



Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería Electrónica Industrial



**Universidad de Sevilla**  
**Escuela Politécnica Superior**

**Cálculo de la distancia de frenado de un tren  
mediante macros en base a modelos de la Agencia  
Estatad de Seguridad Ferroviaria (Resolución  
2/2021)**

Autor:

Pablo Barreda Valle

Tutora:

Mónica Molina Becerra

Matemática Aplicada II

Sevilla, 2024



"Los científicos estudian el mundo tal como es, los ingenieros crean el mundo que nunca ha sido"

Theodore von Kármán (1881 – 1963)



# Agradecimientos

---

*A mi familia, mi pareja y mis amigos por el apoyo recibido durante estos años. Han hecho que trabajar y estudiar para lograr un futuro mejor haya sido más fácil con su apoyo.*



# Resumen

---

Este trabajo de fin de grado se enfoca en la automatización del cálculo de la distancia de frenado, basado en los modelos proporcionados por la Agencia Estatal de Seguridad Ferroviaria según la Resolución 2/2021, utilizando macros de Excel.

El modelo técnico especificado abarca trenes con velocidades de inicio de frenado entre 10 y 200 km/h, y considera una declividad (inclinación de la vía) de hasta el 35%. Se distingue entre dos tipos de trenes: Lambda y Gamma. Para los trenes tipo Lambda, el frenado depende de una variable denominada porcentaje de freno ( $\lambda$ ), la cual será detallada en esta memoria, junto con la longitud del tren. Por otro lado, los trenes tipo Gamma dependen de su deceleración y del tiempo de respuesta del maquinista.

El objetivo principal de este TFG ha sido automatizar, mediante el uso de macros de Excel, los dos modelos más relevantes de cálculo de distancia de frenado para trenes Lambda (distancias de frenado de emergencia en condiciones nominales y degradadas). Para ello, se ha desarrollado una interfaz que facilita la interacción entre el usuario y el software, proporcionando resultados normalizados de acuerdo con las entradas especificadas por el usuario.





# Abstract

---

This final degree project focuses on the automation of braking distance calculation, based on the models provided by the State Railway Safety Agency according to Resolution 2/2021, using Excel macros.

The specified technical model covers trains with initial braking speeds between 10 and 200 km/h and considers a track gradient of up to 35%. It distinguishes between two types of trains: Lambda and Gamma. For Lambda-type trains, braking depends on a variable called brake percentage ( $\lambda$ ), which will be detailed in this work along with the length of the train. On the other hand, Gamma-type trains depend on their deceleration and the driver's response time.

The main objective of this final degree project has been to automate, using Excel macros, the two most relevant models for calculating braking distance for Lambda trains (emergency braking distances under nominal and degraded conditions). To this end, an interface has been developed to facilitate interaction between the user and the software, providing standardized results according to the inputs specified by the user.



# Índice

<b>Agradecimientos .....</b>	<b>1</b>
<b>Resumen.....</b>	<b>3</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>5</b>
<b>Índice.....</b>	<b>7</b>
<b>1 Introducción al mundo ferroviario.....</b>	<b>9</b>
1.1 <i>Breve Introducción .....</i>	9
1.1.1 Historia y Evolución .....	9
1.1.2 Componentes Clave del Sistema Ferroviario .....	9
1.1.3 Seguridad en el Transporte Ferroviario .....	11
1.1.4 Innovaciones Tecnológicas.....	11
1.2 <i>¿Qué es un enclavamiento y un bloqueo ferroviario?.....</i>	11
1.2.1 Definición y Función de los Enclavamientos.....	11
1.2.2 El Bloqueo.....	13
1.2.3 Evolución y Seguridad en los Sistemas de Enclavamiento.....	13
1.2.4 Importancia de los Objetos de Campo .....	16
1.3 <i>Objetivos de este Trabajo de Fin de Grado. ....</i>	16
1.3.1 ¿Cómo surgió esta idea de TFG? ¿A qué me dedico? .....	17
<b>2 Resolución 2/2021. “Especificación técnica de circulación. Cálculo de la distancias de frenado” ..</b>	<b>19</b>
2.1 <i>Introducción y Contexto .....</i>	19
<i>Conceptos básicos de frenado ferroviario .....</i>	20
2.1.1 El porcentaje de peso freno de un tren.....	20
2.1.2 Regímenes de frenado .....	20
2.1.3 Modos y distancias de frenado .....	21
2.1.4 Trenes tipo Lambda y trenes tipo Gamma.....	22
2.2 <i>Capítulo 1: Antecedentes y Justificación .....</i>	22
2.3 <i>Capítulo 2: Objeto y Ámbito de Aplicación.....</i>	23
2.4 <i>Capítulo 3: Definiciones y Terminología.....</i>	23
2.5 <i>Capítulo 4: Modos y Regímenes de Frenado.....</i>	23

