



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

VALIDACIÓN DE UN CÓDIGO DE SIMULACIÓN DE LA INTERACCIÓN CATENARIA-PANTÓGRAFO FRENTE A LA NUEVA NORMA EN50318:2018

Autor: Alberto Garrosa Pascual

Directores: Alberto Carnicero López

Jesús Ramón Jiménez Octavio

Madrid

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
**VALIDACION DE UN CÓDIGO DE SIMULACIÓN DE LA INTERACCIÓN
CATENARIA-PANTÓGRAFO FRENTE A LA NUEVA NORMA EN50318:2018**

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2021/22 es de mi autoría, original e inédito y
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido
tomada de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: Alberto Garrosa Pascual

Fecha:30/8/2022

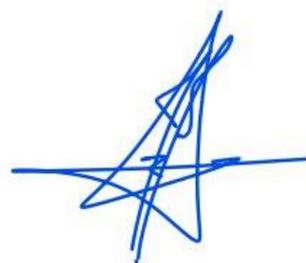
Autorizada la entrega del proyecto

LOS DIRECTORES DEL PROYECTO

Fdo.:


Alberto Carnicero López

Firmado digitalmente
por Alberto Carnicero
Nombre de
reconocimiento (DN):
cn=Alberto Carnicero,
o=Universidad Pontificia
Comillas, ou,
email=carnicero@comilla
s.edu, c=ES
Fecha: 2022.08.31
10:21:19 +02'00'



Jesús Ramón Jiménez Octavio

Fecha: 30/8/ 2022



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

VALIDACIÓN DE UN CÓDIGO DE SIMULACIÓN DE LA INTERACCIÓN CATENARIA-PANTÓGRAFO FRENTE A LA NUEVA NORMA EN50318:2018

Autor: Alberto Garrosa Pascual

Directores: Alberto Carnicero López

Jesús Ramón Jiménez Octavio

Madrid

VALIDACIÓN DE UN CÓDIGO DE SIMULACIÓN DE LA INTERACCIÓN CATENARIA-PANTÓGRAFO FRENTE A LA NUEVA NORMA EN50318:2018

Autor: Garrosa Pascual, Alberto

Directores: Alberto Carnicero López

Jesús Ramon Jiménez Octavio

Entidad Colaboradora: ICAI –Universidad Pontificia Comillas.

RESUMEN DEL PROYECTO

Este proyecto tiene como objetivo principal el desarrollo de un modelo para el cálculo de estructuras ferroviarias. Este programa podría ser de gran utilidad en la toma de decisiones para futuras estructuras.

Este proyecto se centra principalmente en las catenarias flexibles y que funcionan a altas velocidades (275 y 320 km/h). El sistema a estudiar parte de una serie de postes que se encuentran anclados al suelo y tienen forma de pórtico lo que permite sujetar un hilo sustentador y un hilo de contacto mediante un brazo de atirantado. El hilo sustentador tiene como objetivo principal mantener a altura constante el hilo de contacto mediante un sistema de pendolado y pretensado. Las catenarias suelen tener una geometría compleja, aunque en este caso la norma específica concretamente los requerimientos necesarios y no permite muchas variaciones.

Este proyecto parte de un programa ya realizado anteriormente. Se tomarán algunas partes del trabajo anteriormente realizado para poder obtener un nuevo programa que cumpla futuros objetivos.

Cada día se utiliza mas el tren como medio de transporte tanto en largas como en cortas distancias por lo que queda claro que la mejora de las infraestructuras ferroviarias es un punto importante a tratar. La salida de la nueva norma europea UNE 50318:2018 [6] ha sido el motor principal de este proyecto.

Se trata de un proyecto, cuyo objetivo principal es modificar los parámetros que un programa realizado mediante el software de Matlab pone a su disposición, de modo que sea capaz de pasar la normativa actual UNE50318:2018 [6]. Este programa, sí pasaba la norma anterior que data del año 2002 [7], sin embargo, no cumple con la normativa actualmente vigente. El objetivo principal es modificar el programa para que cumpla con todos los requisitos que la norma actual pide.

Los parámetros principales que pide la normativa son la fuerza media de contacto entre pantógrafo y hilo de contacto, fuerzas máximas y mínimas, desviación típica con un filtro entre 0 y 5 Hz y entre 5 y 20 Hz. A su vez también pide el desplazamiento máximo del hilo de contacto cuando el pantógrafo pasa por dicho punto. Finalmente, la normativa también exige ver el desplazamiento del poste al paso del tren cuya función es sujetar el hilo de contacto. Del mismo modo, la normativa también incluye unos parámetros estrictos para el pantógrafo (masa, muelle y émbolo) que es un elemento muy importante a estudiar en este proyecto. Además del pantógrafo, las dimensiones y características físicas de la catenaria también vienen reguladas en la norma.

La norma exige calcular los parámetros establecidos en 10 o más vanos. Es por ello que todas las simulaciones se realizarán con un mínimo de 10 vanos. El programa del que se parte calcula una catenaria estática sin ninguna carga, y a continuación se les somete una fuerza virtual que simula el paso de un pantógrafo (una malla móvil) por los vanos. Este programa permite simular con bastante precisión las fuerzas de contacto entre el frotador (parte superior del pantógrafo) y el hilo de contacto. Los desplazamientos de la catenaria también quedarán registrados en el sistema para evaluarlos posteriormente. En las siguientes figuras se representan la catenaria estática sin ninguna fuerza y a continuación una figura con la catenaria desplazada ligeramente al paso del pantógrafo.

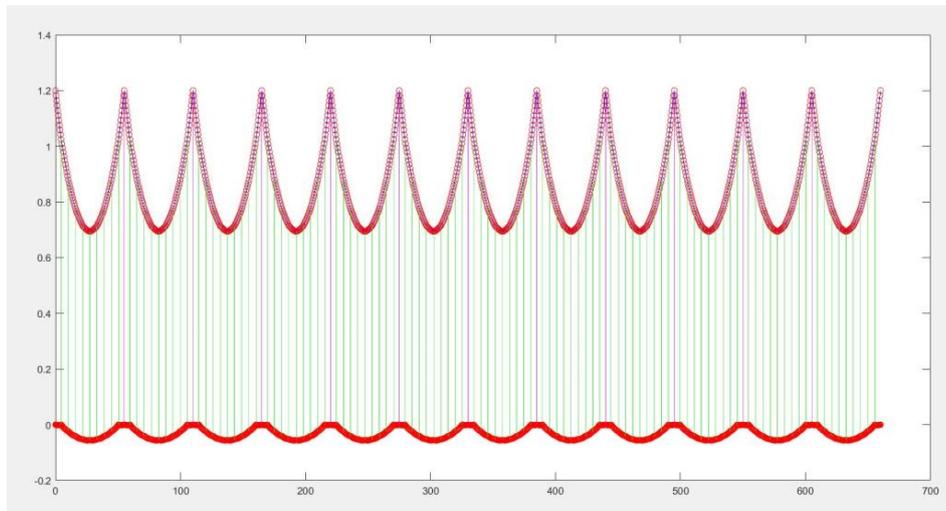


Figura 1 Catenaria estática

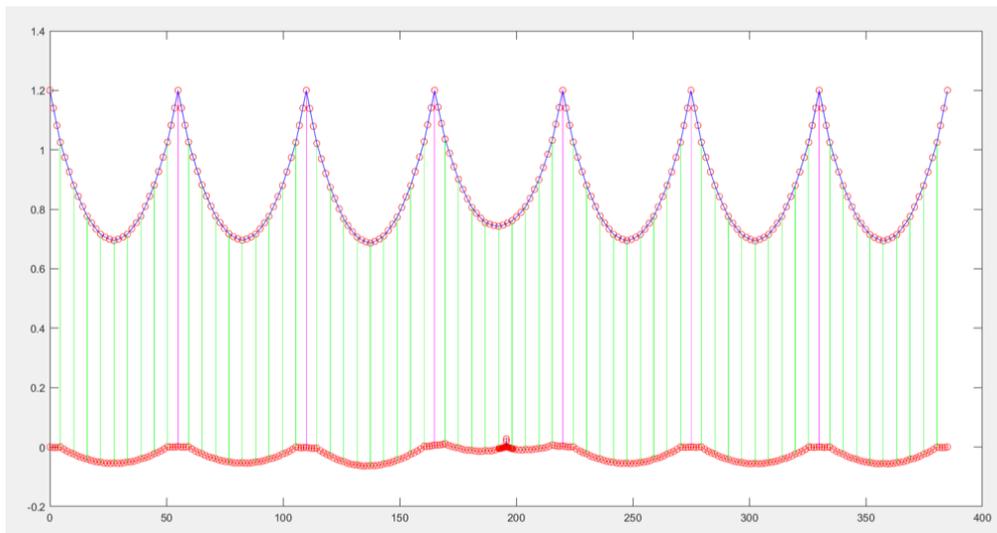


Figura 2 Catenaria bajo carga

La norma pide adicionalmente el desplazamiento vertical de los postes (uplift) que se encargan de sujetar el hilo de contacto y el hilo sustentador cuando pasa el pantógrafo por ellos. Estos resultados quedarán también guardados en el sistema para analizarlos después.

Para el cálculo de todos estos parámetros se ha creado un programa que se basa en el método de elementos finitos y que permite obtener resultados bastante fiables de la interacción dinámica entre catenaria y pantógrafo. Se propondrá y se analizará el método numérico de

integración temporal para la simulación. Uno de los parámetros más importantes a tocar para conseguir pasar la normativa es el amortiguamiento del método numérico, el número de elementos entre péndolas (particiones ficticias del hilo de contacto y hilo sustentador), los filtros utilizados para las fuerzas de contacto y la distribución del número de puntos simulados que conforman la malla móvil (pantógrafo), ya puede ser exponencial, logarítmica, lineal...

Como se detallará más adelante en el trabajo, se tomarán en cuenta distintos valores de los parámetros disponibles para conseguir entrar dentro de los rangos admitidos. Se partirá cambiando el radio espectral en un intervalo de 0.5 a 1, una vez elegido el radio espectral óptimo, se comenzará a variar el número de elementos entre péndolas para conseguir más precisión, unos resultados más fiables y que mejoren los resultados obtenidos. Una vez realizados estos ensayos, se procederá a cambiar la distribución de los puntos de la malla móvil a su paso por el hilo de contacto. Se espera cumplir con la normativa en el mayor número de intervalos posibles.

En el caso del número de elementos entre péndolas se partirá de tres en el hilo sustentador y de cuatro en el hilo de contacto. A partir ahí se irá incrementando poco a poco el número hasta obtener la mejor relación entre precisión y cumplir con los objetivos.

En la malla móvil se tomará una concentración de 3 y un remallado máximo de 3, estas variables del programa serán las últimas en optimizar porque son las que menos influyen en los resultados.

Para el modelo a 275 km/h se obtuvieron los mejores resultados con un radio espectral de 0,5, 12 elementos en el hilo de contacto, 10 en el hilo sustentador, un remallado máximo de 2 y una concentración de 5. El problema principal de este ensayo residía en las desviaciones típicas que gracias a las variables del programa se consiguieron reducir. Finalmente, este modelo es capaz de verificar todos los parámetros que la norma exige excepto la desviación típica de la fuerza en el intervalo de 0 a 20 Hz y el rango de movimiento vertical del hilo que ha quedado bastante alejado del rango permitido en todo momento. Se ha especulado que la causa del amplio movimiento del hilo se debe a la baja inercia de la catenaria y a su ligereza. El mínimo amortiguamiento estudiado y el máximo número de elementos de la catenaria,

así como la máxima concentración de los elementos de la malla móvil respecto al punto han sido los motivos principales que han permitido disminuir todo lo posible las desviaciones típicas de la fuerza aplicada.

En cuanto al modelo ensayado a 320 km/h todos los ensayos variando el radio espectral eran capaces de verificar todos los parámetros de la normativa salvo el movimiento vertical del hilo que una vez más justificaba la baja inercia de la catenaria y su ligereza. Se realizaron ensayos cambiando el número de elementos del hilo de contacto y se consiguió disminuir el movimiento vertical del hilo, aunque si las particiones de los hilos eran muy grandes la fuerza mínima se salía del rango permitido. Los cambios en la malla móvil también fueron capaces de disminuir ligeramente el movimiento vertical del hilo, aunque quedaba lejos de los resultados que se esperaba por la normativa.

Finalmente se concluye que el método empleado en este trabajo no es capaz de cumplir con la normativa EN50318:2018 [6] a pesar de haber utilizado todas las herramientas que el programa pone a su disposición.

