máximo sobre la catenaria inicial de 198.97 N y en la catenaria desgastada de 196.12 N.

Aunque no hay mucha diferencia entre estos dos valores, destacan más puntos con un valor de fuerza de contacto más alto en la catenaria inicial que en la

final, viendo que sobre la catenaria desgastada los valores se encuentran más cercanos a la fuerza de precarga estática de 142.8 N.

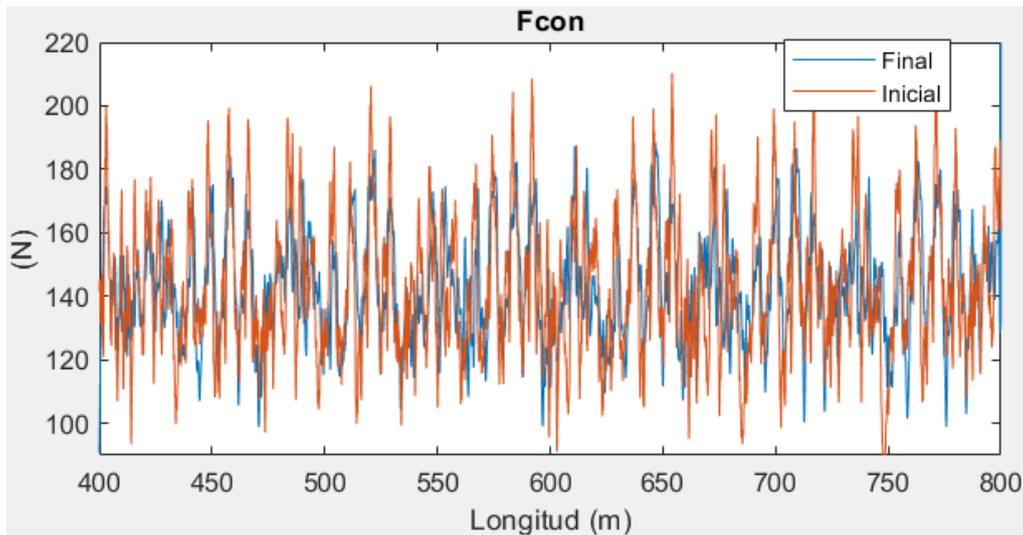


FIGURA 45 - FUERZA DE CONTACTO PARA UNA VELOCIDAD DE 250 KM/H Y UNA FUERZA ESTÁTICA DE 142.8 N.

En esta gráfica que corresponde a la figura 45 se representa el valor de la fuerza de contacto a una velocidad de 250 km/h. Se obtiene un valor máximo sobre la catenaria inicial de 210.30 N y en la catenaria desgastada de 186.49 N. Entre estos valores ya se encuentra una diferencia mayor debido a la disminución de la fuerza de contacto al aumentar el desgaste.

Comparando con las gráficas obtenidas a 200 km/h se observa un ligero aumento en la fuerza de contacto que provoca una mayor tasa de desgaste. Este aumento del desgaste se compara en el punto 6.2.2.

También se aprecian puntos con valores más alejados de la tendencia. Esto es debido a que al aumentar la velocidad del pantógrafo se generan mayores vibraciones del hilo de contacto al paso del pantógrafo provocando un contacto entre ambos más irregular.

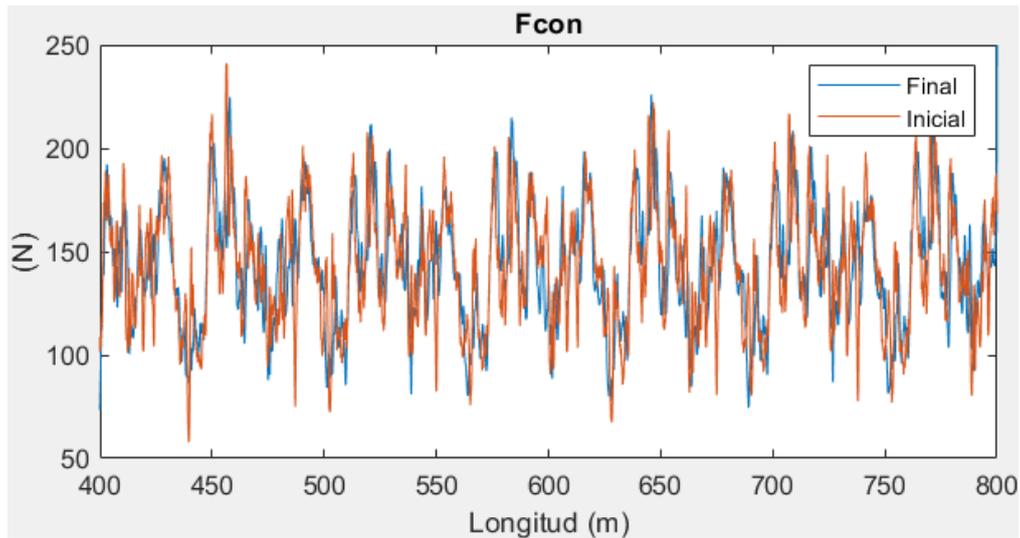


FIGURA 46 - FUERZA DE CONTACTO PARA UNA VELOCIDAD DE 300 KM/H Y UNA FUERZA ESTÁTICA DE 142.8N.

En la figura 46 se representa el valor de la fuerza de contacto a una velocidad de 300 km/h. Se obtiene un valor máximo sobre la catenaria inicial de 239.00 N y en la catenaria desgastada de 224.2 N.

Comparando con las anteriores simulaciones se vuelve a diferenciar que al aumentar la velocidad de pasada del pantógrafo aumenta la fuerza de contacto.

Se puede observar cómo se obtienen puntos máximos y mínimos más alejados de la tendencia de la gráfica, debido al aumento de las vibraciones del hilo de contacto provocados por ese aumento de velocidad de simulación.

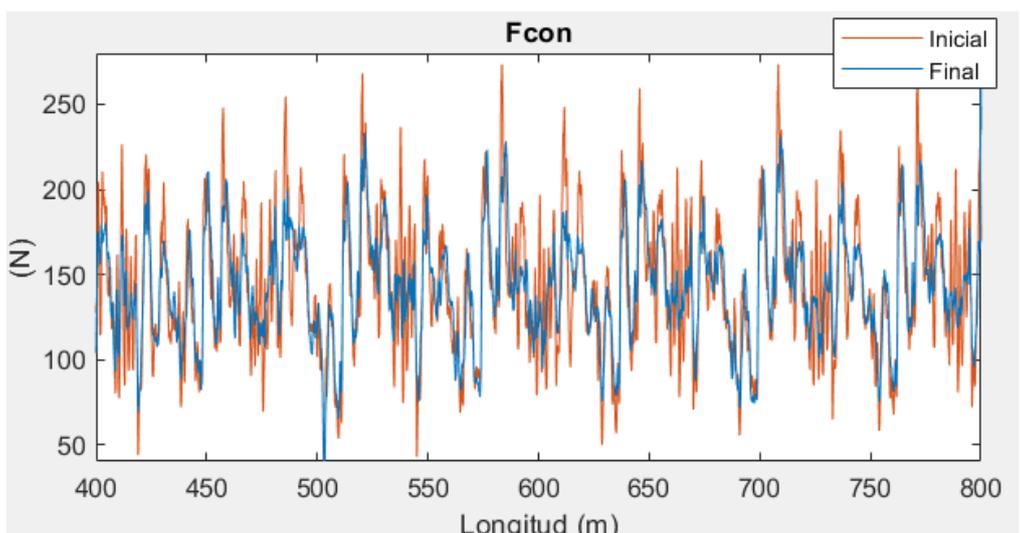


FIGURA 47 - FUERZA DE CONTACTO PARA UNA VELOCIDAD DE 350 KM/H Y UNA FUERZA ESTÁTICA DE 142.8 N.

En la anterior figura se representa el valor de la fuerza de contacto a una velocidad de 350 km/h. Se obtiene un valor máximo sobre la catenaria inicial de 273.28 N y en la catenaria desgastada de 232.35 N.

Para esta última velocidad de simulación se consiguen valores máximos de fuerza de contacto más elevados. También se aprecian valores de fuerza de contacto más dispersos y elevados que provocan una mayor tasa de desgaste.

6.2.2 TASAS DE DESGASTE

La diferencia en la fuerza de contacto en diferentes velocidades genera una tasa de desgaste distinta para cada velocidad.