2.6	<i>Capítulo 5: Metodología para el Cálculo de Distancias de Frenado</i> .....	24
2.7	<i>Capítulo 6: Factores Influyentes en el Cálculo</i> .....	24
2.8	<i>Capítulo 7: Implementación y Monitoreo</i> .....	25
<b>3</b>	<b>Implementación del cálculo de distancia de frenado mediante macros en excel.</b> .....	<b>27</b>
3.1	<i>¿Qué contiene el libro de Excel en el que se ha implementado el cálculo de la distancia de frenado automatizado?</i> .....	27
3.2	<i>Cálculo de la distancia de FdE en condiciones nominales</i> .....	34
3.2.1	Entorno de programación.....	35
3.2.2	Lenguaje de programación para distancia de FdE en condiciones nominales. ....	36
3.2.2.1	Paso 1. ....	38
3.2.2.2	Paso 2 .....	40
3.2.2.3	Paso 3 .....	48
3.2.2.4	Paso 4 .....	51
3.2.2.5	Paso 5 .....	51
3.2.2.6	Paso 6 .....	53
3.2.2.7	Paso 7 .....	56
3.2.2.8	Paso 8 .....	57
3.3	<i>Cálculo de distancia de FdE en condiciones degradadas</i> .....	58
3.3.1	Diferencia principal entre la distancia de frenado de emergencia en condiciones nominales y degradadas. ....	58
3.3.1.1	Implementacion de este cambio en nuestro Código.....	61
3.3.1.2	Salidas nuevas obtenidas en condiciones degradadas.....	62
<b>4</b>	<b>Conclusiones</b> .....	<b>63</b>
<b>5</b>	<b>Referencias</b> .....	<b>65</b>

# 1 INTRODUCCIÓN AL MUNDO FERROVIARIO

El transporte ferroviario ha sido una pieza fundamental en la evolución de la movilidad humana desde la Revolución Industrial. Su capacidad para mover grandes cantidades de personas y mercancías de manera eficiente y segura lo ha convertido en una de las columnas vertebrales del desarrollo económico y social a nivel mundial. La infraestructura ferroviaria no solo incluye las vías y trenes, sino también una compleja red de sistemas de control y seguridad que aseguran el correcto funcionamiento del servicio.