VALIDATION OF A PROGRAM FOR SIMULATION OF THE INTERACTION CATENARY-PANTOGRAPH FOR THE NEW NORM EN50318:2018

This objective of this project is the development of a model for the calculation of the railway structures. This software will be very useful for the decision making in futures structures.

This project will be mainly focused in flexible catenaries that works in high speed (275 and 320km/h). The system to work with starts with a post anchored to the floor in porticoed structures that allows to hold a supporter thread and a contact thread using a registration arm.

The supporter thread has a main objective to keep in a constant height the contact thread using a pendulum and prestressed system. The catenaries usually have a complex geometry but in this case the norm determines the concrete requirements and doesn't allow many changes.

This project is based in a software previously developed, in the way that some parts of the software previously done will be used to co-create a new version that allows to achieve new objectives.

The use of train as way of transport is growing, so much in short and in long distances, therefore the railway infrastructures improvement is an important goal to improve. The publication of the new European norm UNE 50318:2018 [6] has been the main trigger of this work.

This is certain a project with a main target of improvement the previous software done under the Matlab program, in the way that the new version software will successfully pass the rules check of the new UNE50318:2018 [6] regulation. This software complied with the previous rules published in 2002 but not with the new existing rules. The goal of this project is to modify the previous work to comply with the current regulation.

The main parameters required by the law are the average contact force between the pantograph and the contact thread, maximum and minimum force, standard deviation with a filter between 0 and 5Hz and 5 and 20Hz.

At the same time the system requires the maximum displacement of the contact wire when the pantograph go through that point. Finally, the norm requires to analyse the post displacement when train pass, knowing that the post function is to hold the contact wire. In the same way the regulation also includes strict parameters for the pantograph (mass, spring piston) which are an important element to study this project. In addition, then the pantograph the dimensions and catenary physic characteristics are also regulated in the mandatory guidelines.

The statutory regulation requires the calculation of the defined parameters in 10 or more spans. For this reason, all the simulations will be performed with a minimum of 10 spans. The starting program calculates a static catenary without any charge, and later tests the system applying a virtual force that simulate the pantograph pass (mobile mesh) in the spans. This software allows simulate in a very accurate way the contact pulls between the friction (superior part of the pantograph) and the contact thread. The catenary displacements will be also registered in the system to be evaluated afterwards. In the following pictures are represented the static catenary without any force and down below a figure with a slightly displaced catenary when the pantograph pass.

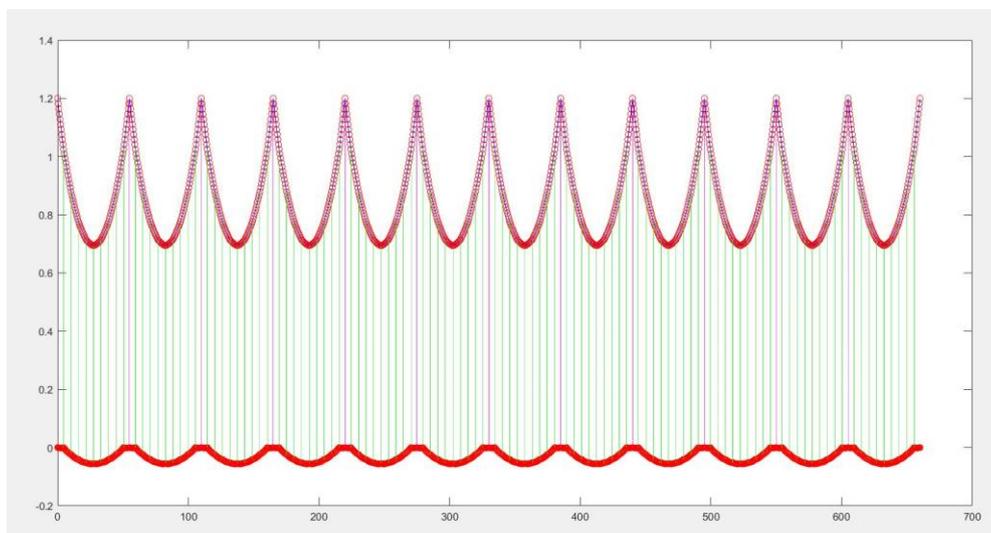


Figure 3 Static Catenary

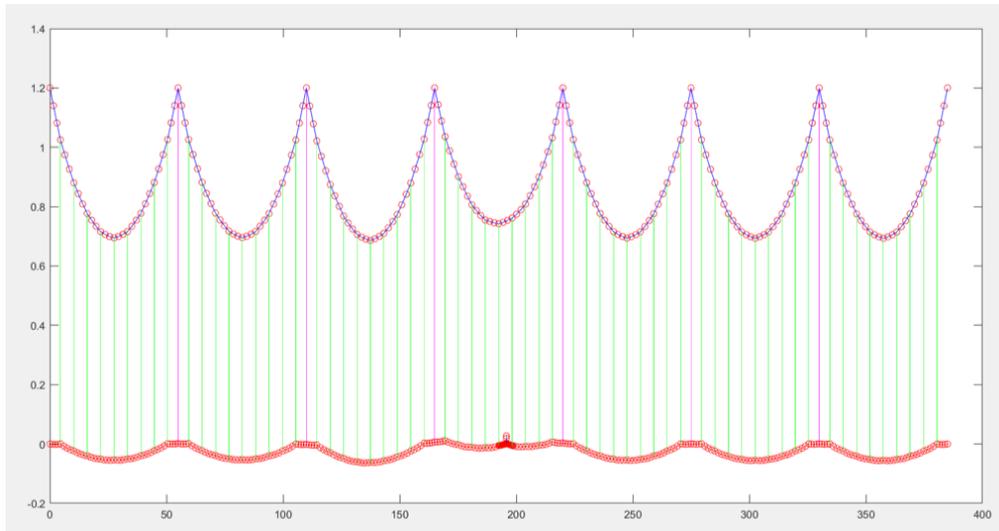


Figure 10 Under Load Catenary

The norm additionally asks for a vertical displacement of the post (uplift) that hold the contact wire and messenger wire when pantograph moves along them. That results will be also registered to be analysed later.

For the calculation of those two parameters the program has been fixed based on the finite element that allows to get very reliable results on the dynamic interaction between catenary and pantograph. The numeric method for the temporal integration and simulation will be proposed and analysed. To comply with the new norms one of the parameters to be modified is the numeric method damping, the number of elements between droppers (fictional holder wire partitions and messenger wire) filter used for the contact forces and the distribution of the number of simulated points that constitute the mobile mesh, that could be exponential, logarithm, lineal ...

As will be late detailed in the work, we will take different values of the available parameters to get into the permitted value rangers. The work will stat changing the spectral radio in an interval of 0,5 to 1, once chosen the optimal spectral ratio, the number of the elements between droppers will be changed with the objective to achieve more precision, more

reliable data that improve the obtained results. Once these trials will be performed, the points in the mesh will be modified when the movement with the contact wire, expecting to comply with the norm in the greater number of possible intervals.

In the case of number of elements between droppers the work will start dividing in three the messenger wire and in four parts the contact wire, and from that moment the number will be slowly increased until having the best relation between accuracy and goal achievement.

In the mobile mesh a concentration of 3 and maximum re-meshed of 3 will be taken, these variables of the software will be the last in optimizing because are the last with less influence in the results.

The best results were reached for the model at 275 km/h with a spectral ratio of 0,5 , 12 elements in the contact thread, 10 in the holder thread, maximum re-meshed of 2 and concentration of 5. The main problem of this trial was the standard deviation that were reduced by using the software variables.

Finally, this model is able to verify all the parameters required except the standard deviation of the force in the interval from 0 to 20 Hz and the range of the thread vertical movement, which remains far from the permitted range in all the moments.

It has been speculated that the cause of the high movements of the wire is due to the low inertia and lightweight.

The minimum studied damping and the maximum number of catenary elements, as well as the maximum concentration of the elements in the mobile mesh in reference to the point, has been the main reasons to decrease as much as possible the standard deviation of the applied force.

In reference to the trial at 320Km/h all the test varying the spectral ratio were able to verify all the parameters of the regulation except for the wire vertical movement, that once more justified the low inertia of the catenary and its lightness.

Different tests were performed changing the number of the elements in the contact thread and the vertical movement of the wire was reduced but if the divisions of the of the wire were big the minimum force was out of the permitted range. The changes in the mobile mesh were able to slightly decrease the vertical movement of the wire but far from the results expected in the norm.

Finally, we conclude that the method used in this work cannot fulfill with the norm EN50318:2018 [6] even knowing that all the available tools from the software have been used

Índice de la memoria

Capítulo 1. Introducción	2
1.1 Motivación	3
1.2 Objetivos	4
1.3 Recursos	5
1.4 Elementos de catenaria	6
1.4.1 Ménsulas.....	6
1.4.2 Disposición de ménsulas	8
1.4.3 Disposición de catenarias	10
1.4.4 Pantógrafo.....	11
Capítulo 2. ODS.....	13
Capítulo 3. Estado del arte	14
3.1 Comparación normativas.....	14
Capítulo 4. Descripción del modelo de cálculo	18
4.1 Cálculo de la catenaria	18
4.2 Método de integración temporal.....	19
4.3 Familia beta-Newmark	20
4.4 Método alfa-generalizado	22
4.5 Postproceso.....	23
Capítulo 5. Análisis de sensibilidad	26
5.1 Variación del radio espectral	27
5.2 Variación del número de elementos	29
5.3 Variación de la malla móvil	32
Capítulo 6. Análisis de Resultados.....	35
6.1 Resultados modelo a 275 Km/h.....	35
6.2 Resultados modelo a 320 Km/h.....	40
Capítulo 7. Conclusiones.....	43
Capítulo 8. Bibliografía.....	45

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

El primer tren data del año 1804, el cual funcionaba con una locomotora de vapor y era capaz de circular a 8km/h. Este gran descubrimiento permitió el transporte de un gran número de mercancías y de personas en grandes distancias. Sin embargo, el tren eléctrico no surgió hasta 1879, que fue diseñado por un alemán. Consistía en un pequeño tractor alimentado con corriente continua a 150V. Dos años después fue capaz de diseñar un tren con tracción eléctrica mediante líneas aéreas cargadas eléctricamente. Similar a los que se usan en la actualidad. Este tren eléctrico supuso un gran avance en el área del electromagnetismo y provocó unos grandes avances.

Poco a poco se fue avanzando mas y más en el desarrollo de la red eléctrica lo que desembocó en el tren de alta velocidad que en 1981 logró hacer un trayecto Paris – Lyon en tan solo 2 horas.

A partir de entonces se ha buscado la optimización de la red ferroviaria. El principal objetivo era hacer los trayectos a la mayor velocidad posible de este modo podrían hacer frente a los demás medios de transporte de media distancia. Para satisfacer esta necesidad se diseñó el mecanismo catenaria- pantógrafo.

El pantógrafo es un elemento fundamental del tren ya que se debe asegurar que no pierde el contacto con el hilo, que transmite la fuerza necesaria al hilo y a su vez recibe la energía eléctrica para mover el motor. Este contacto constante entre hilo y pantógrafo se obtiene mediante una fuerza inicial que permite estar en contacto siempre.

Este mecanismo se basa en un cable cargado y pretensado sujetado por la catenaria que roza con el frotador. Este frotador forma parte del pantógrafo y va unido al tren. El frotador es capaz de crear una diferencia de potencial la cual alimenta el motor eléctrico del tren en cuestión. El pantógrafo a su vez está diseñado de manera que la fuerza de contacto entre el hilo y el frotador sea constante y mínima. Ante este objetivo se plantean distintos problemas como la flecha del cable en cada punto, o el hielo a primeras horas de la mañana que

dificultan el contacto y además aumentan el desgaste de los frotadores. Estos frotadores son el elemento mas importante del pantógrafo y suelen estar hechos de cobre o grafito.

El pantógrafo es un elemento fundamental del tren ya que se debe asegurar que no pierde el contacto con el hilo que transmite la fuerza necesaria al hilo y a su vez recibe la energía eléctrica para mover el motor. Este contacto constante entre hilo y pantógrafo se obtiene mediante una fuerza inicial que permite estar en contacto siempre.

La pérdida de contacto entre ambos genera arcos eléctricos, que provocan el desgaste prematuro de ambos sistemas, así como alimentación discontinua de los motores de tracción eléctrica.

El objetivo principal es mantener el contacto y que el desgaste sea mínimo. El problema mas importante reside en que el desgaste no debe ser muy alto y que el deslizamiento entre frotador hilo se produce a gran velocidad. Vista la gran utilidad de la red ferroviaria, y la interacción dinámica de hilo y pantógrafo uno de las mayores limitantes, se han realizado múltiples estudios para optimizar este problema y así sacar el máximo partido a este gran medio de transporte como es el tren.