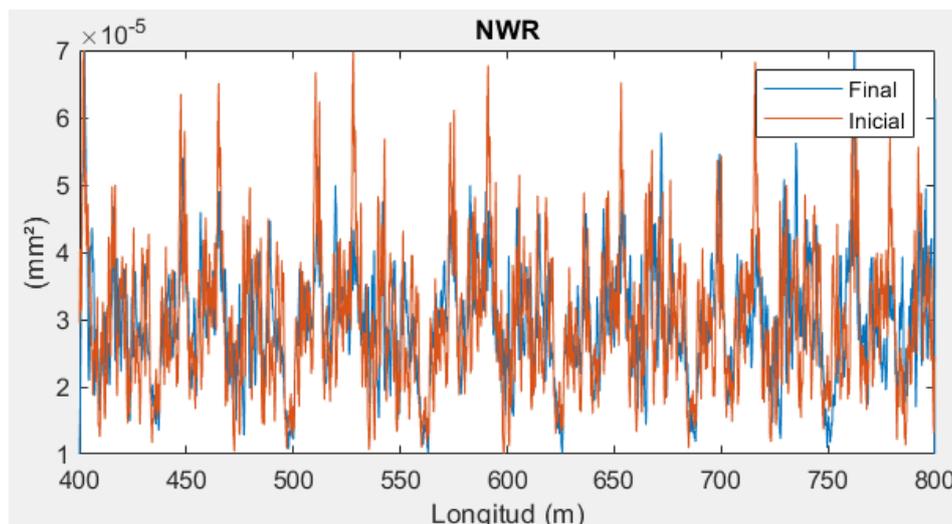


FIGURA 48 - TASA DE DESGASTE PARA UNA VELOCIDAD DE 200 KM/H Y UNA FUERZA ESTÁTICA DE 142.8 N.

Para velocidad de simulación igual a 200 km/h se obtiene una tasa de desgaste bastante regular en todos los puntos del hilo de contacto, viéndose claramente como sobre la catenaria desgastada el valor es menor que sobre la catenaria nominal. Los valores máximos pasan de $7e-05 \text{ mm}^2$.

La mayoría de los puntos no se alejan de la tendencia de la gráfica, aunque los puntos más altos alejados de esta tendencia son donde se originará la máxima pérdida de sección del hilo de contacto debido a esta tasa de desgaste más elevada.

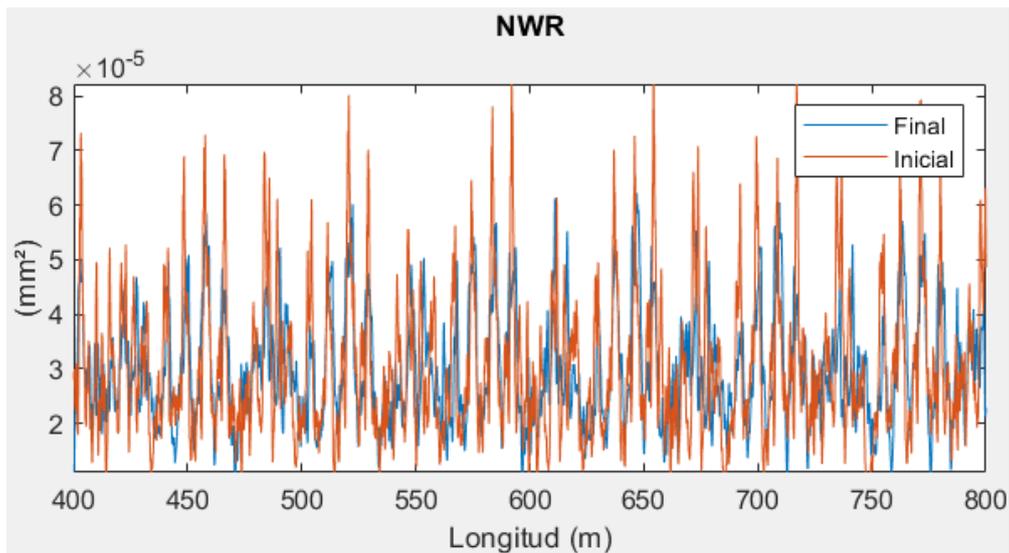


FIGURA 49 - TASA DE DESGASTE PARA UNA VELOCIDAD DE 250 KM/H Y UNA FUERZA ESTÁTICA DE 142.8 N.

La figura 49 se muestra la tasa de desgaste para una velocidad de 250 km/h. Se observa una tasa de desgaste más elevada con valores máximos más alejados de la tendencia de la gráfica. Los valores máximos se encuentran entorno a $8 \times 10^{-5} \text{ mm}^2$.

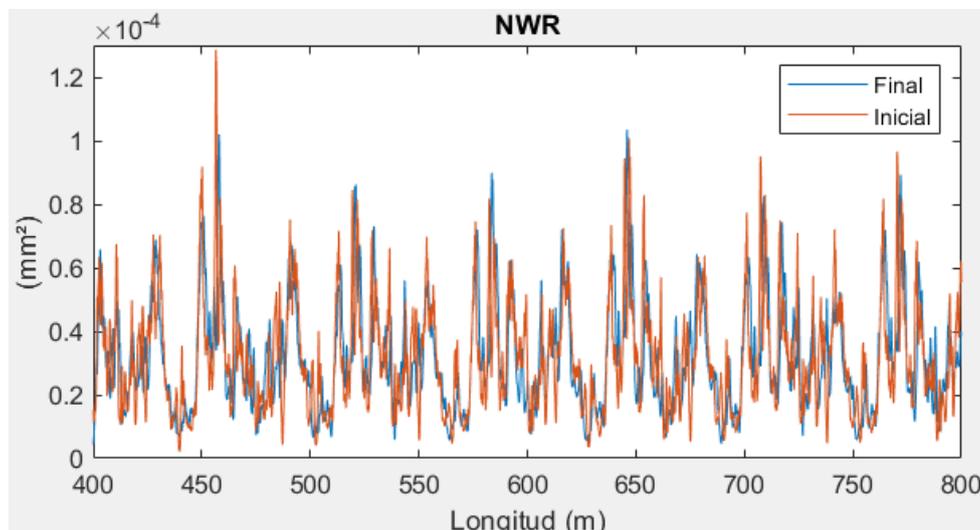


FIGURA 50 - TASA DE DESGASTE PARA UNA VELOCIDAD DE 300 KM/H Y UNA FUERZA ESTÁTICA DE 142.8 N.

En la figura 50 se aprecian valores más altos de NWR para 300 km/h. Se ven valores máximos entorno a $13 \times 10^{-5} \text{ mm}^2$. Además, existen puntos más alejados a la tendencia de la gráfica.

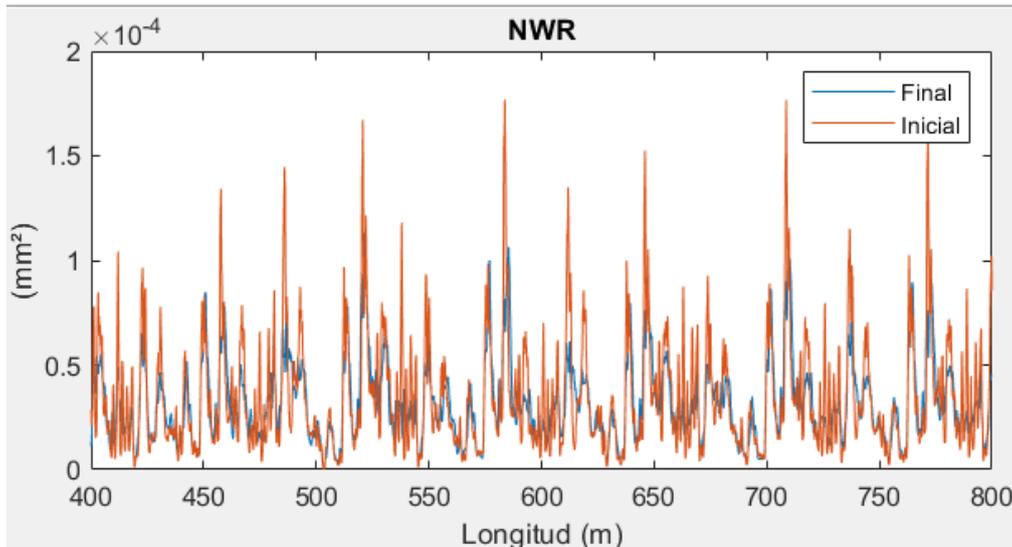


FIGURA 51 - TASA DE DESGASTE PARA UNA VELOCIDAD DE 350 KM/H Y UNA FUERZA ESTÁTICA DE 142.8 N.

Para finalizar, en esta última imagen correspondiente a una velocidad de simulación de 350 km/h se aprecian unos valores máximos de NWR muy alejados de la tendencia. Los valores máximos alcanzan $17 \times 10^{-5} \text{ mm}^2$ significando la tasa de desgaste más alta de todas las velocidades de simulación.

Comparando las 4 gráficas obtenidas a las distintas velocidades se cumple que una mayor fuerza de contacto genera una mayor tasa de desgaste en la catenaria.