## 1.1 Breve Introducción

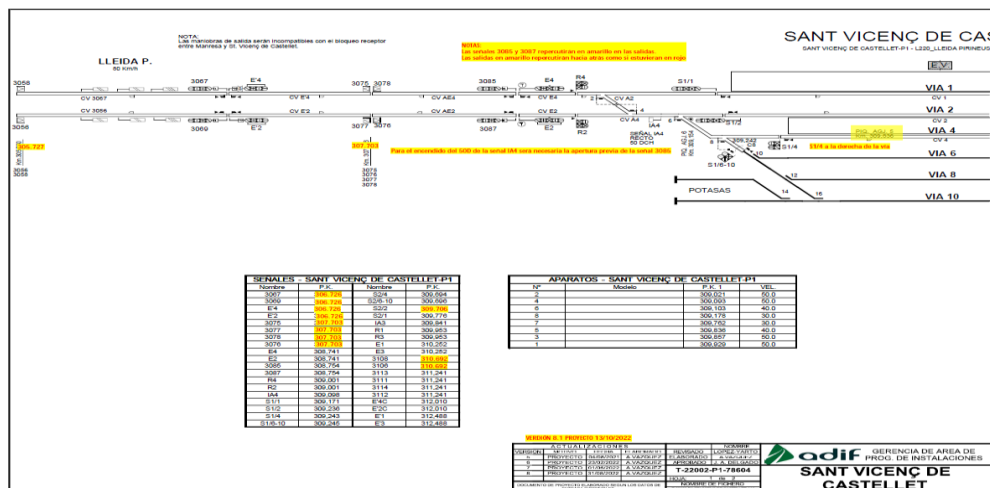
### 1.1.1 Historia y Evolución

Desde los primeros trenes a vapor del siglo XIX hasta los modernos trenes de alta velocidad, el sector ferroviario ha experimentado avances tecnológicos significativos. Los primeros sistemas eran simples y basados en tecnologías mecánicas rudimentarias. Con el tiempo, estos sistemas han evolucionado para incorporar electrónica avanzada y, más recientemente, sofisticados sistemas informáticos y de automatización.

### 1.1.2 Componentes Clave del Sistema Ferroviario

El sistema ferroviario está compuesto por diversos elementos interconectados que funcionan en armonía para garantizar la seguridad y eficiencia del transporte:

1. **Vías y Estructuras:** Las vías férreas son la base del sistema, diseñadas para soportar el peso de los trenes y permitir su movimiento seguro y eficiente. Las infraestructuras asociadas, como puentes y túneles, también juegan un papel crucial en la red ferroviaria. A continuación, se muestra un ejemplo de una tira de vía donde se visualiza el esquema de los elementos de la estación (**Figura 1**).



**Figura 1.** Tira de vía de la estación de Sant Vicenç de Castellet (Cataluña, España).

2. **Material Rodante:** Incluye los trenes (**Figura 2**) y vagones que circulan por las vías. Estos vehículos están diseñados para maximizar la eficiencia energética y el confort de los pasajeros, así como para transportar mercancías de manera segura.



**Figura 2.** Ejemplo de un tren de alta velocidad.

3. **Sistemas de Control y Señalización (Figura 3):** Estos sistemas aseguran que los trenes puedan operar de manera coordinada y segura. Incluyen señales de tráfico ferroviario, enclavamientos y sistemas de bloqueo que regulan el flujo de trenes y previenen colisiones.



**Figura 3.** Ejemplo de un puesto de mando central donde se controla todo el flujo de trenes de varias estaciones.

4. **Estaciones y Terminales:** Son los puntos de partida y llegada para pasajeros y mercancías. Las estaciones modernas están equipadas con tecnologías avanzadas para facilitar la operación eficiente y brindar servicios de alta calidad a los usuarios.

### 1.1.3 Seguridad en el Transporte Ferroviario

La seguridad es una preocupación primordial en el transporte ferroviario. Diversas agencias y organismos internacionales, como la Agencia Estatal de Seguridad Ferroviaria en España, establecen normativas y directrices para asegurar que todas las operaciones se realicen con los más altos estándares de seguridad. Estas normativas incluyen regulaciones específicas para el mantenimiento de las vías, la operación de trenes y la implementación de sistemas de control.

### 1.1.4 Innovaciones Tecnológicas

La modernización del sector ferroviario ha sido impulsada por avances en diversas áreas tecnológicas. La automatización y el uso de inteligencia artificial están transformando la manera en que los trenes operan y se gestionan. La implementación de sistemas de control basados en software y la utilización de sensores avanzados permiten una supervisión en tiempo real y una respuesta rápida ante cualquier eventualidad.

El desarrollo de trenes de alta velocidad y sistemas de transporte urbano rápido también ha sido posible gracias a estas innovaciones. Estos avances no solo mejoran la eficiencia del transporte, sino que también contribuyen a reducir el impacto ambiental al promover un uso más sostenible de la energía.

## 1.2 ¿Qué es un enclavamiento y un bloqueo ferroviario?

En el ámbito ferroviario, la seguridad y eficiencia del transporte dependen en gran medida de los sistemas de enclavamiento y bloqueo. Estos sistemas son fundamentales para asegurar que los trenes puedan circular sin riesgo de colisiones y para garantizar el uso óptimo de la infraestructura ferroviaria.