Muchos de estos estudios se han hecho desde otro punto de vista o con otros tipos de software con el objetivo de hacer el estudio desde otro enfoque. Otras de las limitaciones de una catenaria es la deformación que sufren y los materiales a emplear, así como las estructuras que se encargan de sostener los hilos y péndolas. Esta parte se centra mucho en los esfuerzos que sufren los postes y los cables, además de los de los grados de libertad del pantógrafo, es decir, muelles, amortiguamientos y barras que lo conforman. Los elementos de la catenaria también se fatigan, aunque no se suele tener en cuenta porque los problemas por fatiga no suelen aparecer.

1.1 MOTIVACIÓN

Se ha demostrado que uno de los aspectos a mejorar en la red ferroviaria es la velocidad a la que se desplaza el tren. Por eso hay que intentar optimizar al máximo los parámetros de la catenaria para que el tren funcione a velocidades más altas y seguir sacando el máximo

partido a este medio de transporte. El tren se podría dotar de más energía para que su velocidad fuese mayor, sin embargo, no es viable porque no se cumpliría con las medidas de seguridad necesarias.

Dada esta situación se han intentado optimizar los componentes de la catenaria y el pantógrafo para obtener el máximo rendimiento y así aumentar las velocidades del tren en cuestión.

Este dato se ejemplifica con las dos normas que se van a discutir en el proyecto, la antigua norma incluye velocidades de 250 y 300 km/h mientras que la nueva incluye verificaciones a 275 km/h y 320 km/h. Es un parámetro de vital importancia.

Una de las motivaciones principales de este trabajo ha sido la salida de la nueva normativa EN50318:2018[6]. Esta normativa permite la regulación de la red ferroviaria europea a altas velocidades. El cumplimiento de esta nueva normativa supondría un gran avance para futuros objetivos además de aumentar la velocidad de los trenes para la mejora de su funcionamiento y optimización.

1.2 OBJETIVOS

Como objetivo principal se propone modificar un software que simula la interacción dinámica entre catenaria y pantógrafo para cumplir con la nueva normativa EN50318:2018[6]. Este programa llamado *Candy*, recoge la fuerza media de contacto entre hilo de contacto y el pantógrafo, la velocidad de movimiento del hilo de contacto tras el paso del pantógrafo, los desplazamientos y el movimiento vertical de los postes que sostienen la catenaria (uplift).

Estos parámetros anteriormente mencionados serán suficientes para discutir el cumplimiento de la normativa vigente.

También, se modificarán las variables que el programa *Candy* permite cambiar como son el amortiguamiento que el programa utiliza para obtener la fuerza de contacto, el número de puntos que simulan los hilos de contacto y sustentador y la distribución de los puntos de la malla móvil (pantógrafo). Se modificarán para acercarse lo máximo en la medida de lo posible al rango permitido por la norma.

La nueva normativa incluye 8 parámetros a validar como son la fuerza media de contacto entre hilo y pantógrafo o el rango de movimiento vertical del hilo de contacto entre otros. En los capítulos posteriores se explicará con mas detalle las verificaciones e intervalos que la normativa obliga a cumplir. La normativa incluye verificaciones para 2 disposiciones de catenarias, modelo simple y modelo con falso sustentador. La normativa incluye verificaciones para un modelo con un solo pantógrafo o con 2. Y finalmente para 2 velocidades, 275 km/h y 320 km/h. En total la norma incluye 8 modelos a verificar combinando todas las modificaciones posibles. En este trabajo se estudiará el modelo de catenaria simple con un solo pantógrafo a las velocidades de 275 y de 320 km/h.

1.3 RECURSOS

Hace unos años Alberto Carnicero López diseñó un programa que permitía ver las interacciones de la malla del pantógrafo (frotador) con el cable de la catenaria. El programa se hizo en software Matlab.

El programa *Candy* anteriormente mencionado es el que simula la interacción dinámica del pantógrafo con la catenaria. Este programa se respalda en otro llamado *Calesca* el cual es el encargado de calcular los puntos de la catenaria cuando no está sometida a ninguna carga, es decir, estática. A partir de los puntos que *Calesca* ha calculado, *Candy* simula el paso del pantógrafo a lo largo de la catenaria con lo que se obtienen los parámetros necesarios para la validación de la norma.

El programa *Candy* se basa en el método de elementos finitos para el cálculo de fuerzas de contacto y desplazamientos ya sea del hilo de contacto o de las ménsulas. Además, se pueden

incluir los puntos que se quiera entre vanos para que sea más o menos preciso y se podrá variar la frecuencia de muestreo. También incluye la simulación de cambio de altura de cable y su respectivo cambio en la oscilación con frotador. Para este programa, la norma exige un intervalo de muestreo de 0,025 segundos y así se hará para todas las simulaciones.

Este programa de interacción dinámica logró cumplir con la normativa española del momento (EN 50318:2002) [7] que data del año 2002. En el año 2018 se realizaron algunos cambios en la normativa. El programa que en el año 2002 si era capaz de cumplir la antigua normativa no era capaz de cubrir la nueva norma EN 50318:2018.

El objetivo radica en verificar la normativa con el alcance que este programa al completo pone a su disposición.

1.4 ELEMENTOS DE CATENARIA

En la siguiente sección se procederá a explicar en grandes rasgos los elementos que componen una catenaria y elementos auxiliares que permiten el correcto funcionamiento de la misma para una mejor comprensión de las secciones posteriores. Además, en algunos casos se incluirán detalladamente los modelos que la norma incluye y permitirá entender mejor el objetivo de este trabajo.

1.4.1 MÉNSULAS

En las siguientes figuras se van a introducir los nombres que se les atribuyen a los elementos que conforman las ménsulas. Cabe destacar la función del hilo sustentador, se encarga de mantener a una altura constante el hilo de contacto mediante las péndolas. Las péndolas son cables que trabajan a tracción y se encargan de tirar verticalmente del hilo de contacto para que no caiga demasiado. Las péndolas están amarradas en la parte superior al hilo sustentador y en su parte inferior al hilo de contacto. A su vez el poste que está anclado al

suelo con forma de pórtico se encarga de sostener los hilos anteriormente mencionados mediante un sistema de ménsulas, el cual además está aislado eléctricamente del suelo.

Existen dos modelos claramente diferenciados de ménsulas. Uno es la ménsula “tubular” en la que el brazo atrantado se compone de 2 barras huecas que sostienen el hilo de contacto. El otro modelo es la ménsula “en celosía” tiene forma de pórtico y sostiene directamente el hilo de contacto con dos barras igual que el anterior, pero desde la parte interna de la vía. Además, el pórtico sostiene el hilo sustentador y lo aísla eléctricamente. En las siguientes figuras se representan gráficamente las ménsulas disponibles por la norma.

Las ménsulas que sostienen el hilo de contacto pueden adoptar distintas disposiciones de modo que puede ser un sistema push-off, pull-on o tube steady arm siempre que sea un sistema de soportes. A su vez estas ménsulas pueden estar constituidas de tubos (ménsula tubular) o una ménsula constituida por perfiles laminados en “L” (ménsula en celosía). Esta diferencia surge en la sección transversal de las barras que conforman la ménsula.

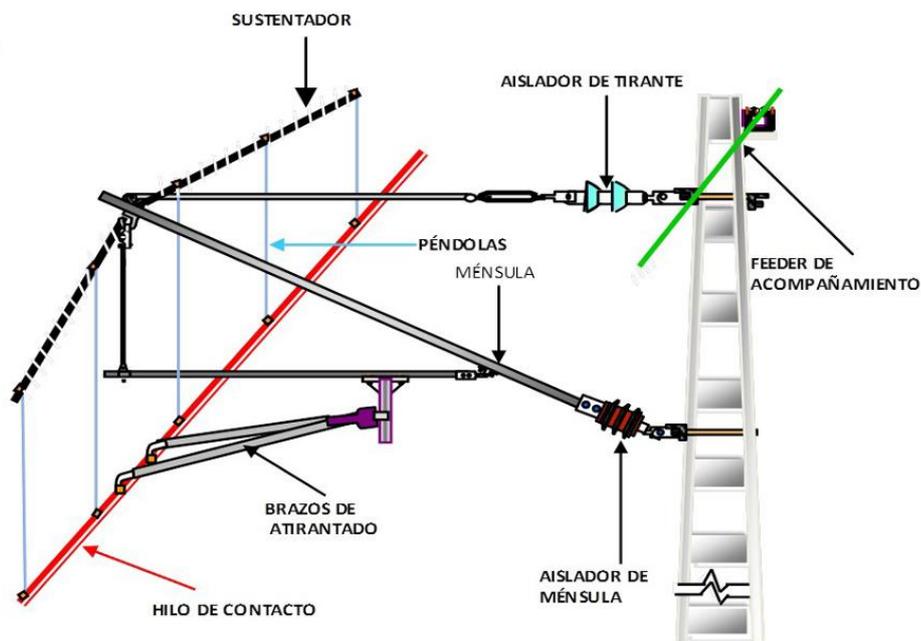


Figura 4 Ménsula tubular [5]

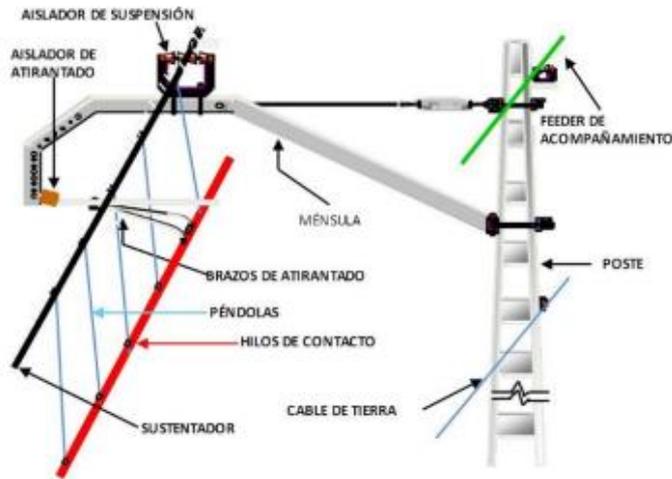


Figura 5 Ménsula en celosía [5]

1.4.2 DISPOSICIÓN DE MÉNSULAS

En cuanto al sistema pull-off como se aprecia en la figura 3, es un sistema en el que el brazo atirantado sufre una fuerza horizontal en la dirección contraria al poste que sostiene la catenaria. Mediante esta fuerza el hilo de contacto permite mantener su altura con respecto al suelo lo mas constante posible. De ahí el nombre que se le atribuye a este sistema de sostén, que tira del hilo de contacto hacia el poste.

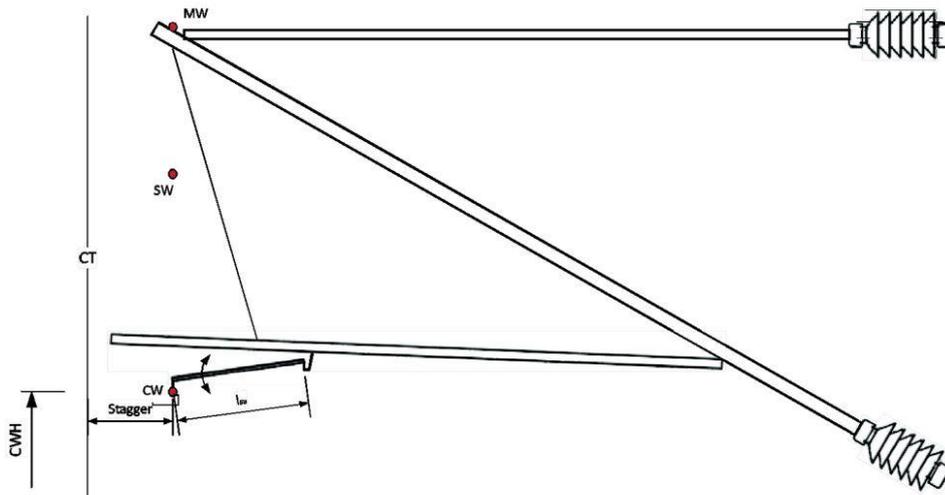


Figura 6 Ménsula tipo pull-off [6]

Sin embargo, el sistema push-off, se asemeja el sistema pull-off, pero en vez de tirar del hilo de contacto se encarga de acercarlo al poste que sostiene la catenaria. Este método se puede ver en la figura 4 adjunta.