Se aprecia como para las 4 velocidades, la tasa de desgaste de una pasada en la catenaria desgastada es inferior a la tasa de desgaste en la catenaria nominal.

También se aprecia que a medida que aumenta la velocidad de simulación se generan valores más altos y dispersos. Estos puntos coinciden con los puntos donde la fuerza de contacto alcanza valores elevados vistos en las figuras 48, 49, 50 y 51.

6.2.3 PORCENTAJE DE ÁREA DESGASTADA.

El estudio del porcentaje de área desgastada es necesario para comprobar si el desgaste es más o menos uniforme a lo largo del hilo de contacto en función de la velocidad de simulación, además de para poder recalculer el equilibrio estático de la catenaria y obtener la altura real del hilo de contacto tras el desgaste.

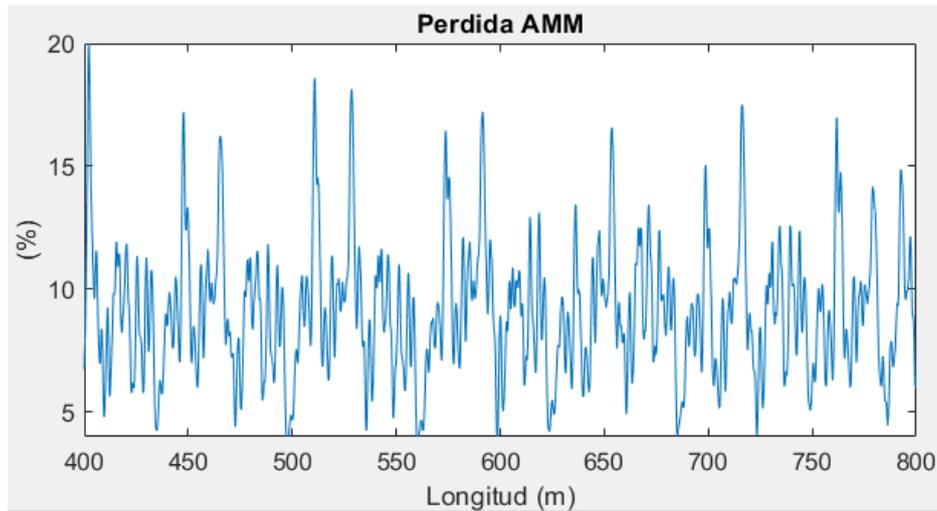


FIGURA 52 - PERDIDA DE SECCIÓN DEL HILO DE CONTACTO PARA UNA VELOCIDAD DE 200 KM/H Y UNA FUERZA ESTÁTICA DE 142.8 N.

Para una velocidad de simulación de 200 km/h se obtiene la figura 52 que representa el porcentaje de pérdida de sección en el hilo de contacto tras 367 simulaciones. Se observa como un punto cercano a los 400 metros del hilo de contacto alcanza un desgaste del 20% de la sección inicial.

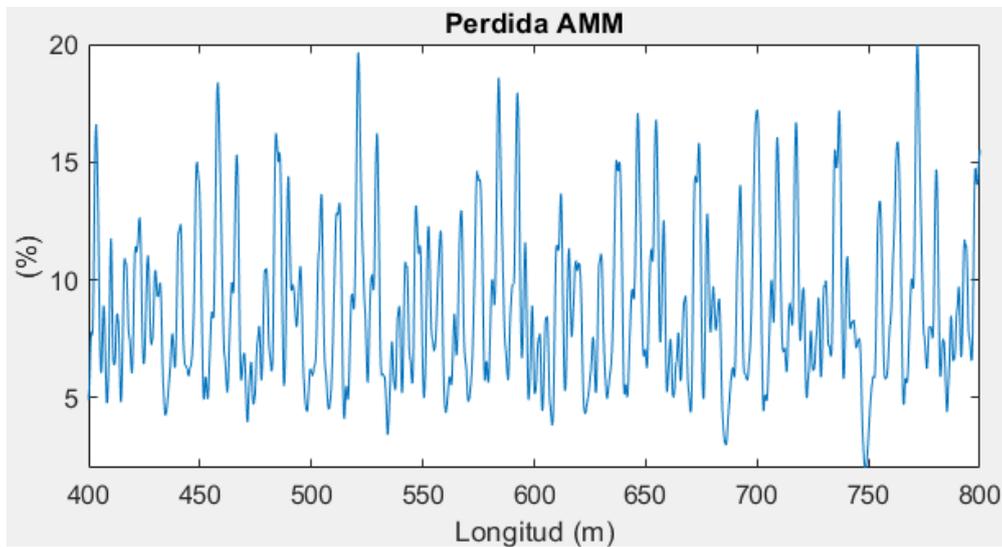


FIGURA 53 - PERDIDA DE SECCIÓN DEL HILO DE CONTACTO PARA UNA VELOCIDAD DE 250 KM/H Y UNA FUERZA ESTÁTICA DE 142.8 N.

En la figura 53 se observa el porcentaje de pérdida de área para una velocidad de 250 km/h obtenida al completar 350 simulaciones. Se observan valores más dispersos respecto a la velocidad de 200 km/h, tanto superiores como inferiores.

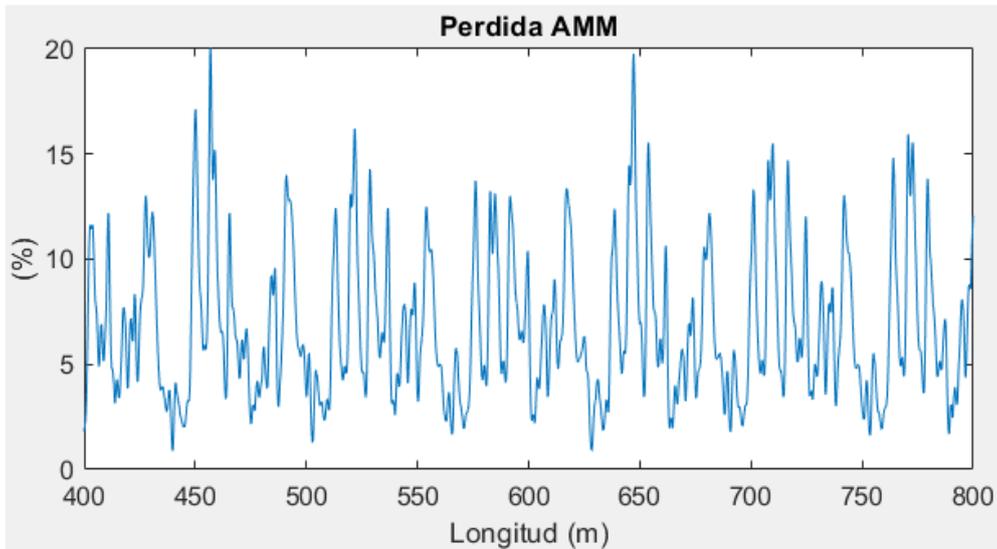


FIGURA 54 - PERDIDA DE SECCIÓN DEL HILO DE CONTACTO PARA UNA VELOCIDAD DE 300 KM/H Y UNA FUERZA ESTÁTICA DE 142.8 N.

En la gráfica anterior se muestra como para una velocidad de 300 km/h se obtienen valores mínimos menores que en las anteriores gráficas y valores superiores más dispersos. Esto es debido a que el aumento de la velocidad de simulación provoca un aumento de las vibraciones en el hilo de contacto.

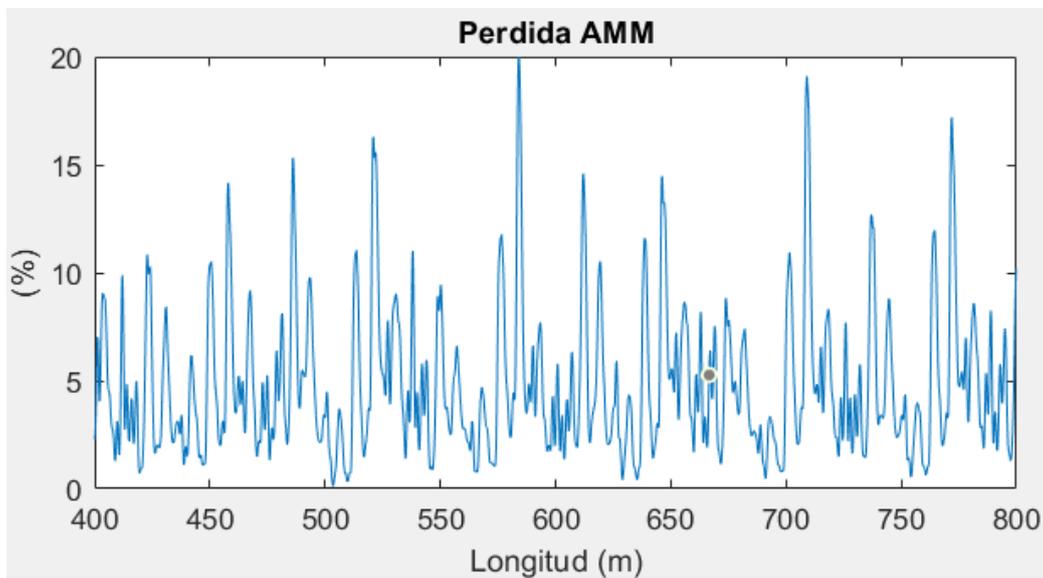


FIGURA 55 - PERDIDA DE SECCIÓN DEL HILO DE CONTACTO PARA UNA VELOCIDAD DE 350 KM/H Y UNA FUERZA ESTÁTICA DE 142.8 N.