### 1.2.1 Definición y Función de los Enclavamientos

Los enclavamientos son sistemas que coordinan y controlan los elementos de una estación ferroviaria, asegurando que los desvíos y señales operen en sincronía para permitir el paso seguro de los trenes. Un enclavamiento se compone de tres partes principales: el puesto de mando, el enclavamiento vital y los objetos de campo.

1. **Puesto de mando (Figura 4):** Es la interfaz donde el operador controla y supervisa los itinerarios de los trenes. Desde aquí se envían órdenes para establecer y disolver itinerarios, y se visualiza el movimiento de los trenes. El operador tiene la responsabilidad de configurar las rutas de los trenes, verificar que todas las condiciones de seguridad se cumplan y resolver cualquier incidencia que pueda surgir durante la operación.

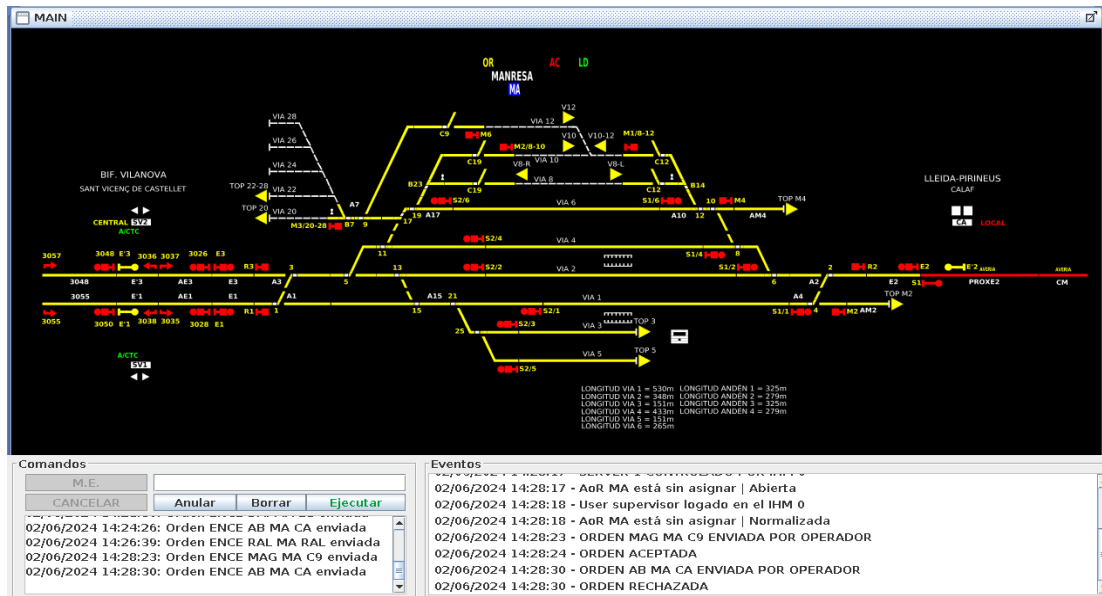


Figura 4. Puesto Local de la estación de Manresa (Cataluña, España).

2. **Enclavamiento vital:** Recibe y verifica las órdenes del puesto de mando, ejecutando las acciones necesarias en el campo. Este componente asegura que todas las señales y desvíos se ajusten correctamente y confirma al puesto de mando que las acciones se han completado de manera segura. El enclavamiento vital opera bajo principios de seguridad estrictos, garantizando que cualquier fallo en el sistema no pueda comprometer la seguridad del tráfico ferroviario.



Figura 5. Estructura de un enclavamiento

3. **Objetos de campo:** Incluyen elementos como señales y desvíos que realizan las órdenes recibidas del enclavamiento y devuelven confirmaciones de su estado. Estos objetos son esenciales para la operación del sistema, ya que permiten la implementación física de las órdenes emitidas desde el puesto de mando y el enclavamiento vital.