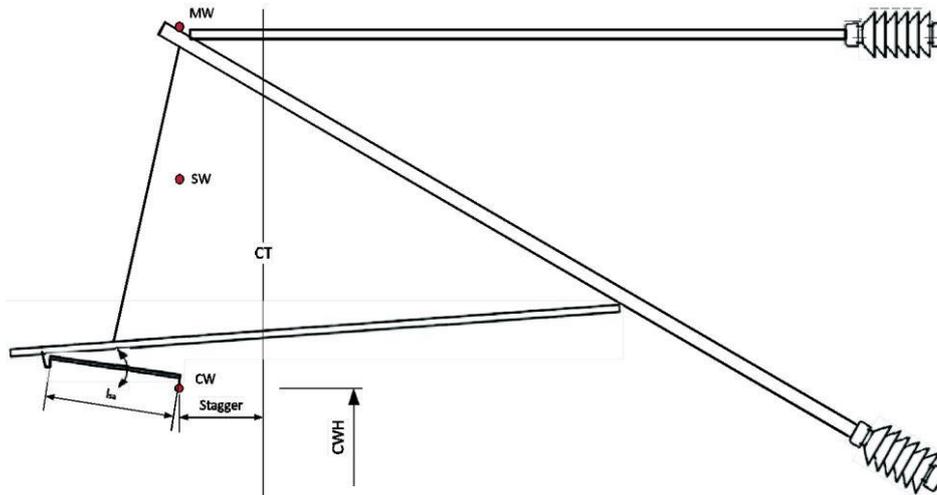


Figura 7 Ménsula tipo push-off [6]

Finalmente se introduce el sistema tube steady arm, (figura 5), el cual se caracteriza por llevar una barra diagonal que se encarga de tirar diagonalmente de la barra de ménsula.

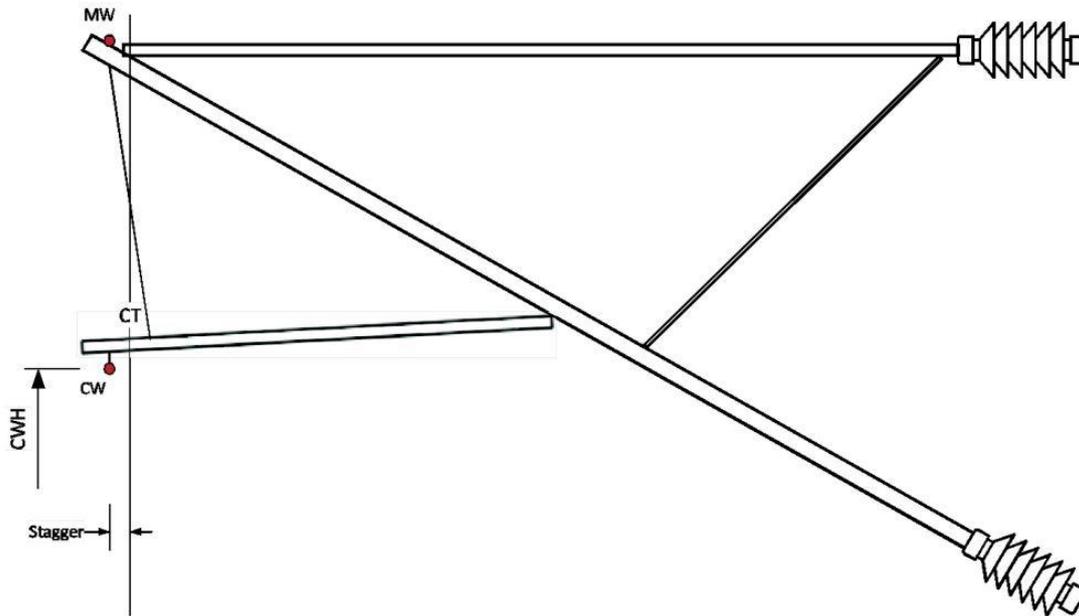


Figura 8 Ménsula tipo tube steady arm [6]

1.4.3 DISPOSICIÓN DE CATENARIAS

En cuanto a la catenaria de una red ferroviaria se distinguen 2 disposiciones fundamentales. La primera es el sistema más básico, consta de 2 cables uno de ellos es el hilo de contacto y otro que está una cierta altura por encima cuyo nombre es hilo sustentador. Este hilo sustentador es el encargado de tirar verticalmente del hilo de contacto mediante un sistema de pendolado lo que provoca que la flecha del hilo de contacto sea mínima. Además, en las siguientes imágenes se incluyen los elementos más característicos de una catenaria como puede ser un vano, (distancia entre 2 postes), o el hilo de contacto, que es el encargado de alimentar eléctricamente al motor del tren en cuestión.

La principal diferencia entre ambas catenarias es un hilo que tira horizontalmente de las péndolas mas cercanas al poste. A la altura que los hilos de contacto y sustentador pasan por el poste hay otro hilo horizontal que se encarga de mantener la tensión de las péndolas contiguas. Esta catenaria lo que consigue es que el paso por el poste no afecte tanto al cambio

de altura del hilo y sea más progresivo. Este segundo tipo de catenaria incluye un falso sustentador que es el nombre que recibe el hilo que tira de las péndolas contiguas a los postes.

En las figuras adjuntas se pueden apreciar las diferencias mas significativas de las catenarias que la norma trata.



Figura 9 Catenaria simple [3]

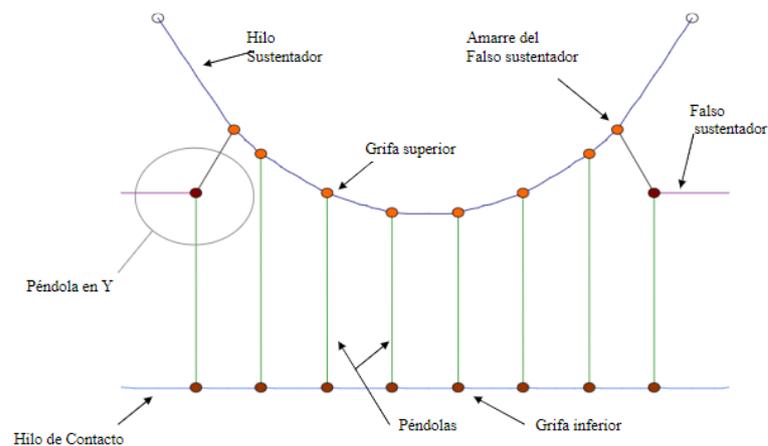


Figura 10 Catenaria con falso sustentador [9]

1.4.4 PANTÓGRAFO

El pantógrafo es el elemento que va conectado al techo del tren y se encarga de recibir la tensión eléctrica necesaria del hilo de contacto para alimentar el motor. Además, por lo general se simula como un sistema de 3 grados de libertad en el que se incluyen 3 rigideces

3 amortiguamientos y 3 masas. Representando este sistema masa, muelle, embolo 3 veces consecutivas en serie. Dependiendo de la normativa y del modelo de funcionamiento (AC o DC) los valores de masas, rigidez y amortiguamiento son diferentes. Este pantógrafo suele tener una fuerza de precarga para minimizar pérdidas de contacto entre el frotador y el hilo. El pantógrafo va a oscilar verticalmente para conseguir transmitir en todo momento la tensión eléctrica al motor del tren, aquí radica la gran dificultad del trabajo porque además la norma no permite pérdidas de contacto. Las fuerzas de contacto entre pantógrafo y catenaria son las que se van a estudiar en este trabajo fin de grado.

Como se puede apreciar en la figura 8 son principalmente barras con forma de semirombo que sujetan el frotador y tienen el objetivo principal de mantener el contacto en todo momento.

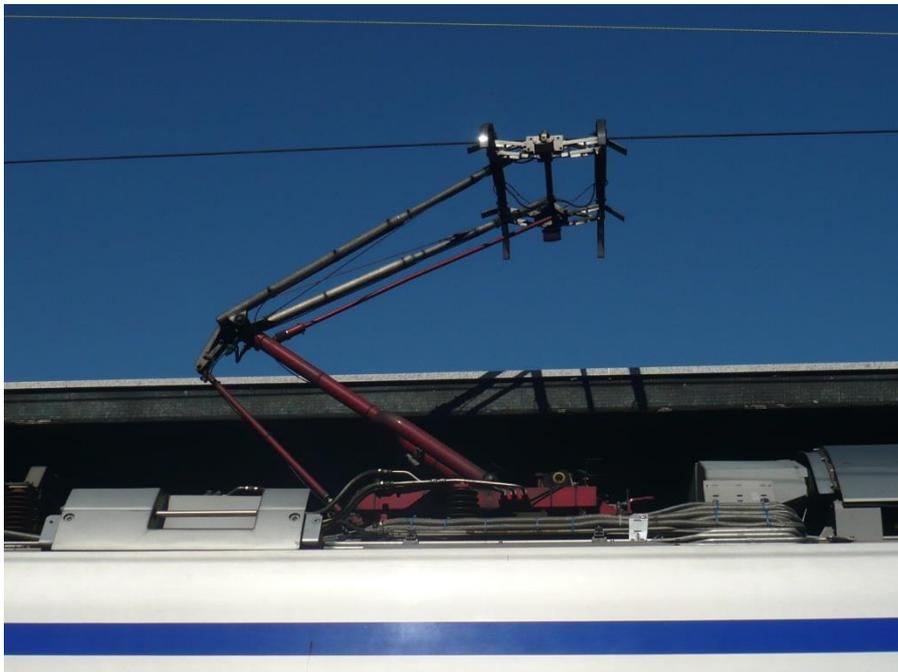


Figura 11 Pantógrafo

Capítulo 2. ODS

Este proyecto se alinea con el objetivo de desarrollo sostenible que tiene que ver con la energía asequible y no contaminante (ODS 7). El tren sobre el que vamos a trabajar funciona con un motor eléctrico. Por lo que no emite CO₂ y no contamina el medio ambiente. Además, podremos aumentar el rendimiento del tren consumiendo menos energía, lo que favorece al decremento del uso de otros transportes más contaminantes en la media y larga distancia como los aviones o autobuses.

Además, se apoya en las energías renovables, que están en auge ahora mismo ya que la gasolina está subiendo mucho de precio y se podría anteponer con facilidad a otro medio de transporte. A su vez este proyecto también está relacionado con el trabajo decente y crecimiento económico (ODS 8). Esta mejora en los trenes pretende crear a su vez mas puestos de trabajo dado que al haber introducido mejoras incluye más complejidad en el proyecto. Todo esto requiere unos controles más rigurosos por lo que fomenta el trabajo y el crecimiento económico de la sociedad.

También favorece enormemente a la industria, innovación e infraestructuras (ODS 9). Sin duda este es el objetivo con el que más se alinea. Las infraestructuras son un punto fundamental en el desarrollo económico del mundo actual. Este proyecto contribuye a la mejora de las infraestructuras impulsando por tanto la economía a la vez que lo hace de una manera sostenible. La mejora de la catenaria es fundamental si queremos progresar en el mundo ferroviario. Por eso este trabajo va a buscar la máxima mejora de la infraestructura ferroviaria. Finalmente, también se alinea con la acción por el clima (ODS 13).

El hecho de que sea un tren eléctrico favorece al cuidado del ecosistema. Este tren no desprende CO₂ que pueda contaminar. Como se ha comentado anteriormente el tren favorece al uso de las energías renovables lo que contribuye a dejar de usar combustibles fósiles que son mucho más contaminantes.

Capítulo 3. ESTADO DEL ARTE

La interacción catenaria pantógrafo ha tomado un papel muy importante en los últimos años en los que se ha evolucionado enormemente. Esto se debe entre otros motivos al avance de la tecnología lo que nos ha permitido apreciar distintas mejoras de este sistema. Se han diseñado distintos sistemas de cálculo de la interacción dinámica pero la que se va a usar en este proyecto será la interacción a partir de elementos finitos.

El sistema planteado en este trabajo fin de grado consta principalmente de una catenaria y un pantógrafo (el cual se simula mediante un sistema de mallado simulado por el programa por el método de elementos finitos que analiza la interacción entre esta malla del pantógrafo y el hilo de contacto).

3.1 COMPARACIÓN NORMATIVAS

A continuación, se realizará una comparación entre la normativa anterior EN50318:2002 [7] y la normativa vigente EN50318:2018 [6], que es la que se está tratando de verificar en este proyecto. La principal diferencia que se va a tratar es el rango de parámetros en los que debe estar funcionando la catenaria y el pantógrafo. Otra diferencia existe en que la anterior normativa solo incluía un tipo de catenaria, la simple sin falo sustentador, mientras que la nueva incluye un nuevo tipo de catenaria con falso sustentador. Además, la antigua normativa incluía velocidades de 250 y 300 km/h mientras que la nueva normativa exige cumplir los parámetros a unas velocidades de 275 y 320 km/h.