Por último, en la figura 55 obtenida a la velocidad de 350 km/h se observan puntos con prácticamente desgaste nulo. Esto quiere decir que el hilo de contacto tiene que ser sustituido aun habiendo zonas que no están prácticamente desgastadas.

Comparando las gráficas obtenidas a las 4 velocidades se observa que para velocidades más bajas el desgaste en el hilo de contacto es más uniforme.

Lo ideal es que el desgaste sea totalmente uniforme llegando en casi todos los puntos del hilo de contacto al 20% de sección desgastada.

Las altas velocidades provocan mayores vibraciones y se observa como los puntos toman valores más repartidos y alejados de la media, tanto superiores como inferiores. Esto provoca un desgaste más irregular a lo largo de todo el hilo de contacto.

Esto supone que el hilo de contacto tenga que ser sustituido siendo que muchos puntos presentan un desgaste muy por debajo del 20%.

6.2.4 TABLAS COMPARATIVAS

En la tabla 9 se compara la desviación típica de la fuerza de contacto entre el pantógrafo y la catenaria para las distintas velocidades de simulación y sobre las catenarias nominales en una pasada inicial, y sobre las catenarias desgastadas en una pasada final. También es importante conocer el número de simulaciones necesarias para obtener un punto en el hilo de contacto con un área desgastada mayor del 20%. Es importante tener en cuenta que el número de simulaciones hay que multiplicarlo por 1000 para obtener el número de pasadas totales que realiza el pantógrafo sobre el hilo de contacto.

Velocidad	Catenaria	Desviación típica Fcon	Valor máximo Fcon (N)	Número de simulaciones
200 km/h	Nominal	17.42	198.97	367
	Desgastada	15.12	196.12	
250 km/h	Nominal	21.93	210.30	350
	Desgastada	17.62	186.49	
300 km/h	Nominal	29.12	239.00	258
	Desgastada	28.46	224.20	
350 km/h	Nominal	40.29	273.28	173
	Desgastada	32.14	232.35	

TABLA 9 - TABLA COMPARATIVA DE LA FUERZA DE CONTACTO PARA LAS DISTINTAS VELOCIDADES DE SIMULACIÓN CON UNA FUERZA ETERNA DE 142.8 N.

En la tabla 9 se aprecia que al aumentar la velocidad de simulación disminuye el número de simulaciones necesarias para obtener un punto con el área desgastada mayor al 20% de la inicial. Esto es debido al aumento de la fuerza de contacto, que también se aprecia como los valores máximos aumentan con el aumento de la velocidad de simulación.

También se aprecia que al aumentar la velocidad la desviación típica de la fuerza de contacto aumenta. Esto también se ve en las gráficas que comparan la fuerza de contacto en que existen puntos concretos del hilo de contacto con fuerzas más elevadas.

Es importante fijarse en que la desviación típica disminuye en las catenarias desgastadas debido a que la fuerza de contacto sobre la catenaria desgastada es menor, por lo que se generan menos vibraciones en el hilo de contacto y se obtienen valores de la fuerza de contacto más constantes.

6.3 VARIACIÓN DEL DESGASTE EN FUNCIÓN DE LA FUERZA DE PRECARGA ESTÁTICA DEL PANTÓGRAFO

En este punto se analiza el desgaste variando la fuerza estática del pantógrafo con una velocidad constante de simulación de 300 km/h.

Anteriormente, en el apartado 6.1 se ha comprobado que la tasa de desgaste depende directamente de la fuerza de contacto entre el pantógrafo y el hilo de contacto. Al variar esta fuerza del pantógrafo la fuerza de contacto también varía, por lo que para cada valor de la fuerza estática se obtendrán diferentes valores de tasa de desgaste.

Para ello se realizan simulaciones con diferentes valores de fuerzas de precarga estáticas, los cuales son:

- Fuerza de precarga estática = 50 N.
- Fuerza de precarga estática = 100 N.
- Fuerza de precarga estática = 150 N.
- Fuerza de precarga estática = 200 N.

Para analizar los resultados es necesario comparar las fuerzas de contacto y tasas de desgaste para las distintas fuerzas estáticas. También se compara el porcentaje de área desgastada del hilo de contacto.

6.3.1 FUERZAS DE CONTACTO

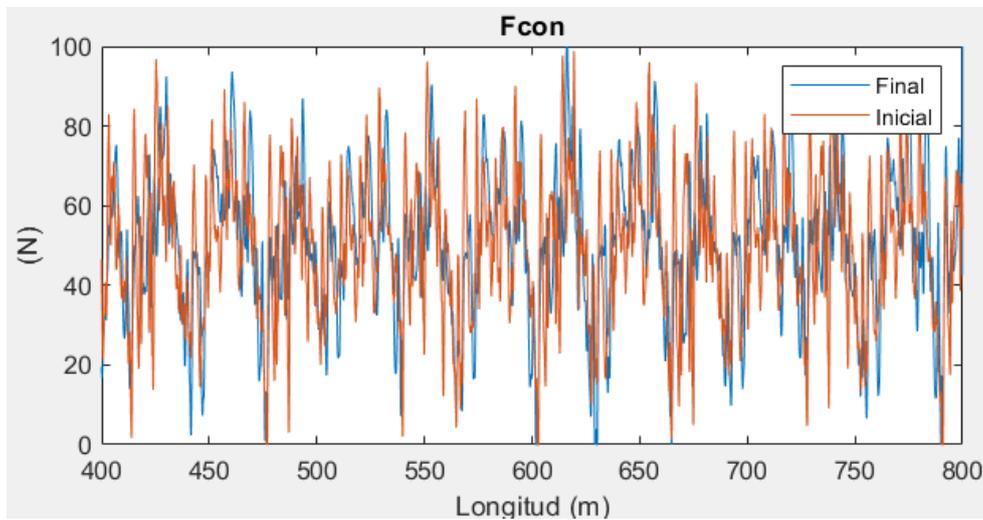


FIGURA 56 - FUERZA DE CONTACTO PARA UNA VELOCIDAD DE 300 KM/H Y UNA FUERZA ESTÁTICA DE 50 N.

En la figura 56 representa la fuerza de contacto obtenida con una fuerza estática de 50 N.

Se aprecia en la gráfica como la fuerza de contacto entre el pantógrafo y el hilo de contacto tiene valores en torno a 50 N. No se aprecia casi diferencia entre los valores máximos de fuerza de contacto en la catenaria inicial con respecto a la final. Se obtiene un valor máximo de fuerza de contacto sobre la catenaria nominal de 98.87 N y sobre la catenaria desgastada de 101.05 N. Esto es debido a que la fuerza de precarga estática es tan baja que la fuerza de contacto entre el pantógrafo y el hilo de contacto mantiene sus valores pese al desgaste del hilo.

Es importante saber que existen puntos con un valor de fuerza de contacto nulo, por lo que existen puntos donde el hilo de contacto y el pantógrafo no están en contacto. Esto provoca arcos eléctricos que producen desgaste e interfieren en el funcionamiento del sistema real de ferrocarril.