Con la evolución tecnológica, los enclavamientos han avanzado desde sistemas mecánicos a sistemas electrónicos y ahora a sistemas informáticos altamente sofisticados. Los enclavamientos electrónicos actuales incorporan módulos de alta seguridad que operan en tiempo real, siguiendo normas europeas

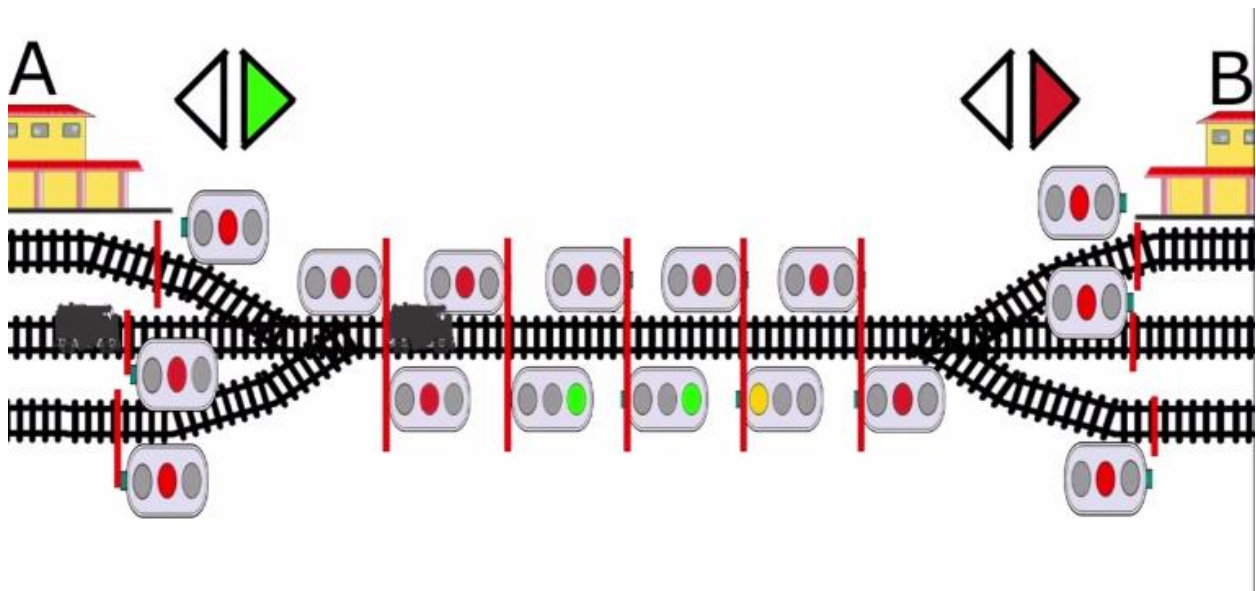


estrictas como la **EN 50128**, que establece los requisitos para la seguridad de los sistemas electrónicos programables utilizados en aplicaciones ferroviarias.

### 1.2.2 El Bloqueo

El bloqueo (**Figura 6**) se refiere a la gestión de tramos de vía entre estaciones, llamados cantones, donde el control es automático y no requiere intervención humana. El propósito del bloqueo es evitar que dos trenes entren simultáneamente en el mismo cantón, lo que se logra mediante circuitos de vía y señales automáticas que detectan y controlan la ocupación de la vía.

Existen varios tipos de sistemas de bloqueo, incluyendo el bloqueo automático en vía única y el bloqueo automático en doble vía. En el bloqueo automático en vía única, se permite la circulación de trenes en ambas direcciones, controlando estrictamente el acceso a cada cantón para prevenir colisiones frontales. En el bloqueo automático en doble vía, cada vía se destina a una dirección de circulación, simplificando el control y aumentando la capacidad de la línea.



**Figura 6.** Ejemplo práctico de un bloqueo automático entre 2 estaciones A y B. En el cual se puede visualizar como las señales controladas por el enclavamiento dan paso al tren de un lado a otro en condiciones seguras.

### 1.2.3 Evolución y Seguridad en los Sistemas de Enclavamiento

La transición de sistemas de enclavamiento mecánicos (**Figura 7**) y eléctricos a electrónicos (**Figura 8**) ha permitido una mejora significativa en la seguridad y eficiencia del control ferroviario. Los primeros puestos de mando electrónicos y sistemas de telemando fueron innovaciones clave que aseguraron niveles de seguridad más altos que los enclavamientos eléctricos tradicionales.