En cuanto a las características de la catenaria el modelo simple que ambas normas incluyen, tienen los mismos parámetros salvando algunas dimensiones características de cada normativa. Cabe destacar la diferencia entre la distancia entre postes (vano) que la antigua normativa incluía una dimensión de 60 m mientras que la nueva incluye una distancia de 55 m. En cuanto al número de péndolas un vano, ambas normas normativas incluyen 9 péndolas

sin embargo como la primera normativa incluía una distancia mayor de vano, la distancia entre péndolas en la nueva normativa es menor que en la precedente. Además, la nueva normativa incluye una contraflecha. Otra de las diferencias destacables es que la nueva normativa incluye algunos parámetros más concretos de las péndolas que se encargan de sujetar el hilo de contacto como puede ser deformación por Newton, la longitud de cada péndola o el amortiguamiento ficticio de cada péndola al ser deformada.

También, en el modelo con falso sustentador (stitched), la nueva normativa restringe todos los parámetros posibles como es la distancia entre péndolas, la longitud del falso sustentador y todas las restricciones anteriormente mencionadas en el modelo simple para las péndolas. Todas las dimensiones y características se pueden consultar en la normativa UNE-EN50318:2018 [6].

Otra de las diferencias características entre ambas normativas es que la nueva también restringe los parámetros cuando se da un tren con dos pantógrafos.

La nueva normativa incluye adicionalmente las masas de cada una de las grifas que sostienen las péndolas y permiten su correcto funcionamiento.

Finalmente cabe destacar la distinción que hay entre los pantógrafos que requiere la norma EN50318:2002 [7] y la nueva EN50318:2018[6]. La principal diferencia aparte de los valores predeterminados es que el antiguo normativa no incluía ni un amortiguamiento ni una tercera masa en la zona superior del pantógrafo, en la zona de contacto con el hilo. A diferencia de la nueva que si lo incluye. La nueva normativa incluye los parámetros Alfa y beta que constituyen la matriz de amortiguamientos de Rayleigh del pantógrafo normativo. La nueva normativa incluye además amortiguamiento de entre el 1 y 1,5%.

Otro aspecto destacable de la nueva normativa es la inclusión de un modelo para la validación. Este método aporta un sistema de 3 grados de libertad completo y los resultados que se deberían obtener a partir de los datos de entrada. Esto sirve para validar el método de cálculo y ver qué precisión tienen los datos obtenidos. Además, permite ver cuan complejos son los intervalos de tolerancia exigidos por la nueva normativa. La nueva normativa incluye

distintas longitudes de vano y las distancias entre péndolas entre otros parámetros de entrada para verificar la validez del método de cálculo.

Otra diferencia más es que la nueva normativa incluye las características físicas de todos materiales que conforman la catenaria como puede ser el módulo de Young o la densidad lineal. La antigua normativa lo incluía solo en los elementos mas importantes para el funcionamiento.

Cabe destacar que la nueva normativa incluye nuevos rangos de filtrado para verificar la desviación típica en distintos intervalos. La nueva normativa incluye filtrados entre 0 y 20 Hz, 5 y 20 Hz, y 0 y 5 Hz.

La siguiente tabla adjunta ejemplifica las diferencias mas significativas de los datos a cumplir.

Tabla 1 Diferencias entre normativas

	EN50318:2002	EN50318:2018
N.º pantógrafos	1	1 o 2
Velocidades (km/h)	250 o 300	275 o 320
Tipo de catenarias	Simple	Simple con contraflecha/ con falso sustentador
Longitud de vano (m)	60	55 o 65
Matriz de amortiguamientos	x	$\alpha=0,0125 \text{ s}^{-1}$ $\beta= 0,0001 \text{ s}$
Grados de libertad del pantógrafo	2 y una tercera rigidez (Kc)	3
Modelo de atirantado	x	Si
Modelo de calibración	x	Si
Características físicas	x	Si
Rango de filtrado	0 - 20 Hz	0 -20 Hz 5 - 20 Hz 0 - 5 Hz

Capítulo 4. DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE CÁLCULO

4.1 CÁLCULO DE LA CATENARIA

El programa a utilizar, *Calesca*, es el encargado de recibir la información necesaria para colocar los puntos de la catenaria. *Calesca* recibe las características físicas de los materiales que conforman la catenaria y la geometría de la misma ya que el número de puntos entre péndolas puede ser variable y permite elegir distintas disposiciones dentro del método de elementos finitos. Una vez terminada la función del programa *Calesca*, el programa *Afectos* calcula los desplazamientos iniciales de la catenaria que serán muy útiles en el futuro para que la función *Candy* calcule las variables a estudiar. En la figura 9 anteriormente descrita, se puede observar el resultado obtenido tras ejecutar las funciones *Calesca* y *Afectos*.

A continuación, *Candy* ya tiene todas las herramientas necesarias para ejecutarse correctamente. La función *Candy* es la encargada de simular el paso del pantógrafo a lo largo de la catenaria. *Candy* se basa en una malla móvil ficticia que en este trabajo siempre será de 25 puntos, repartidos según se requiera en los ensayos para obtener los mejores resultados posibles. En cada iteración se simula el contacto del pantógrafo (con los 3 grados de libertad que norma obliga a cumplir) con el hilo de contacto en el punto establecido. Además, también calcula los desplazamientos del hilo de contacto y la velocidad de cada punto en cada instante de tiempo. Esta función a su vez va almacenando los datos para hacer su posterior validación.

El programa *Candy* realiza una iteración cada 0,025 segundos en los que el tren va recorriendo la catenaria. El programa permite saber en todo momento la posición de cada punto de la catenaria y del pantógrafo para obtener con precisión los valores pedidos. El sistema también permite saber el desplazamiento de cada grado de libertad del pantógrafo y la fuerza que va a aplicar sobre el hilo de contacto en cada instante de tiempo. La normativa

además exige una pérdida nula de contacto que en este trabajo se puede verificar viendo que las fuerzas mínimas siempre son positivas y alejadas de 0 Newtons. El programa se basa en el método de elementos finitos para calcular los desplazamientos y ángulos de cada punto del hilo de contacto en cada instante de tiempo. Para el cálculo de elementos finitos se podría revisar el método empleado [8].

4.2 MÉTODO DE INTEGRACIÓN TEMPORAL

El método de cálculo de los parámetros que la norma se basa en ecuaciones diferenciales que representan los nodos de un sistema físico. Dos de los parámetros más importantes para describir este método son el tiempo y la definición del método de integración.

Este sistema de cálculo se rige principalmente en la siguiente ecuación según Harirer y Warner [11], que también se podría interpretar como un cambio de variable.

$$y = f(y, t) \quad (1)$$

Siendo f una función general no lineal de variables $y(t)$ y t (tiempo). Sin embargo, la fórmula que rige la dinámica del modelo que vamos a estudiar se podría simplificar como:

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{u}} = \mathbf{q}(\mathbf{u}, \dot{\mathbf{u}}, t) \quad (2)$$

Donde \mathbf{M} es la matriz de masas del sistema de elementos finitos, la doble derivada de \mathbf{u} es el vector de aceleración de cada punto del sistema que se va a estudiar. El vector \mathbf{q} es la fuerza que incide sobre cada punto. Y como tal se procederá a redefinir un nuevo cambio de variable para redistribuir el vector incógnita “ y ”.

$$\mathbf{y} = \begin{Bmatrix} \mathbf{u} \\ \dot{\mathbf{u}} \end{Bmatrix} \quad \text{tal que} \quad \dot{\mathbf{y}} = \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{u}} \\ \mathbf{M}^{-1} \cdot \mathbf{q}(\mathbf{u}, \dot{\mathbf{u}}, t) \end{Bmatrix} = \mathbf{f}(\mathbf{y}, t) \quad (3)$$

El método de integración temporal que se utilizará en el siguiente trabajo calcula valores de la incógnita $\frac{y_n}{n}$ espaciados en intervalos de $\Delta t_{n+1}=t_{n+1}-t_n$. El cálculo del valor y para cada momento se hace a partir de su mismo valor instantes anteriores. El número k es lo que se conoce como el número de iteraciones del integrador. Es por ello que el valor de Y_{n+k} se calcula a partir de los valores anteriores gracias a la expresión [10]:

$$\sum_{j=0}^k \alpha_j y_{n+j} = \Delta t \phi_f(y_{n+k}, y_{n+k-1}, \dots, y_n, t_{n+k}; h_{n+k}) \quad (4)$$

En donde se ha usado el subíndice F para destacar la dependencia de ϕ con y en sus respectivos pasos a través de la función F.

Los siguientes epígrafes se presenta el método de cálculo original el algoritmo de Newmark [12] y la extensión Alpha generalizada [14] así como las adaptaciones particulares desarrolladas para cumplir los objetivos de este proyecto.

4.3 FAMILIA BETA-NEWMARK

Este método calcula la posición, la velocidad y la aceleración en un instante n+1 a partir de estos valores conocidos hasta el paso n. Este método se formula a partir de las expresiones del polinomio de Taylor desplazamientos y velocidades respecto al paso del tiempo, cuyas expresiones quedan:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_{n+1} &= \mathbf{u}_n + \Delta t \dot{\mathbf{u}}_n + \Delta t^2 \left(\frac{1}{2} - \beta \right) \ddot{\mathbf{u}}_n + \Delta t^2 \beta \ddot{\mathbf{u}}_{n+1} \\ \dot{\mathbf{u}}_{n+1} &= \dot{\mathbf{u}}_n + \Delta t (1 - \gamma) \ddot{\mathbf{u}}_n + \Delta t \gamma \ddot{\mathbf{u}}_{n+1} \end{aligned} \quad (5)$$

Se introducen los parámetros β y γ , que permiten realizar modificaciones en el método de cálculo.

Las variaciones más significativas de los métodos con β y γ son con el estudio de un sistema ‘patrón’ [15]. Concluyendo, la regla trapezoidal y la regla trapezoidal modificada son interesantes, aunque hay casos en los que son inestables o condicionalmente estables en régimen lineal.

La regla trapezoidal se obtiene para $\beta=0.25$ y $\gamma=0.5$, y también se podría llamar el método de aceleración constante ya que se podrían interpretar como actualizaciones en posición y velocidad suponiendo una variación constante de la velocidad entre intervalos de tiempo consecutivos. Dentro del lineal, es el método estable más preciso del que se dispone. No obstante, se podría introducir un amortiguamiento (alfa) para el método numérico según la siguiente nomenclatura:

$$\gamma = \frac{1}{2} + \alpha \quad y \quad \beta = \frac{1}{4} \left(\gamma + \frac{1}{2} \right)^2 \quad \alpha \geq 0 \quad (6)$$

Este método que introduce el amortiguamiento puede ser muy útil en algunos casos a pesar de que pierda cierta precisión.

Este método de resolución se basa en un algoritmo partiendo de los valores posición velocidad y aceleración en un paso n , del instante t_n para cuyo valor inicial se asume una aceleración nula.

$$\begin{aligned} \ddot{\mathbf{u}}_{n+1}^0 &= \mathbf{0} \\ \dot{\mathbf{u}}_{n+1}^0 &= \dot{\mathbf{u}}_{n+1} + \Delta t (1 - \gamma) \ddot{\mathbf{u}}_n \\ \mathbf{u}_{n+1}^0 &= \mathbf{u}_n + \Delta t \dot{\mathbf{u}}_n + \Delta t^2 \left(\frac{1}{2} - \beta \right) \ddot{\mathbf{u}}_n \end{aligned} \quad (7)$$

De los cuales se define el cambio en la velocidad y en la aceleración, aplicando la formulación de Newmark anteriormente descrita tal que así:

$$\begin{aligned}\Delta\ddot{\mathbf{u}}_{n+1} &= \frac{1}{\beta\Delta t^2}\Delta\mathbf{u}_{n+1} \\ \Delta\dot{\mathbf{u}}_{n+1} &= \frac{\gamma}{\beta\Delta t}\Delta\mathbf{u}_{n+1}\end{aligned}\quad (8)$$

Para el cálculo del incremento respecto al valor anterior del desplazamiento se utilizará la siguiente formulación:

$$\mathbf{K}_t^*\Delta\mathbf{u}_{n+1} = \mathbf{R}_{n+1}\quad (9)$$

De la variable R es el residuo pícate es la matriz de rigidez tangente cuyas fórmulas de cálculo se adjuntan a continuación. M es la matriz de masa del sistema y la matriz C es la matriz de amortiguamiento.

$$\begin{aligned}\mathbf{R} &= \mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}_{n+1} + \mathbf{q} - \mathbf{f} \\ \mathbf{K}_t^* &= \mathbf{K}_t + \frac{\gamma}{\beta\Delta t}\mathbf{C}_t + \frac{1}{\beta\Delta t^2}\mathbf{M}\end{aligned}\quad (10)$$