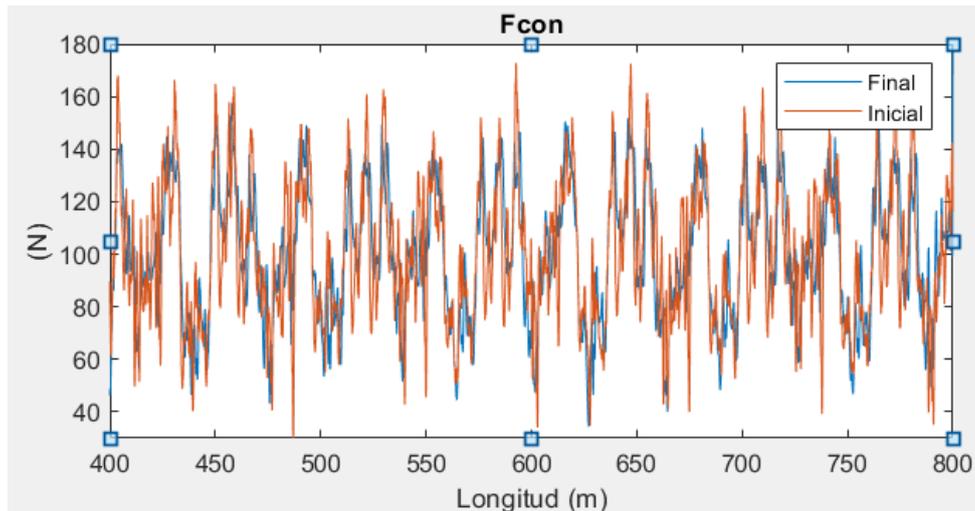


FIGURA 57 - FUERZA DE CONTACTO PARA UNA VELOCIDAD DE 300 KM/H Y UNA FUERZA ESTÁTICA DE 100 N.

En esta gráfica se representa el valor de la fuerza de contacto con un valor de 100 N de fuerza estática. Se obtiene un valor máximo de fuerza de contacto de 172.49 N sobre la catenaria nominal y 157.58 N sobre la catenaria desgastada.

Al aumentar la fuerza estática aumenta también la fuerza de contacto, la cual tiene una tendencia de 100N como se aprecia en la gráfica.

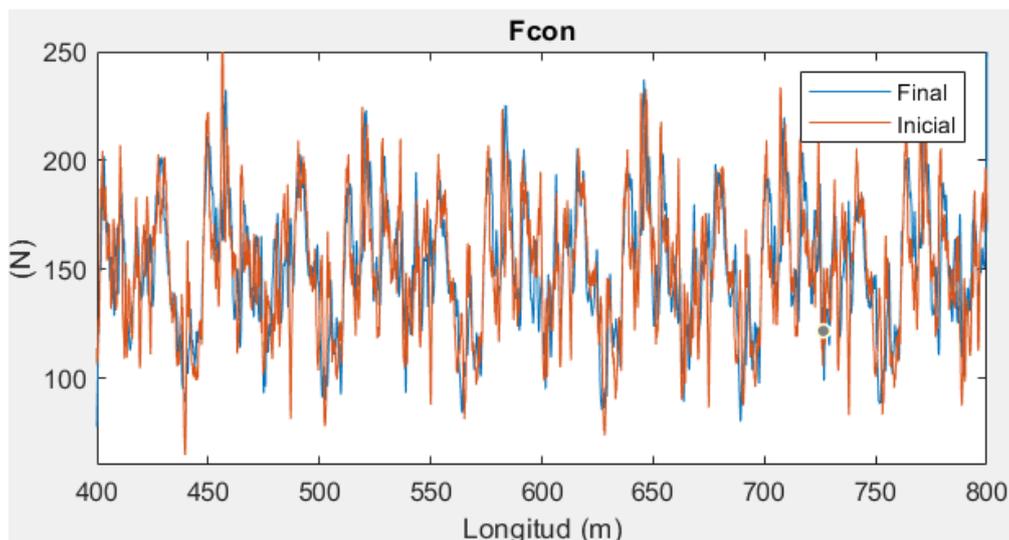


FIGURA 58 - FUERZA DE CONTACTO PARA UNA VELOCIDAD DE 300 KM/H Y UNA FUERZA ESTÁTICA DE 150 N.

Al representar la fuerza de contacto con el parámetro de fuerza estática de 150 N se aprecia en la figura 58 que la fuerza de contacto aumenta a medida que también aumenta este parámetro de fuerza. Se obtienen valores máximos de

fuerza de contacto de 256.55 N en la catenaria nominal y 237.29 N en la catenaria desgastada.

También se aprecia que al aumentar la fuerza estática los valores máximos están más dispersos llegando a ser más extremos.

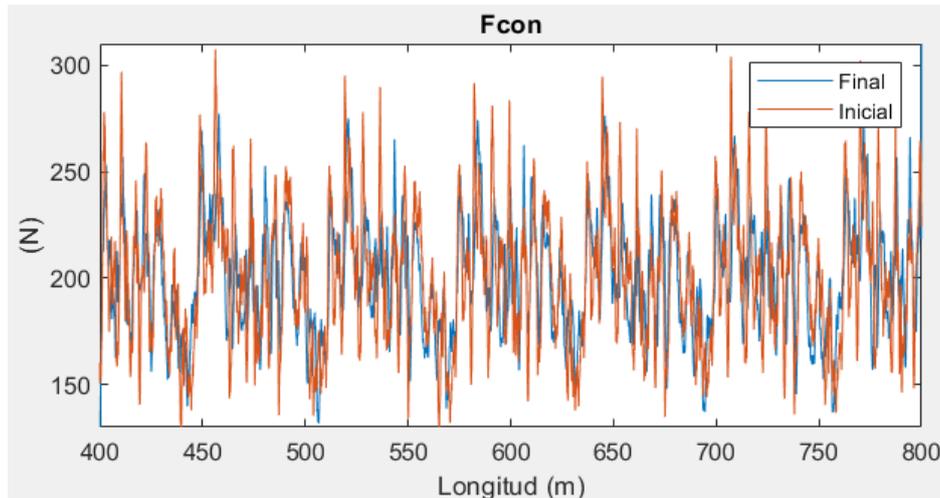


FIGURA 59 - FUERZA DE CONTACTO PARA UNA VELOCIDAD DE 300 KM/H Y UNA FUERZA ESTÁTICA DE 200 N.

Por último, en la figura 59 se aprecia como para una fuerza estática de 200 N la fuerza de contacto alcanza valores máximos de 307.33 N en la catenaria nominal y 277.23 N en la catenaria desgastada.

Esto supone que para una fuerza externa tan alta la tasa de desgaste tendrá valores muy elevados provocando un desgaste muy temprano del hilo de contacto.

6.3.2 TASAS DE DESGASTE

La diferencia en la fuerza de contacto entre el hilo y el pantógrafo provoca que la tasa de desgaste sea distinta para cada fuerza estática. En este apartado se compara las distintas tasas de desgaste obtenidas tras las simulaciones correspondientes.

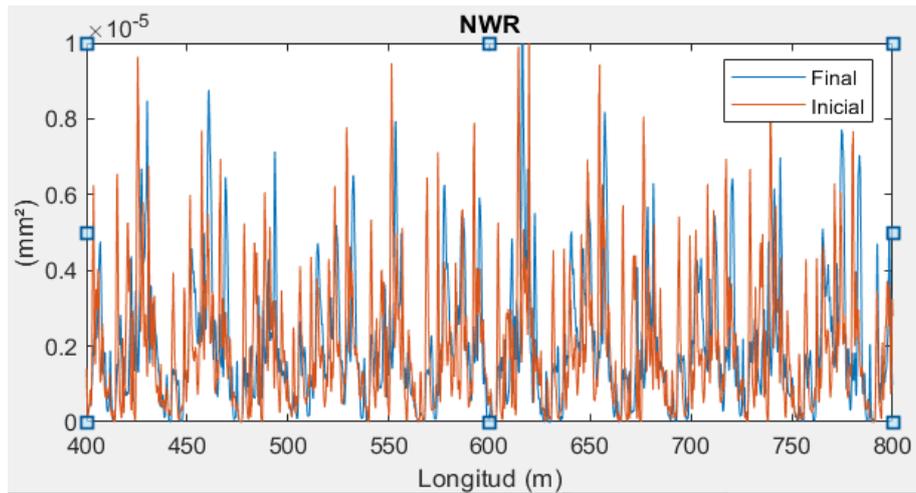


FIGURA 60 - TASA DE DESGASTE PARA UNA VELOCIDAD DE 300 KM/H Y UNA FUERZA ESTÁTICA DE 50 N.

En la figura 60 se muestra la tasa de desgaste para una fuerza estática de 50 N. Se aprecia un desgaste muy bajo el cual en muchos puntos es prácticamente nulo. Su valor máximo es mayor a $1e-05 \text{ mm}^2$. El tener un valor muy bajo de fuerza de contacto provoca tener esta pequeña tasa de desgaste.