**Figura 7.** Enclavamiento mecánico, capaz de manejar señales, desvíos, pasos a niveles...

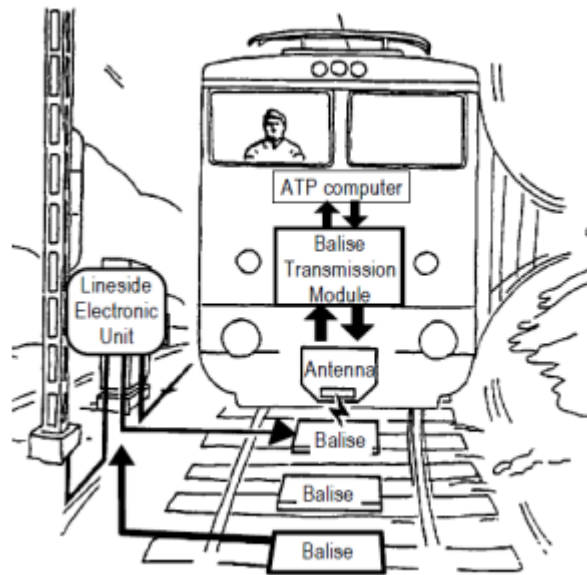


**Figura 8.** Armario de un enclavamiento electrónico, que alberga todas las variables electrónicas responsables de controlar los diversos elementos de la vía en una estación.

En los enclavamientos electrónicos, la lógica de operación se programa en módulos dedicados que supervisan continuamente las posiciones de los desvíos, el estado de las señales y la ubicación de los trenes. La modularidad y el uso de sistemas operativos en tiempo real son características esenciales que

garantizan una operación segura y flexible. Estos sistemas permiten una rápida detección y resolución de fallos, minimizando el riesgo de accidentes y optimizando la eficiencia del tráfico ferroviario.

En la siguiente imagen (**Figura 9**) se puede apreciar cómo el enclavamiento (representado por el armario en la figura) no solo controla los elementos de la vía, como señales, desvíos y pasos a nivel, sino que también transmite información al tren a través de balizas (**Figura 10**).



**Figura 9.** Comunicación ERTMS nivel 1, enclavamiento-tren.



**Figura 10.** Balizas (Transmiten al tren el estado de las señales).

### 1.2.4 Importancia de los Objetos de Campo

Los objetos de campo son componentes críticos que realizan las acciones físicas necesarias para el funcionamiento del sistema de enclavamiento. Estos incluyen señales de tránsito, desvíos y otros dispositivos de control en la vía. Su correcto funcionamiento y la capacidad de comunicar su estado al sistema central son fundamentales para la seguridad del tráfico ferroviario.

Las señales de tránsito (**Figura 11**), por ejemplo, son responsables de indicar a los maquinistas si pueden avanzar, detenerse o proceder con precaución. Los desvíos permiten cambiar la ruta de los trenes, facilitando la operación eficiente y segura en estaciones.



**Figura 11.** Señal ferroviaria de salida de una estación, con aspecto verde indicando vía libre al maquinista.

### 1.3 Objetivos de este Trabajo de Fin de Grado.

Este Trabajo de Fin de Grado se enfoca en la automatización del cálculo de la distancia de frenado, basado en los modelos proporcionados por la Agencia Estatal de Seguridad Ferroviaria según la Resolución 2/2021, utilizando macros de Excel.



El modelo técnico especificado abarca trenes con velocidades de inicio de frenado entre 10 y 200 km/h, y considera una declividad (inclinación de la vía) de hasta el 35%. Se distingue entre dos tipos de trenes: Lambda y Gamma. Para los trenes tipo Lambda, el frenado depende de una variable denominada porcentaje de freno ( $\lambda$ ), la cual será detallada en esta memoria, junto con la longitud del tren. Por otro lado, los trenes tipo Gamma dependen de su deceleración y del tiempo de respuesta del maquinista.

La precisión en el cálculo de la distancia de frenado es vital para la seguridad ferroviaria, ya que permite la correcta configuración de los sistemas de enclavamiento y señalización. La automatización de estos cálculos facilita la implementación de enclavamientos más seguros y eficientes, reduciendo el riesgo de errores humanos y mejorando la coordinación del tráfico ferroviario.