4.4 MÉTODO ALFA-GENERALIZADO

A continuación, se procederá a estudiar el método Alfa al realizado que es una variación del método beta en el que la principal diferencia es la introducción de un amortiguamiento α . Este método integra ecuaciones diferenciales de segundo orden. A su vez este es un caso particular dentro del método de integración temporal según el método trapezoidal, siendo muy útil a pesar de su debilidad a altas frecuencias.

este método es muy similar al anterior solo que a la hora de tener en cuenta el residuo no todos los parámetros del sistema tienen la misma ponderación [13][14]. Este método introduce α_m y α_f que son las ponderaciones que toma cada elemento del sistema a estudiar y se regula a partir de otro parámetro cuyo nombre es el radio espectral ρ_∞^u .

$$\mathbf{R} = (1 - \alpha_m) (\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}})_{n+1} + \alpha_m (\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}})_n + (1 - \alpha_f) (\mathbf{q} - \mathbf{f})_{n+1} + \alpha_f (\mathbf{q} - \mathbf{f})_n \quad (11)$$

$$\alpha_m = \frac{2\rho_\infty^u - 1}{\rho_\infty^u + 1} \quad y \quad \alpha_f = \frac{\rho_\infty^u}{\rho_\infty^u + 1} \quad (12)$$

Además, definiendo el nuevo parámetro diferencia de α_m y α_f se introduce α_{fm} , se redefine el cálculo de β y γ a partir del radio espectral:

$$\gamma = \frac{1}{2} + \alpha_{fm} \quad y \quad \beta = \frac{1}{4} \left(\gamma + \frac{1}{2} \right)^2 \quad (13)$$

4.5 POSTPROCESO

Para el filtrado de las fuerzas se partirá de un vector fuerza en el que cada instante de tiempo se tomará una fuerza de contacto entre pantógrafo hilo de contacto. El intervalo de tiempo es el requerido por la norma de 0,025 segundos. Este vector fuerzas se le aplicará el comando FFT de Matlab que lo que permite es pasar un vector en el dominio del tiempo a un vector en el dominio de la frecuencia. Una vez que este vector esté en el dominio de la frecuencia se multiplica una función de transferencia que permite pasar las frecuencias de 0 a 20 Hz y las frecuencias mayores de 20 las atenúa prácticamente al completo, comúnmente conocido como filtro paso bajo.

Esta fuerza filtrada de 0 a 20 Hz es la que pide la norma para realizar la gran parte de los cálculos. A continuación, se aplica un filtro de 0 a 5 Hz con la misma función de transferencia, pero cambiando la frecuencia de corte para calcular otro parámetro exigido

por la norma, la desviación típica de 0 a 5 Hz. Finalmente se aplicará un filtro paso alto a la fuerza de 0 a 20 Hz que filtrará frecuencias entre los 5 y los 20 Hz (filtro paso alto) y que se podría interpretar en su totalidad como un paso banda para calcular una vez más la desviación típica en este rango de frecuencias. Con estos 3 filtros ya tendremos las fuerzas en el dominio que se nos pide y se podrán calcular todos los parámetros necesarios. A continuación, una vez que se obtienen los vectores de fuerza en el dominio de frecuencia para los intervalos necesarios, se procederá a hacer el inverso del comando FFT para devolver el vector al dominio del tiempo. También se incluirán las funciones de transferencia correspondientes al paso alto y paso bajo.

Función de transferencia paso bajo:

$$H(w) = \frac{1}{1 + j \frac{w}{w_c}}$$

Siendo $w_c = 2 \cdot \pi \cdot f_c$, en este caso la frecuencia de corte será 5 o 20 Hz dependiendo del caso a estudiar.

Función de transferencia paso alto:

$$H(w) = \frac{1}{1 + \frac{w_c}{w \cdot j}}$$

Siendo la frecuencia de corte en este caso 5 Hz y la $w_c = 2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_c$.

En la figura 11 adjunta a continuación se representa en el dominio de la frecuencia la señal de entrada en rojo y en negro la señal de salida que permite pasar el filtro. En este caso la señal representada es un filtro de 5 a 20 Hz. Esta señal filtrada será de gran utilidad para el cálculo de la desviación típica de la fuerza de contacto en el intervalo de frecuencias de 5 a 20 Hz. Se ha incluido esta imagen como ejemplo del filtrado en el dominio de la fuerza en función de la frecuencia y los respectivos coeficientes. Se observa como el postproceso cumple con las especificaciones que se exigen. En negro está la señal de salida ya filtrada

que solo incluye valores entre los 5 y 20 Hz. Además, la parte representada en rojo es la fuerza de entrada que comprende el intervalo entre los 0 y 20 Hz. Se observa cómo en la zona de 0 a 5 Hz las fuerzas no están superpuestas y por tanto el filtro no permite el paso de fuerzas cuya frecuencia sea menor a 5 Hz.

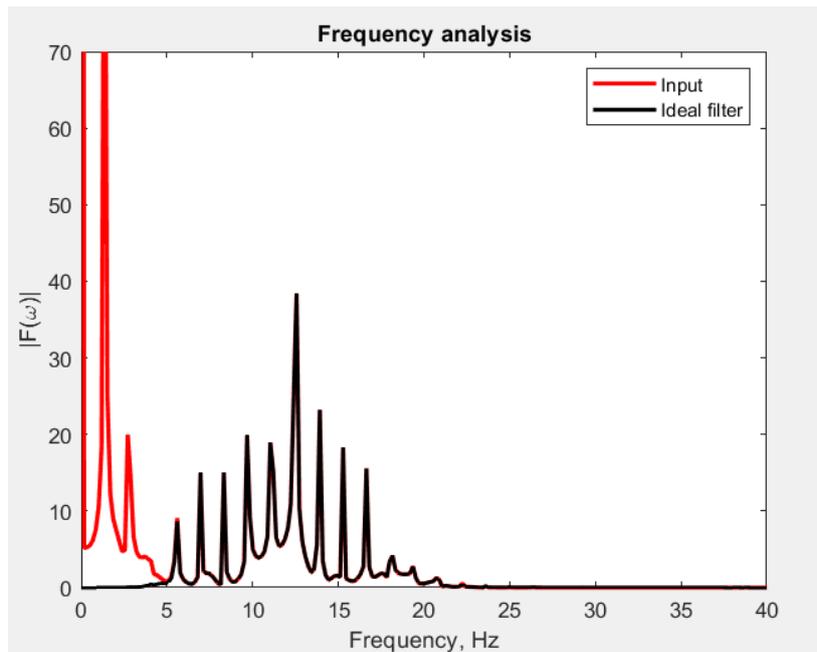


Figura 12 Diagrama de fuerzas filtradas entre 5 y 20 Hz

Capítulo 5. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

En el siguiente capítulo se hará una descripción numérica más profunda en el que se tocarán unos parámetros fundamentales de la simulación con el objetivo de obtener los cambios necesarios y que el método numérico elegido cumpla con la normativa.

Uno de los métodos numéricos se corresponde a la variación del radio espectral que se podría interpretar como un amortiguamiento que tiene el método numérico elegido y que permite obtener ligeras variaciones en los resultados. Este radio espectral, como se ha explicado en el apartado del método numérico crea un sistema de un grado de libertad con el que a partir del radio espectral se definen los parámetros α_m , α_f y β que son los necesarios para ejecutar el método de cálculo.

El otro método que permite realizar ligeras variaciones en el diseño es variar el número de particiones ficticias que se hacen en el hilo de contacto y en el hilo sustentador entre una péndola y otra. Cuantas más particiones se hagan, mayor será la precisión del método, sin embargo, las simulaciones tardan más porque hay que calcular muchos más momentos temporales.

Además de las dos variaciones anteriormente comentadas, también se podría cambiar la distribución de las particiones de la malla móvil. Actualmente el método que va se va a utilizar distribuye los puntos según una curva logarítmica. Estos cambios en la distribución de los puntos se llevarán a cabo a pesar de que no se profundizará mucho en ellos porque las variaciones que crean en los resultados son pequeñas.

Finalmente, el método elegido requiere de filtrados de la fuerza en distintos intervalos. En este programa se usa un filtro paso alto y un filtro paso bajo que, a partir de las frecuencias de la fuerza, filtra en los intervalos necesarios. La última de las variaciones que se podría hacer es tocar ligeramente estos filtros de modo que filtren en los siguientes valores

necesarios pero que a su vez alteren ligeramente los resultados para cumplir la norma. Este método no se llevará a cabo porque se necesitan cambios más grandes para cumplir con la normativa.

5.1 VARIACIÓN DEL RADIO ESPECTRAL

En este apartado lo que se realizará la variación del radio espectral para obtener un radio espectral óptimo que permita cumplir con las verificaciones lo mejor posible. Se partirá de un radio espectral desde 1 y será disminuyendo poco a poco hasta 0,5 hasta ver cuáles son los mejores resultados. Se utilizará el modelo simple a una velocidad de 275 km/h. En la tabla adjunta se mostrarán los resultados de cada una de las variables a calcular. Se pondrá en color negro las variables que cumplen con la normativa mientras que en rojo estarán las variables que no lo hacen.

En este apartado cuyo objetivo es obtener el radio espectral óptimo se utilizarán unas particiones de 3 elementos en el ordenador y 4 en el hilo de contacto.

Para las simulaciones realizadas en este apartado se ejecutará una catenaria con 15 vanos y se recogerán los datos cuando el sistema ha entrado y se ha estabilizado comportándose en régimen permanente. Para verificar la normativa se tomarán del vano 4 al 14. La norma exige tomar como mínimo 10 vanos, pues para este estudio se tomarán 11 vanos. Se podrían tomar más vanos pero las simulaciones tardarían mucho más y los resultados no oscilarían apenas. A continuación, se adjunta una tabla con los resultados obtenidos variando el radio espectral y manteniendo constante el número de elementos entre péndolas y la velocidad.

Tabla 2 Comparativa radios espectrales a 275 Km/h

Velocidad (Km/h)	275					
N.º Elementos - Hilo de contacto	4					
N.º Elementos - Hilo sustentador	3					
Concentración	3					
Máximo remallado	3					
Radio espectral	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5
Fuerza media (N)	144,30	144,21	144,3	144,31	143,47	144,31
σ (0 – 20Hz)	38,41	37,78	37,32	37,08	36,34	36,7
σ (0-5Hz)	29,2	29,77	28,99	28,96	29,01	28,941
σ (5-20Hz)	24,43	22,98	23,06	22,75	22,51	22,25
Fuerza máxima (N)	238,86	233,3	230,57	228,57	226,63	225,7
Fuerza mínima (N)	71,294	73,03	74,072	74,08	76,13	74,17
Máximo desplazamiento del hilo (mm)	64,05	60,12	64,05	64,05	64,16	64,05
Máximo uplift (mm)	43,65	44,5	42,77	42,73	42,77	42,78

En vista de los resultados anteriores queda patente que el radio espectral de 0,5 es el que más parámetros es capaz de cumplir. Por lo que para el siguiente estudio de variación del número de elementos entre péndolas se tomará un radio espectral de 0,5 y se irá variando hasta obtener los resultados que mejor confronten la norma.

En vista de los resultados, se concluye que la fuerza media, la fuerza máxima, la fuerza mínima y el uplift se cumple con cualquier radio espectral. Ahora bien, la desviación típica de 0 a 5 queda muy cerca del intervalo permitido. La desviación típica de 5 a 20 Hz también está muy cerca de cumplirse en todos los casos quitando el radio espectral de 0,5 en el que se llega a cumplir el intervalo.

En los siguientes apartados se procurará disminuir las desviaciones típicas para acabar cumpliendo con la normativa actual y cumplir con la mayor parte de los resultados posibles.

La siguiente tabla adjunta representa los resultados obtenidos por la simulación a la velocidad de 320 km/h variando el radio espectral desde 1 hasta 0,5. En este caso todos los parámetros están dentro del rango permitido exceptuando el rango vertical de movimiento del hilo de contacto que está bastante alejado de lo permitido. Se tomará un radio espectral

de 0,5 porque es el que más se aproxima a lo permitido para variación del número de elementos entre péndolas en las siguientes simulaciones.