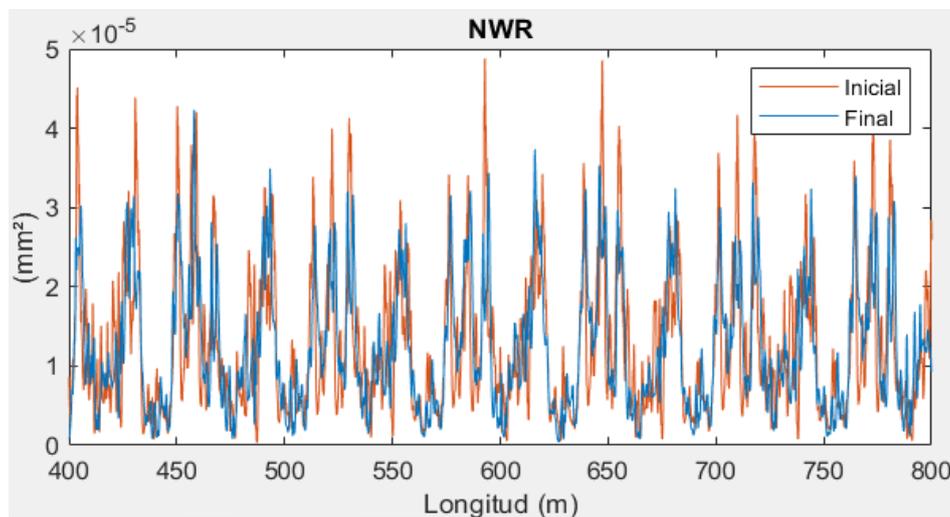


FIGURA 61 - TASA DE DESGASTE PARA UNA VELOCIDAD DE 300 KM/H Y UNA FUERZA ESTÁTICA DE 100 N.

Para una fuerza estática de 100 N se observa en la figura 61 un desgaste mayor que en el caso anterior, llegando los valores máximos a casi $5e-05 \text{ mm}^2$. También llama la atención que el desgaste sobre la catenaria nominal es más elevado que sobre la catenaria desgastada.

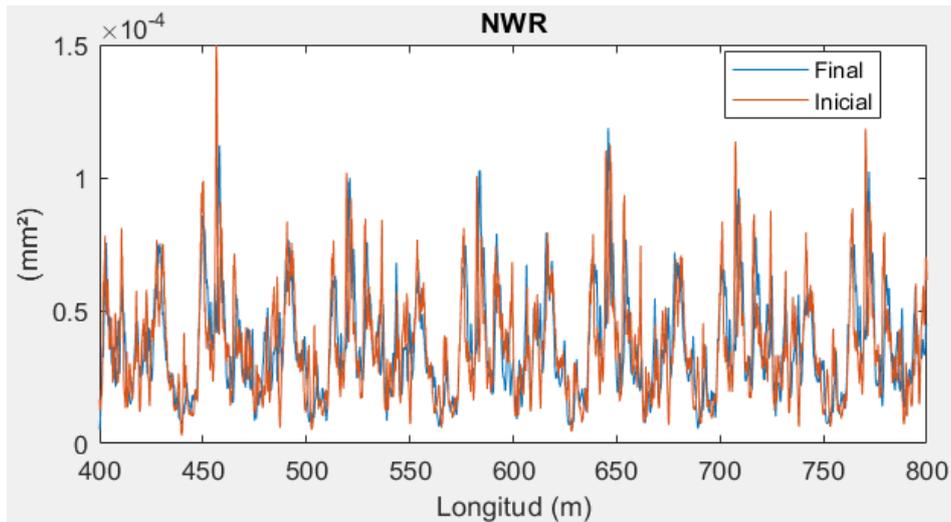


FIGURA 62 - TASA DE DESGASTE PARA UNA VELOCIDAD DE 300 KM/H Y UNA FUERZA ESTÁTICA DE 150 N.

En el ejemplo con fuerza estática igual a 150 N se obtienen valores máximos del orden de $15e-05 \text{ mm}^2$ representados en la figura 62. Se aprecia como el aumento de la fuerza estática provoca que la tasa de desgaste aumente de forma muy considerable.

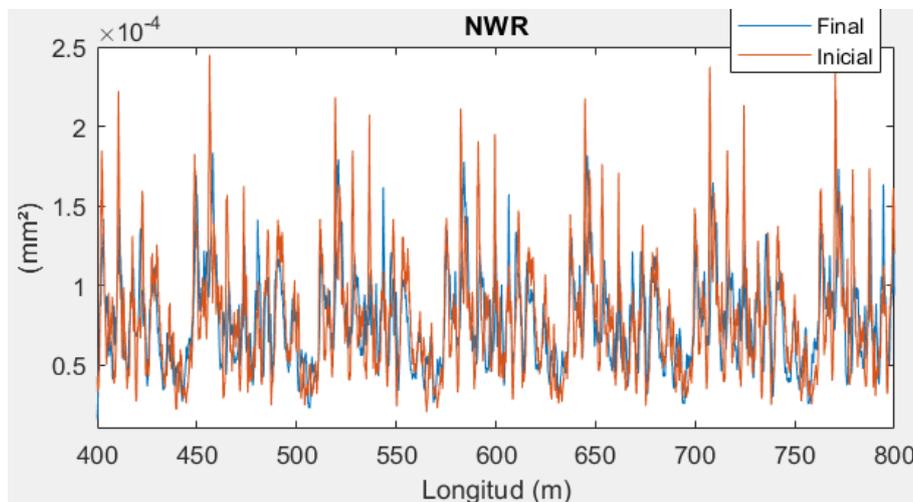


FIGURA 63 - TASA DE DESGASTE PARA UNA VELOCIDAD DE 300 KM/H Y UNA FUERZA ESTÁTICA DE 200 N.

En la gráfica anterior se aprecia como se obtiene un desgaste máximo con valor cerca de $25e-05 \text{ mm}^2$ para una fuerza estática de 200 N. Este es un valor muy elevado que provoca un desgaste muy temprano en el hilo de contacto.

Comparando las 4 gráficas obtenidas para las distintas fuerzas estática se observa que a mayor fuerza de contacto entre el pantógrafo y el hilo de contacto se obtiene una tasa de desgaste mayor.

También se cumple que, para el mismo valor de fuerza, las catenarias desgastadas que tienen una menor fuerza de contacto, la tasa de desgaste es menor que sobre la catenaria nominal.

Es importante saber que, aunque los valores de tasa de desgaste son números bajos del orden de $1e-04 \text{ mm}^2$, el último caso de $F_{est} = 200 \text{ N}$ presenta una tasa de desgaste de más de 10 veces mayor que el caso de $F_{est} = 50 \text{ N}$.

Esto significa que esta fuerza es un parámetro que tiene mucha influencia en la tasa de desgaste y por lo tanto en la vida útil del hilo de contacto.

6.3.3 PORCENTAJE DE ÁREA DESGASTADA

El estudio del porcentaje de área desgastada sirve para comparar si la variación de la fuerza estática afecta en la uniformidad del desgaste a lo largo del hilo de contacto, además de para poder recalculer el equilibrio estático de la catenaria y obtener la altura real del hilo de contacto tras el desgaste.

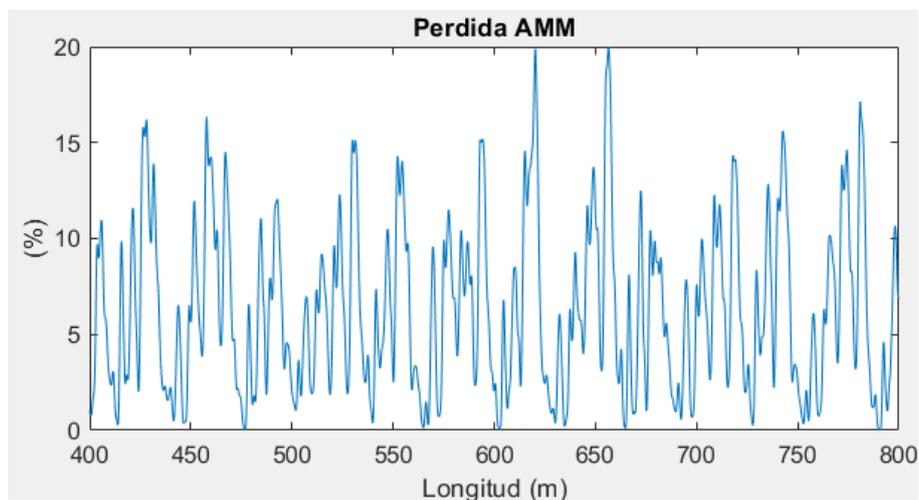


FIGURA 64 - PERDIDA DE SECCIÓN DEL HILO DE CONTACTO PARA UNA VELOCIDAD DE 300 KM/H Y UNA FUERZA ESTÁTICA DE 50 N.

Esta gráfica correspondiente a la figura 64 representa la pérdida de sección del hilo de contacto para una fuerza estática de 50 N. Debido a la baja tasa de desgaste para obtener esta gráfica hay que realizar un elevado número de

simulaciones, el cual se verá y comparará en el siguiente apartado. Existen zonas en las que no se ha desgastado prácticamente el hilo de contacto debido a la baja fuerza de contacto que existe en esos puntos.