El objetivo principal de este TFG ha sido automatizar, mediante el uso de macros de Excel, los dos modelos más relevantes de cálculo de distancia de frenado para *trenes Lambda* (distancias de frenado de emergencia en condiciones nominales y degradadas). Para ello, se ha desarrollado una interfaz que facilita la interacción entre el usuario y el software, proporcionando resultados normalizados de acuerdo con las entradas especificadas por el usuario. Esta automatización es esencial para garantizar que los sistemas de enclavamiento y señalización operen con la máxima precisión y seguridad, haciendo que este trabajo cobre un sentido crucial en el contexto de la operación ferroviaria.

En conclusión, el mundo ferroviario es un campo dinámico y en constante evolución que combina tradición e innovación para ofrecer soluciones de transporte seguras, eficientes y sostenibles. Este trabajo se inserta en este contexto, contribuyendo a mejorar la precisión y eficacia en el cálculo de distancias de frenado, un aspecto crítico para la seguridad ferroviaria.

### 1.3.1 ¿Cómo surgió esta idea de TFG? ¿A qué me dedico?

Desde que comencé en el sector ferroviario hace dos años y medio, dejando atrás mi carrera en la industria, supe que quería centrar mi Trabajo de Fin de Grado (TFG) en este fascinante campo. La complejidad y la importancia del sector ferroviario captaron mi interés desde el principio, motivándome a profundizar en sus aspectos técnicos y operativos.

A medida que fui adquiriendo conocimientos y experiencia, planteé la idea de mi TFG y, durante este proceso, me hablaron sobre la nueva normativa del documento Resolución 2/2021, “Especificación Técnica de Circulación: Cálculo de Distancias de Frenado” y sobre la idea de automatizar los cálculos relacionados con la distancia de frenado para verificar los documentos originales de los proyectos.

Me pareció un reto apasionante y de gran utilidad práctica, ya que aborda una temática crucial para la seguridad y eficiencia del transporte ferroviario.

Mi carrera profesional ha dado un giro significativo desde mis inicios en la industria hasta mi actual especialización en el sector ferroviario.

En mi trabajo actual, me dedico a testear enclavamientos ferroviarios (**Figuras 4 y 8**) antes de su puesta en servicio, subrayando la importancia de la seguridad en cada etapa del proceso.

Los enclavamientos, que son sistemas críticos para la gestión segura del tráfico ferroviario, se prueban exhaustivamente en laboratorio junto con toda la documentación del proyecto. Este enfoque permite minimizar las pruebas en el campo, detectando y corrigiendo posibles fallos de seguridad en un entorno controlado.

Esta experiencia me ha permitido comprender de primera mano la necesidad de contar con sistemas robustos y confiables que puedan operar sin fallos en un entorno tan crítico como el ferroviario.

Mi rol me ha brindado una visión integral sobre los desafíos y requisitos necesarios para garantizar la operatividad segura y eficiente de estos sistemas. Cada proyecto que gestiono refuerza mi convicción sobre la importancia de una normativa estandarizada y de herramientas automatizadas para asegurar el cumplimiento de dichos estándares.

La idea de automatizar el cálculo de las distancias de frenado no solo se alinea con mi interés personal en mejorar la seguridad ferroviaria, sino que también tiene el potencial de aportar un valor significativo al sector. La automatización facilitaría la verificación y validación de los proyectos ferroviarios de manera más rápida y precisa, asegurando que todos los trenes cumplan con los requisitos de seguridad establecidos en la normativa.

Este proyecto de TFG representa una oportunidad para aplicar los conocimientos teóricos adquiridos durante mi formación a una situación real y práctica dentro del sector ferroviario.

Mi objetivo es desarrollar una herramienta que no solo mejore la seguridad, sino que también optimice los procesos operativos, haciendo que las tareas de verificación sean más eficientes y precisas.

En resumen, mi TFG no solo es una culminación de mis estudios académicos, sino también una contribución práctica y significativa al sector ferroviario. Refleja mi pasión y compromiso con este campo, y mi deseo de seguir avanzando en la búsqueda de soluciones innovadoras que mejoren la seguridad y eficiencia del transporte ferroviario.