Tabla 3 Comparativa de radio espectral a 275 km/h

Velocidad (Km/h)	320					
N.º Elementos - Hilo de contacto	4					
N.º Elementos - Hilo sustentador	3					
Concentración	3					
Máximo remallado	3					
Radio espectral	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5
Fuerza media (N)	169,67	169,67	169,64	169,6	169,57	169,53
σ (0 – 20Hz)	56,06	54,91	54,08	53,33	52,56	51,29
σ (0-5Hz)	41,23	41,24	41,06	40,86	40,68	40,09
σ (5-20Hz)	37,96	36,23	35,14	34,22	33,25	32
Fuerza máxima (N)	313,37	304,87	301,03	298,61	297,02	296,5
Fuerza mínima (N)	64,8	68,85	71,95	75,55	77,75	81,38
Máximo desplazamiento del hilo (mm)	87,59	86,99	86,09	85,12	84,05	81,96
Máximo uplift (mm)	62,09	62,04	61,6	61,19	60,79	59,95

5.2 VARIACIÓN DEL NÚMERO DE ELEMENTOS

En esta sección se procederá a evaluar el número de particiones ficticias que hay en el hilo sustentador y en el hilo de contacto. En todas las simulaciones realizadas previamente siempre se realizaron 3 particiones en el hilo sustentador y 4 en el hilo de contacto.

En la siguiente tabla adjunta se representan los resultados variando el número de particiones ficticias representadas. El primer número hace referencia al número de elementos en el hilo de contacto y el segundo a los elementos simulados en el hilo sustentador. El número de elementos en el hilo de contacto es más importante y significativo que en el hilo sustentador por eso se realizan más particiones.

En las siguientes tablas adjuntas se representan los resultados con un radio espectral de 0,5. Para todos los cambios en el número de elementos se ha mantenido el radio espectral en 0,5 porque se ha demostrado que en ambas velocidades es el que más parámetros es capaz de cumplir y en caso de no obtener los resultados correctos es el que más se acerca.

Tabla 4 Comparativa número de elementos a 275 Km/h

Velocidad (Km/h)	275				
Radio espectral	0,5				
Concentración	3				
Máximo remallado	3				
N.º Elementos - Hilo de contacto	3	4	6	9	12
N.º Elementos - Hilo sustentador	2	3	4	6	10
Fuerza media (N)	144,17	144,31	144,15	144,14	144,14
σ (0 – 20Hz)	37,67	36,7	36,29	36,06	35,99
σ (0-5Hz)	30,58	28,941	28,99	28,76	28,72
σ (5-20Hz)	21,85	22,246	21,67	21,58	21,52
Fuerza máxima (N)	228,2	225,7	225,89	225,38	225,27
Fuerza mínima (N)	71,93	74,174	75,34	75,92	76,14
Máximo desplazamiento del hilo (mm)	63,919	64,05	61,09	53,96	57,72
Máximo uplift (mm)	46,167	42,78	43,16	43,02	43,03

Tras ver los resultados obtenidos se concluye que cuantos más elementos hay en el hilo de contacto y en el hilo sustentador, menor es la desviación típica y por tanto se mejoran los resultados obtenidos del ensayo anterior. Se puede ver cómo se empieza a verificar la desviación típica en el intervalo de 0 a 5 Hz, aunque la desviación típica de 0 a 20 Hz aún queda lejos. El máximo desplazamiento del hilo también queda lejos, aunque algo más cerca que antes.

Tabla 5 Comparativa número de elementos a 320 km/h

Velocidad (Km/h)	320				
Radio espectral	0,5				
Concentración	3				
Máximo remallado	3				
N.º Elementos - Hilo de contacto	3	4	6	9	12
N.º Elementos - Hilo sustentador	2	3	4	6	10
Fuerza media (N)	169,60	169,53	169,53	169,52	169,52
σ (0 – 20Hz)	52,87	51,29	51,30	50,99	50,91
σ (0-5Hz)	41,66	40,09	40,10	39,87	39,80
σ (5-20Hz)	32,48	32	32,00	31,81	31,78
Fuerza máxima (N)	298,52	296,5	296,50	295,02	295,88
Fuerza mínima (N)	77,97	81,38	81,38	82,28	82,95
Máximo desplazamiento del hilo (mm)	86,03	81,96	81,96	69,23	72,53
Máximo uplift (mm)	62,72	59,95	59,95	59,68	59,64

Tras realizar el ensayo del modelo a 320 km/h, no se obtiene ninguna mejora y se empeora en algunos casos los resultados anteriormente obtenidos. Para el modelo con 9 elementos en el hilo de contacto, la fuerza mínima sobrepasa el intervalo permitido lo que ocurre de igual manera en el modelo con 12 elementos en el hilo de contacto. En los siguientes ensayos se utilizarán 4 elementos en el hilo de contacto y 3 en el hilo sustentador. Se puede observar cómo los resultados del ensayo segundo y tercero son muy similares, dado que el tiempo requerido para la simulación es muy alto. Se tomarán cuatro elementos en el hilo de contacto y 3 en el hilo sustentador para futuros ensayos a 320 km/h porque su tiempo de simulación es mas bajo y los resultados son prácticamente idénticos.

Se puede observar cómo cuando hay más elementos en el hilo de contacto y en el hilo sustentador puede que existan unas fuerzas mínimas o máximas puntuales que se salgan del intervalo como ocurre en este caso. Por ello se concluye una vez más que para este modelo a 320 km/h el modelo óptimo es el anteriormente mencionado.

5.3 VARIACIÓN DE LA MALLA MÓVIL

Primeramente, se procederá a explicar el proceso por el que se distribuyen los puntos de la malla móvil que representaría el pantógrafo a su paso por el hilo de contacto.

Inicialmente siempre se tomará una malla móvil que constará de 25 puntos, es un input. A continuación, habrá que definir 2 valores de entrada que serán max_{rm} , y $conc$. Estas variables representan la separación máxima entre un punto y otro, y cómo de concentrados estarán los puntos de la malla móvil con respecto al punto de contacto, la separación mínima será nula, aunque nunca será 0 porque con las ecuaciones establecidas no se puede dar el caso. A continuación, se expondrán las ecuaciones utilizadas para el cálculo del vector Dx que representa las coordenadas de los 25 puntos de la malla móvil. Este vector de malla móvil se calcula para cada punto del hilo de contacto y se irán guardando los resultados obtenidos.

$$p = 2 \cdot (conc \cdot \log(max_{rm}) - 1) / (25 - 1)$$

$$Max_{rm} = max_{rm} + e^{conc}$$

$$Dx = e^{p \cdot \log(max_{rm}) / conc}$$

Con estas ecuaciones y sabiendo que p es un vector cuyo valor inicial es 1 y su valor máximo es $conc$, va creando el vector Dx de manera que se construye la malla móvil a partir de las ecuaciones representadas. Se ha utilizado esta distribución porque al principio los puntos están muy juntos que son los más afectados por la variación del punto del hilo de contacto y cuánto más se aleja más separados están porque no es tan interesante el valor obtenido. En la siguiente tabla se procederá a representar los valores obtenidos variando el max_{rm} y la $conc$.

La siguiente tabla representa cómo con un radio espectral de 0,5, 12 puntos en el hilo de contacto y 10 en el hilo sustentador se han ido realizando cambios en el max_{rm} y la concentración de modo que se han obtenido ligeras mejoras en los resultados anteriormente obtenidos. El primer número de la tabla representa el max_{rm} y el segundo la concentración.

Hasta el momento todas las simulaciones realizadas, el max_rm tomaba un valor de 3 y la concentración un valor de 3.

Tabla 6 Comparativa en la variación de la malla móvil a 275 km/h

Velocidad (Km/h)	275					
Radio espectral	0,5					
N.º Elementos - Hilo de contacto	12					
N.º Elementos - Hilo sustentador	10					
Máximo remallado	3	5	5	2	2	1
Concentración	3	5	2	5	2	2
Fuerza media (N)	144,14	144,18	144,2	144,14	144,14	144,14
σ (0 – 20Hz)	35,99	36,05	36,09	35,98	35,98	35,98
σ (0-5Hz)	28,72	28,84	29,06	28,71	28,72	28,72
σ (5-20Hz)	21,52	21,49	21,29	21,52	21,51	21,51
Fuerza máxima (N)	225,27	226,43	226,17	225,05	224,95	224,95
Fuerza mínima (N)	76,14	76,69	77,03	76,14	76,15	76,15
Máximo desplazamiento del hilo (mm)	57,72	56,59	57,04	57,69	57,69	57,69
Máximo uplift (mm)	43,03	41,53	41,54	42,99	42,99	42,99

Una vez obtenidos los resultados queda patente que los números que más se acercan a lo que pide la norma se obtienen con un radio espectral de 0,5 con 12 elementos en el hilo de contacto y 10 en el hilo sustentador y finalmente un max_rm de 2 y una concentración de 5. Gracias a este último ensayo se ha conseguido acercarse un poco más al rango de la normativa, aunque no ha conseguido pasar la desviación típica en el intervalo de 0 a 20 Hz que era el objetivo de esta simulación. Se obtuvo una desviación típica de 35,9844 siendo válidos valores entre 34,8 y 31,9.

Tabla 7 Comparativa en la variación de la malla móvil a 320 km/h

Velocidad (Km/h)	320					
Radio espectral	0,5					
N.º Elementos - Hilo de contacto	4					
N.º Elementos - Hilo sustentador	3					
Máximo remallado	3	5	5	2	2	1
Concentración	3	5	2	5	2	2
Fuerza media (N)	169,53	169,54	169,53	169,57	169,57	169,53
σ (0 – 20Hz)	51,30	51,55	51,58	52,06	52,03	51,42
σ (0-5Hz)	40,10	40,15	40,26	40,72	40,70	40,58
σ (5-20Hz)	32,00	32,36	32,26	32,43	32,41	31,60
Fuerza máxima (N)	296,50	294,05	294,18	297,73	297,54	293,50
Fuerza mínima (N)	81,38	79,32	79,54	80,02	79,98	80,56
Máximo desplazamiento del hilo (mm)	81,96	81,90	82,07	83,16	83,01	81,11
Máximo uplift (mm)	59,95	59,76	60,00	60,93	60,78	59,02

Después de los resultados obtenidos se concluye que el mejor modelo ensayado a 320 km/h se da con un radio espectral de 0,5 , 4 elementos en el hilo de contacto, 3 en el hilo sustentador, un remallado máximo de 3 y una concentración en la malla móvil de 3. También se realizaron ensayos con radios espectrales superiores a 0,5 que permitían una fuerza máxima y mínima más lejos del límite permitido y que al variar parámetros de la malla móvil o de la catenaria disminuyen el movimiento vertical del hilo. Aun así, estos ensayos no fueron capaces superar el mejor ensayo obtenido hasta el momento.

Capítulo 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

La siguiente sección se dividirá en dos partes fundamentales, las primeras de ellas los ensayos obtenidos a una velocidad de 275 km/h y la segunda parte de los resultados obtenidos a una velocidad de 320 km/h.

6.1 RESULTADOS MODELO A 275 KM/H

Para la velocidad de 275 km/h se presentarán los mejores resultados obtenidos en cada uno de los ensayos. Primeramente, se realizó el ensayo de variación de radio espectral y se obtuvieron los siguientes resultados para un radio espectral de 0,5.

A continuación, se incluirán los mejores resultados del ensayo de variación del radio espectral

Tabla 8 Resultados del ensayo variación radio espectral

Velocidad (Km/h)	275
Radio espectral	0,5
N.º Elementos - Hilo de contacto	4
N.º Elementos - Hilo sustentador	3
Concentración	3
Máximo remallado	3
Fuerza media (N)	144,31
σ (0 – 20Hz)	36,7
σ (0-5Hz)	28,941
σ (5-20Hz)	22,25
Fuerza máxima (N)	225,7
Fuerza mínima (N)	74,17
Máximo desplazamiento del hilo (mm)	64,05
Máximo uplift (mm)	42,78

Con este radio espectral que simula el amortiguamiento del método numérico, se lograba cumplir con la fuerza media, desviación típica de 5 a 20 Hz, la fuerza máxima, la fuerza mínima, y el uplift permitido por el poste.

En un nuevo intento de mejorar las desviaciones típicas de la fuerza media y que cumplieran con la norma se asumió que el mejor radio espectral para esta simulación era tomar un radio espectral de 0,5. En rojo se detallan los números que no cumplen con la normativa y en negro los que sí. Se ha decidido mejorar los datos de desviación típica porque están cerca del intervalo permitido sin embargo la máxima variación vertical del hilo queda bastante lejos del intervalo. También se realizó un ensayo con radio espectral de 0,4 pero quedaba muy lejos de los de cumplir con la normativa y por eso no se ha incluido en los resultados. Para los próximos ensayos se tomará un radio espectral de 0,5.

Dado que todas las desviaciones típicas quedan por encima del intervalo permitido, y que el movimiento vertical del hilo es bastante alto, se concluye que la catenaria es muy ligera o que su inercia es muy baja. Por ello que cualquier movimiento provoca perturbaciones en la misma y hace que la desviación típica en cualquier intervalo de filtrado sea mas alta de lo que debería. Como lo que interesa es bajar la desviación típica y “eliminar” las mínimas fuerzas que aparecen, tiene sentido que el mejor amortiguamiento sea el mas bajo posible. Este amortiguamiento es capaz de eliminar ligeramente las fuerzas a altas frecuencias, lo que provoca una disminución ligera de la desviación típica.