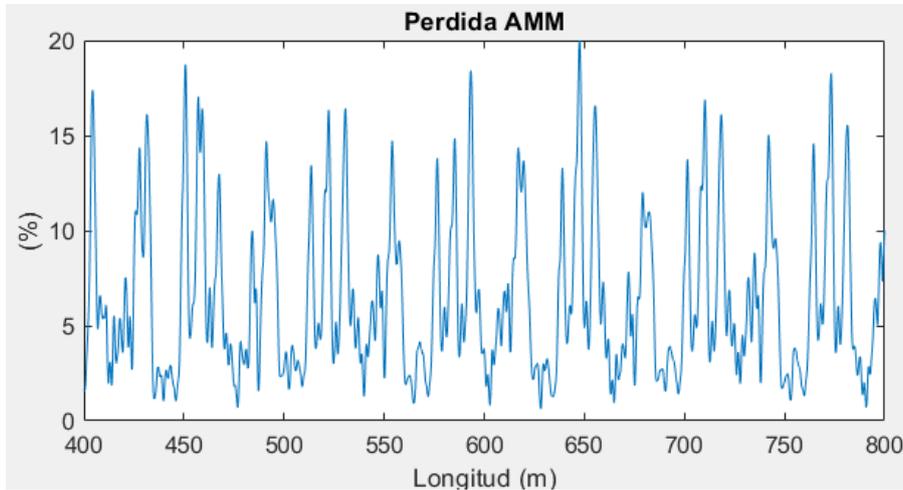


FIGURA 65 - PERDIDA DE SECCIÓN DEL HILO DE CONTACTO PARA UNA VELOCIDAD DE 300 KM/H Y UNA FUERZA ESTÁTICA DE 100 N.

Para una fuerza estática de 100 N se obtiene una gráfica de pérdida de sección con valores bastante dispersos, pero con una media de desgaste bastante alta como se aprecia en la figura 65.

Existen puntos con muy poco porcentaje de desgaste resultado de una fuerza de contacto poco regular.

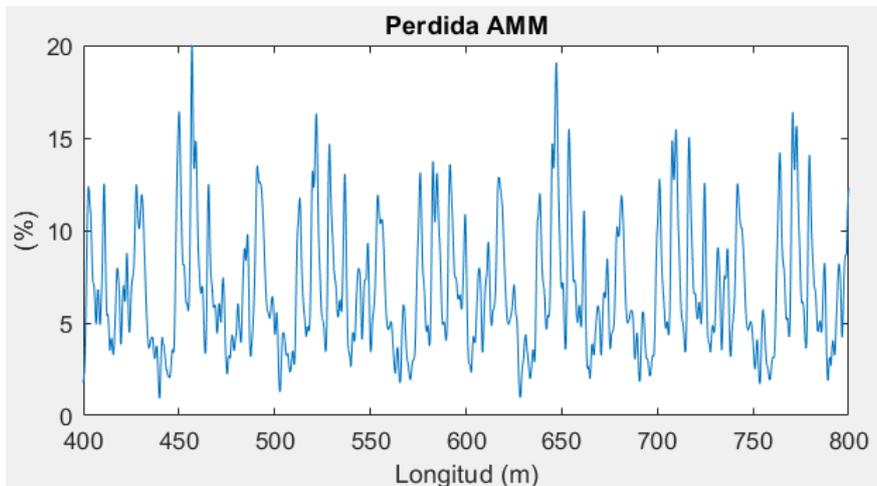


FIGURA 66 - PÉRDIDA DE SECCIÓN DEL HILO DE CONTACTO PARA UNA VELOCIDAD DE 300 KM/H Y UNA FUERZA ESTÁTICA DE 150 N.

En esta gráfica correspondiente a la figura 66 se aprecia como el porcentaje de pérdida tiene una media más baja para el ejemplo de la fuerza estática igual a 150 N. Se aprecia un desgaste menor a lo largo de todo el hilo de contacto exceptuando dos puntos que llegan y se acercan al 20%.

Este aumento de la fuerza de contacto provoca un aumento de vibraciones en el hilo de contacto que provoca un desgaste más irregular.

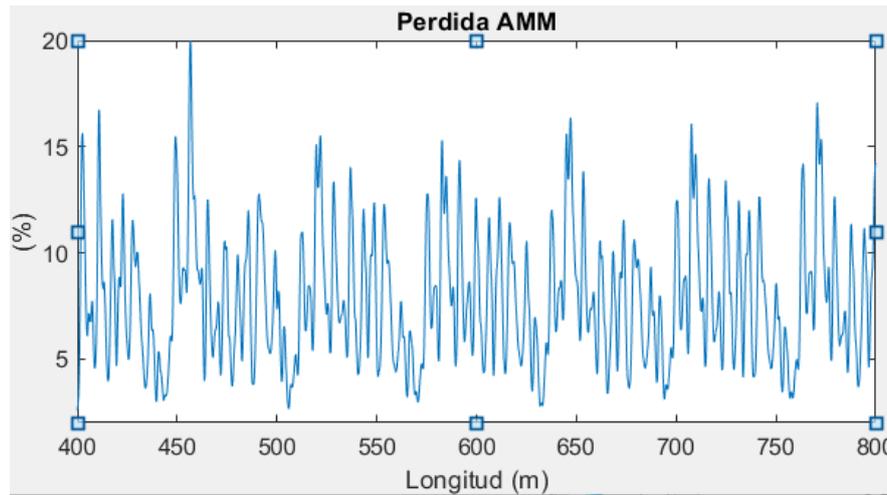


FIGURA 67 - PERDIDA DE SECCIÓN DEL HILO DE CONTACTO PARA UNA VELOCIDAD DE 300 KM/H Y UNA FUERZA ESTÁTICA DE 200 N.

La figura 67 representa la pérdida de sección para una fuerza estática de 200 N. Esta figura es bastante similar a la obtenida con la fuerza de 150 N. Se observa un punto con pérdida de sección máxima del 20% y el resto de los puntos bastante por debajo de este valor, dejando la mayoría de los puntos del hilo de contacto con un porcentaje de pérdida de sección entorno al 8%.

Comparando las 4 gráficas obtenidas para las distintas fuerzas estática se observa que existe diferencia en el porcentaje medio de área desgastada.

En las cuatro gráficas se consigue un porcentaje de desgaste medio bastante elevado, aunque a medida que aumenta la fuerza de contacto debida al aumento de la fuerza estática, se consigue un desgaste más irregular en el hilo de contacto. Aunque este desgaste no es tan irregular como en el apartado que varía la velocidad de simulación.

Por lo tanto, al aumentar la fuerza se produce un desgaste más elevado y además también es más irregular, por lo que la vida útil del hilo de contacto se reduce.

6.3.4 TABLAS COMPARATIVAS

De nuevo, en esta tabla se compara la desviación típica de la fuerza de contacto entre el pantógrafo y la catenaria para las fuerzas estáticas y sobre las catenarias nominales en una pasada inicial, y sobre las catenarias desgastadas en una pasada final. También es importante conocer el número de simulaciones necesarias para obtener un punto en el hilo de contacto con un área desgastada mayor del 20%. Es importante tener en cuenta que el número de simulaciones hay que multiplicarlo por 1000 para obtener el número de pasadas totales que realiza el pantógrafo sobre el hilo de contacto.

Fest	Catenaria	Desviación típica Fcon	Valor máximo Fcon (N)	Numero de simulaciones
50 N	Nominal	18.12	98.87	3939
	Desgastada	18.53	101.05	
100 N	Nominal	27.09	172.49	621
	Desgastada	25.47	157.58	
150 N	Nominal	29.89	256.55	226
	Desgastada	28.75	237.29	
200 N	Nominal	31.84	307.33	121
	Desgastada	26.90	277.23	

TABLA 10-TABLA COMPARATIVA DE LA FUERZA DE CONTACTO PARA LAS DISTINTAS FUERZAS ESTÁTICA CON UNA VELOCIDAD CONSTANTE DE 300 KM/H.

De la tabla 10 destaca el elevado número de simulaciones que se necesitan con Fest = 50 N para alcanzar un punto con el área desgastada mayor al 20% del área inicial. Tras 3939 simulaciones, que son 3939000 pasadas del pantógrafo sobre el hilo de contacto se obtiene este porcentaje de desgaste.

Se observa en el número de simulaciones cómo la fuerza estática tiene mucha importancia en el número de pasadas totales que puede soportar el hilo de contacto. Esto significa que, dentro de lo posible, interesa una fuerza baja para que el hilo de contacto tenga una vida útil más larga.

Al igual que en el apartado anterior, la desviación típica disminuye en las catenarias desgastadas debido a que la fuerza de contacto sobre la catenaria desgastada es menor, por lo que se generan menos vibraciones en el hilo de contacto y se obtienen valores de la fuerza de contacto más constantes.

CONCLUSIONES

En este proyecto se ha conseguido simular la interacción entre el pantógrafo y el hilo de contacto de una catenaria ferroviaria obteniendo así una serie de resultados que facilitan el mantenimiento de la línea y estudiar los parámetros para permitir una vida útil más larga de la línea ferroviaria.

Analizando los resultados obtenidos se puede concluir con que, en catenarias de alta velocidad, donde la intensidad de corriente que circula por el hilo de contacto es bastante baja, la fuerza de contacto entre el pantógrafo y el hilo de contacto es el factor más influyente en el desgaste del hilo de contacto. La fuerza de contacto depende directamente de la fuerza de precarga estática del pantógrafo sobre el hilo de contacto y la velocidad con la que el pantógrafo se mueve por el hilo de contacto.

También se observa que sobre un hilo de contacto más desgastado se obtiene una menor tasa de desgaste. Por lo que a medida que se desgasta el hilo se produce una interacción dinámica distinta a la inicial entre el hilo de contacto y el pantógrafo.

Por otro lado, esta herramienta de simulación del desgaste permite determinar cuándo es el momento óptimo para realizar un mantenimiento en la línea y así ahorrar costes en material, mantenimiento de la línea y acortando el tiempo fuera de servicio.

PRESUPUESTO

En este apartado se calcula el presupuesto total necesario para realizar este proyecto. El periodo de trabajo para la realización del proyecto ha sido de 4 meses.

Para calcular el presupuesto se tienen en cuenta los gastos de los recursos necesarios para su realización y del tiempo de trabajo.

Equipo informático

Aquí se resumen los costes relacionados con el equipo informático. Se distingue por un lado las licencias de software utilizadas y por otro el uso del ordenador.

Para la realización de este proyecto se necesitan licencias de software para Matlab R2021a y para Office 365. La licencia de Matlab tiene un coste anual de 800€ y la licencia de Office 365 tiene un coste mensual de 18,90€ que se tiene que renovar durante los 4 meses de realización.

El ordenador empleado durante todo el trabajo es un ASUS TUF FX505DT-BQ208. Es un ordenador portátil que tiene coste de adquisición de 662,15€. Se asume que la vida útil del mismo es de 5 años y que se utiliza durante 4 meses para la realización del proyecto. El coste del ordenador asciende a 43,70€.

Todos estos costes se organizan en la tabla 11.

Concepto	Coste	Unidades	Total
Matlab R2021a	800€	1	800€
Office 365	18,90€	4	75,60€
Ordenador	662,15€	0,066	43,70€
Total			919,30€

TABLA 11 - COSTES DEL EQUIPO INFORMÁTICO.

Mano de obra

En esta sección se incluyen los costes del personal asociado al desarrollo del proyecto.

Para su realización se necesitan 300 horas de trabajo del ingeniero mecánico y tienen un coste de 35 € la hora. Esto supone un coste de 10.500€ de mano de obra. Estas 300 horas se reparten en los 4 meses de duración que se necesitan para completar el proyecto.

Costes indirectos

En este apartado se incluyen los costes relacionados con servicios básicos como electricidad, agua, internet y alquiler. Estos gastos ya incluyen impuestos y son los costes aproximados a los de una vivienda habitual donde se ha realizado el trabajo. En la tabla 12 se aprecian los costes indirectos.

Concepto	Coste mensual	Meses	Total
Alquiler	150€	4	600€
Agua	20€	4	80€
Electricidad	25€	4	100€
Internet	15€	4	60€
Total			840€

TABLA 12 - COSTES INDIRECTOS.

Presupuesto final

Concepto	Importe sin IVA	IVA (21%)	TOTAL
Ordenador	43,70€	9,18€	52,88
Licencia Office365	75,60€	15,88€	91,48
Licencia Matlab R2021a	800€	168€	968
Tiempo del Ingeniero mecánico	10.500€	2.205€	12.705
Costes indirectos	840€	0€	840
TOTAL	12.259,30	2.398,06	14.657,36

TABLA 13 - PRESUPUESTO FINAL

El presupuesto total del proyecto es de **CATORCE MIL SEISCIENTOS CINCUENTA Y SIETE EUROS CON TREINTA Y SEIS CÉNTIMOS.**

PLIEGO DE CONDICIONES

En este apartado del documento se describen los recursos y requisitos que se han cumplido para desarrollar el proyecto.

NORMATIVA

Durante la realización de este proyecto se han cumplido en todo momento las siguientes normas:

- Se han tenido en cuenta las bases establecidas en el Real Decreto 488/1997 de 14 de abril sobre disposiciones mínimas de seguridad y salud relativas al trabajo con equipos que incluyen pantallas de visualización.
- Disposiciones mínimas de salud y seguridad en los puestos de trabajo establecidas en el Real Decreto 486/1997, de 14 de abril.

Ambos decretos son regulados en base la Ley 31/1995, de 8 de noviembre, sobre prevención de Riesgos Laborales.

LICENCIAS

Los softwares empleados en el proyecto necesitan de una licencia para poder utilizarlos:

- Licencia Windows 10 (incluida con el ordenador).
- Licencia Matlab.
- Licencia Office 365.

CONOCIMIENTOS REQUERIDOS

Para realizar este proyecto se necesitan conocimientos básicos en los siguientes aspectos:

- Conocimiento a nivel de usuario de Matlab.
- Conocimientos en Office 365.
- Conocimientos sobre elementos finitos y sus aplicaciones.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] https://es.wikipedia.org/wiki/Historia_del_ferrocarril_en_Espa%C3%B1a
- [2] https://es.wikipedia.org/wiki/Renfe_AVE
- [3] https://es.wikipedia.org/wiki/Alta_velocidad_ferroviaria_en_Espa%C3%B1a
- [4] [https://es.wikipedia.org/wiki/Catenaria_\(ferrocarril\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Catenaria_(ferrocarril))
- [5] Jaime Gil Romero: SIMULACIÓN EFICIENTE DE LA INTERACCIÓN DINÁMICA PANTÓGRAFO-CATENARIA CON SECCIONAMIENTOS. 2019. TFG, Universidad Politécnica de Valencia.
- [6] Isabel María Varas Gálvez: análisis de tensiones en ménsulas ferroviaria. 2016. Trabajo fin de máster. Escuela Técnica Superior de Ingeniería I.C.A.I.
- [7] [http://descargas.adif.es/ade/u18/GCN/NormativaTecnica.nsf/v0/F2FFE077714E2C1EC12573AA003CDAB6/\\$FILE/ET%2003.364.018.6.pdf?OpenElement](http://descargas.adif.es/ade/u18/GCN/NormativaTecnica.nsf/v0/F2FFE077714E2C1EC12573AA003CDAB6/$FILE/ET%2003.364.018.6.pdf?OpenElement)
- [8] http://www.adif.es/es_ES/comunicacion_y_prensa/fichas_de_actualidad/ficha_actualidad_00070.shtml
- [9] https://www.seguridadferroviaria.es/recursos_aesf/96055A01-785C-49FF-B2D5-DB8E97A613B4/144031/018NAE107.pdf
- [10] Microsoft Word - MEMORIA - LAC-CA220 _2016 v0.3_ (seguridadferroviaria.es)
- [11] https://www.seguridadferroviaria.es/recursos_aesf/592CE715-7AC5-49DE-9088-4E9FBE22FC5F/144043/023CA220_2016.pdf
- [12] D. Héctor Mora Martínez: Modelado de la interacción dinámica pantógrafo-catenaria. 2011. Tesis de máster UPV.
- [13] Miquel Vendrell Pedrós: Modelado del desgaste del hilo de contacto en catenarias de alta velocidad.2020.TFG, Universidad Politécnica de Valencia.
- [14] M.Tur Valiente, L.Baeza González, F.J. Fuenmayor Fernández, E.García García: Modelo de elementos finitos para la simulación del sistema pantógrafo-catenaria UPV.
- [15] Cristina Beldad Rodríguez: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO DINÁMICO DE PANTÓGRAFO. 2019. TFG, Universitat Politècnica de València.
- [16] D.Héctor Mora Martínez: Modelado de la interacción dinámica pantógrafo-catenaria.2011. TFM. Universidad Politécnica de Valencia.

[17] Giuseppe Bucca, Andrea Collina: Electromechanical interaction between carbon-based pantograph strip and copper contact wire: A heuristic wear model – 2015, Department of Mechanical Engineering, Politecnico di Milano.

[18]<https://medium.com/@hdezfloresmiguelangel/m%C3%A9todo-de-newton-raphson-en-matlab-ef86f1972e4>

[19] S.Gregori, J.Gil, M.Tur, A.Pedrosa and F.J. Fuenmayor: Simulation of the contact wire wear evolution in high speed overhead contact lines.

[20]https://es.mathworks.com/help/matlab/getting-started-with-matlab.html?s_tid=CRUX_lftnav