Para el siguiente ensayo de variación del número de particiones en el hilo de contacto y el hilo sustentador se presentará el mejor resultado obtenido en la siguiente tabla.

A continuación, se incluirán los mejores resultados del ensayo variación del número de elementos:

Tabla 9 Resultados del ensayo variación del numero de elementos

Velocidad (Km/h)	275
Radio espectral	0,5
N.º Elementos - Hilo de contacto	12
N.º Elementos - Hilo sustentador	10
Concentración	3
Máximo remallado	3
Fuerza media (N)	144,14
σ (0 – 20Hz)	35,99
σ (0-5Hz)	28,72
σ (5-20Hz)	21,52
Fuerza máxima (N)	225,27
Fuerza mínima (N)	76,14
Máximo desplazamiento del hilo (mm)	57,72
Máximo uplift (mm)	43,03

Esta tabla representa que con un mayor número de puntos en el hilo de contacto y en el hilo sustentador se consigue verificar además la desviación típica filtrada de 0 a 5 Hz, lo que supone un avance hacia el objetivo. Sin embargo, la desviación de 0 a 20 Hz sigue sin cumplirse y la variación vertical del hilo sigue estando alejada del intervalo, aunque algo más cerca. De nuevo se vuelven a detallar los resultados en rojo como los que no cumplen normativa y los que están en negro sí. Este decremento en la desviación típica se debe a que el sistema toma más puntos y las fuerzas a bajas frecuencias se atenúan considerablemente al haber mas puntos para el calculo. En general todas las desviaciones típicas disminuyen. Tras este ensayo el resultado mejora considerablemente entrando en la desviación típica de 0 a 5 Hz en el rango permitido. También se realizaron simulaciones con 14 elementos en un hilo de contacto y 11 en el hilo sustentador y no mejoraron los resultados.

Para el siguiente ensayo se tomará un radio espectral de 0,5 y 12 elementos en el hilo de contacto y 10 en el hilo sustentador. Estos ensayos al tener tantos puntos para simular tardaban mucho tiempo, del orden de 15 horas.

Finalmente se realizaron ensayos cambiando la distribución de los puntos de la malla móvil y se obtuvieron los siguientes resultados.

A continuación, se incluyen los mejores resultados del ensayo de la variación de la malla móvil:

Tabla 10 Resultados del ensayo variación de la malla móvil

Velocidad (Km/h)	275
Radio espectral	0,5
N.º Elementos - Hilo de contacto	12
N.º Elementos - Hilo sustentador	10
Concentración	5
Máximo remallado	2
Fuerza media (N)	144,14
σ (0 – 20Hz)	35,98
σ (0-5Hz)	28,71
σ (5-20Hz)	21,52
Fuerza máxima (N)	225,05
Fuerza mínima (N)	76,14
Máximo desplazamiento del hilo (mm)	57,69
Máximo uplift (mm)	42,99

Los datos representados en la tabla anterior son los mejores obtenidos en la simulación de 275 km/h y el único parámetro que no se ha sido capaz de validar es la desviación típica de 0 a 20 Hz y la variación vertical máxima del hilo de contacto, el resto de los parámetros si son capaces de cumplir con la normativa. El hecho de aumentar la concentración de los puntos de la malla móvil alrededor del punto de contacto provoca que las perturbaciones en las inmediaciones de la malla sean menores. Este fenómeno es provocado porque los puntos cuanto más alejados están, mas diferentes son las fuerzas que se les aplican. Por eso cuanto mas concentrados estén los puntos respecto del punto de contacto menor es la desviación típica. Finalmente, gracias a todos los ensayos realizados se ha conseguido mejorar considerablemente los resultados.

6.2 RESULTADOS MODELO A 320 KM/H

A continuación, se incluirán los mejores resultados de la velocidad de 320 km/h.

Tabla 11 Resultados del ensayo variación radio espectral

Velocidad (Km/h)	320
Radio espectral	0,5
N.º Elementos - Hilo de contacto	4
N.º Elementos - Hilo sustentador	3
Concentración	3
Máximo remallado	3
Fuerza media (N)	169,53
σ (0 – 20Hz)	51,29
σ (0-5Hz)	40,09
σ (5-20Hz)	32
Fuerza máxima (N)	296,5
Fuerza mínima (N)	81,38
Máximo desplazamiento del hilo (mm)	81,96
Máximo uplift (mm)	59,95

Estos son los mejores resultados obtenidos del ensayo de variación espectral a una velocidad de 320 km/h. Son los mejores porque la variación vertical del hilo de contacto es la que más se acerca al intervalo requerido y el resto de los parámetros cumplen con la normativa pedida.

De nuevo la explicación a estos resultados es la misma que en el modelo a 275 Km/h. Dado que se utiliza la misma catenaria, la cual es muy ligera y su inercia es baja el movimiento vertical del hilo es bajo. Se vuelve a concluir que el radio espectral que mejor cumple con las expectativas es 0,5 porque disminuye las ligeras perturbaciones a altas frecuencias y decremента en la medida de lo posible el movimiento vertical del hilo.

A continuación, se adjuntan los mejores resultados obtenidos del modelo a 320 km/h para el ensayo del número de elementos en los hilos.

Tabla 12 Resultados del ensayo variación del número de elementos

Velocidad (Km/h)	320
Radio espectral	0,5
N.º Elementos - Hilo de contacto	4
N.º Elementos - Hilo sustentador	3
Concentración	3
Máximo remallado	3
Fuerza media (N)	169,53
σ (0 – 20Hz)	51,29
σ (0-5Hz)	40,09
σ (5-20Hz)	32
Fuerza máxima (N)	296,5
Fuerza mínima (N)	81,38
Máximo desplazamiento del hilo (mm)	81,96
Máximo uplift (mm)	59,95

Tomando los resultados obtenidos del ensayo no se obtiene ninguna mejora con respecto al ensayo anterior ya que se habían realizado con los mismos parámetros en las variables disponibles por el programa 4 elementos en el hilo de contacto y 3 en el hilo sustentador. Se observa cómo disminuye ligeramente el desplazamiento del hilo estando aún así lejos del intervalo permitido. El hecho de que haya mas elementos en el hilo de contacto y sustentador provoca que las fuerzas mínimas tengan algún instante en el que se salgan del intervalo al haber más puntos a estudiar. Este fenómeno provocó que el ensayo con mas elementos en el hilo de contacto disminuyese el movimiento vertical del hilo acercándose al rango permitido, pero provoca que la fuerza mínima permitida no sea admitida por la norma.

A continuación, se adjuntan los mejores resultados obtenidos a 320 km/h para el remallado de la malla móvil:

Tabla 13 Resultados en la variación de la malla móvil a 320 km/h

Velocidad (Km/h)	320
Radio espectral	0,5
N.º Elementos - Hilo de contacto	4
N.º Elementos - Hilo sustentador	3
Concentración	3
Máximo remallado	3
Fuerza media (N)	169,53
σ (0 – 20Hz)	51,30
σ (0-5Hz)	40,10
σ (5-20Hz)	32,00
Fuerza máxima (N)	296,50
Fuerza mínima (N)	81,38
Máximo desplazamiento del hilo (mm)	81,96
Máximo uplift (mm)	59,95

Los mejores resultados obtenidos para el modelo a 320 km/h se han dado con un radio espectral de 0,5, 4 elementos en el hilo de contacto, 3 en el hilo sustentador, una concentración en el remallado de 3 y un remallado máximo de 3. Con estos resultados se cumplían todos los parámetros de la normativa salvo el movimiento vertical del hilo que quedaba con un valor de 81,96 siendo el rango permitido de 39 a 51 mm.

En vista de los resultados obtenidos, no se han podido mejorar los resultados del anterior ensayo. El problema principal radicaba en las fuerzas máximas y mínimas cuando se aumentaba la concentración de la malla norma al estar muy cerca del límite permitido.

Capítulo 7. CONCLUSIONES

En vista de los resultados obtenidos en ambos modelos estudiados en el tfg, se concluye que este método utilizado no es capaz de validar la nueva normativa EN50318:2018 [6]. El método es capaz de verificar todos los parámetros salvo el movimiento vertical del hilo en ambos casos. Por lo que el método de elementos finitos y cuyo método de integración temporal (α -generalizado) no es valido para cumplir con la normativa anteriormente descrita. Se trata de una catenaria con una inercia muy baja y una densidad lineal también baja lo que provoca desplazamientos muy altos.

Del amortiguamiento numérico se concluye que cuanto más bajo mejor, porque la catenaria tiene muchos desplazamientos y bajar el amortiguamiento mejora los resultados obtenidos tanto en el movimiento vertical del hilo como la desviación típica de la fuerza.

Del número de elementos en los hilos se concluye que para el modelo a 275 km/h, cuantas más particiones hay a mejores resultados se obtienen porque se consigue atenuar la desviación típica y que entre en el rango permitido. Por otra parte, el modelo 320 km/h no obtiene beneficios al haber más particiones en el hilo de contacto y los sustentador. De hecho, empeora los resultados.

En cuanto a la distribución de los puntos de la malla móvil, el modelo a 275 km/h mejora cuanto más concentrados están los puntos del punto de contacto. Se puede ver en los resultados porque se obtiene con una concentración máxima y mínimo remallado es decir minimizando la distancia máxima entre puntos de la malla móvil. El modelo a 320 km hora obtiene su mejor rendimiento en un estado intermedio de concentración y distancia máxima de remallado.

Este fenómeno de movimiento del hilo excesivo también puede suceder debido a que las frecuencias a las que el pantógrafo empuja la catenaria están muy cerca de las frecuencias naturales de la catenaria. Esto provoca que los desplazamientos sean muy altos. El intervalo de tiempo que la norma exige ($T = 0.025s$, $f = 1/T$), puede que se acerque mucho a la

frecuencia natural del sistema que según el diagrama de amplificación dinámico provoca grandes desplazamientos cuando las fuerzas están cerca de la frecuencia natural del sistema.

Capítulo 8. BIBLIOGRAFÍA

(s.f.).

- [1] Curiosfera-historia.com/historia-del-tren [En línea] Available: <https://curiosfera-historia.com/historia-del-tren/>. [Último acceso: 21 01 2022].
- [2] UC3M, «Interaccion dinámica-catenaria» [En línea]. Available: https://earchivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/17989/PFC_Cesar_Clemente_Bueno.pdf?sequence=1&isAllowed=y. [Último acceso: 21 06 2022].
- [3] Bueno, C. C. (2013). *Simulación por el Método de los Elementos Finitos* . Madrid: TFG.
- [4] Friedrich Kiessling , Rainer Puschmann , Axel Schmieder y Egid Schneider . (1994). *Contact lines for electric railways*. Siemens.
- [5] Hernández, N. M. (2020). *Cálculo de necesidades de la instalacion del sistema de una linea aerea de contacto* . Madrid: TFM.
- [6] Norma española UNE-EN 50318:2018. (2018).
- [7] Norma UNE-EN50318:2002. (2002).
- [8] Octavio, J. R. (2009). *Análisis dinámico y interacción para líneas de alta velocidad*. Madrid: Tesis.
- [9] Carnicero, A. (sf) *Catenaria*. Madrid
- [10] J.D. Lambert. *Numerical Methods for Ordinary Differential Systems. The initial value problem*. Wiley, 1991.
- [11] E. Hairer and G. Wanner. *Solving Ordinary Differential Equations II- Stiff and Differential-Algebraic Problems*. Springer-Verlag, 1991.

- [12] N. Newmark. *A method of computation for structural dynamics*. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 85:67–94, 1959.
- [13] H. Hilber, T. Hughes, and R. Taylor. *Improved numerical dissipation for time integration algorithms in structural dynamics*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 5:283–292, 1977.
- [14] J. Chung and G.M. Hulbert. *A time integration algorithm for structural dynamics with improved numerical dissipation: The generalized- α method*. ASME J. Appl. Mech., 60, 1993.
- [15] M. Géradin and D. Rixen. *Mechanical Vibrations: Theory and Application to Structural Dynamics*. John Wiley & Sons, 1997.
- [16] M. Géradin and A. Cardona. *Flexible Multibody Dynamics: A Finite Element Approach*. John Wiley & Sons, 2001.
- [17] S. Erlicher, L. Bonaventura, and O.S. Bursi. *The analysis of the generalized- α method for non-linear dynamic problems*. Computational Mechanics, 28, 2002.