# 2 RESOLUCIÓN 2/2021. “ESPECIFICACIÓN TÉCNICA DE CIRCULACIÓN. CÁLCULO DE LA DISTANCIAS DE FRENADO”

---

En este capítulo, nos centraremos en resumir el contenido de este documento. El documento original es técnico y puede resultar tedioso para el lector, por lo tanto, nuestro objetivo será presentar la información de manera más práctica y accesible.

## 2.1 Introducción y Contexto

El documento *"Especificación Técnica de Circulación: Cálculo de Distancias de Frenado"* aborda una temática esencial para el sector ferroviario, enfocándose en la elaboración de una metodología unificada y estandarizada para el cálculo de las distancias de frenado. Esta especificación es crucial no solo para la seguridad de los pasajeros y mercancías, sino también para la eficiencia y confiabilidad del servicio ferroviario en general.

La importancia de una Especificación Unificada radica en que el sector ferroviario enfrenta la diversidad de condiciones operativas, con trenes que varían en velocidad, carga y tecnología de frenado. Esta diversidad puede llevar a inconsistencias si no existe un criterio unificado para el cálculo de distancias de frenado, lo cual afecta tanto la seguridad como la eficiencia operativa. Esta especificación técnica surge para llenar ese vacío, ofreciendo un marco normativo que asegura que todas las partes involucradas en la operación ferroviaria apliquen los mismos estándares.

Históricamente, las normas y métodos de cálculo de distancias de frenado han evolucionado considerablemente. Desde los primeros sistemas de frenado manuales hasta los modernos sistemas de frenado automático y controlados por computadora, la tecnología ha avanzado, y con ella, la necesidad de actualizar y estandarizar los procedimientos de cálculo. Este documento se inserta en esta evolución, proponiendo una metodología actualizada que incorpora los últimos avances tecnológicos y mejores prácticas del sector.

La especificación técnica se justifica a partir de diversos estudios y análisis que demuestran la necesidad de unificar los criterios de cálculo de distancias de frenado. Se han revisado casos de accidentes ferroviarios donde la falta de un método estandarizado contribuyó a los incidentes. Estos casos subrayan la importancia de contar con una especificación clara y coherente que pueda ser aplicada de manera uniforme en todas las operaciones ferroviarias.

## Conceptos básicos de frenado ferroviario

En el año 2021, la Agencia Estatal de Seguridad Ferroviaria del estado español (AESF) basándose en los criterios establecidos en las normas europeas de frenado publicó una especificación técnica de cálculo de distancias de frenado, denominada ETC FR, la cual permite modelizar mediante una serie de fórmulas matemáticas la distancia de frenado de un tren. Es una norma de gran calidad, bien presentada y explicada, así como con ejemplos y múltiples tablas de resultados que permiten su mejor entendimiento y aplicación. Es sin duda un documento imprescindible para poder profundizar en los conceptos de la modelización del frenado ferroviario según los últimos criterios existentes en Europa al respecto.

Vamos a resumir, a continuación, los conceptos más importantes de dicha norma para facilitar la comprensión de esta memoria: ([véase Ref. 16])

- Porcentaje de peso freno.
- Regímenes de frenado.
- Trenes Lambda y trenes Gamma

### 2.1.1 El porcentaje de peso freno de un tren

Dada la dificultad de modelizar matemáticamente el frenado de los trenes, desde la UIC (Unión Internacional de ferrocarriles) se fomentó el uso del concepto de peso freno. El peso freno es una medida de la capacidad de frenado que tienen las composiciones ferroviarias. A través de diversos cálculos y ensayos de campo los fabricantes determinan la capacidad de frenado de un tren y lo expresan en un % por ciento del peso de dicho tren. Los trenes de alta velocidad suelen tener los mayores porcentajes de peso freno (superiores al 150%), seguidos de los trenes de viajeros convencionales (superiores al 100%); por último, figuran los trenes de mercancías, a los que se suele exigir porcentajes de peso freno mínimos superiores al 65%.

Cuanto menor sea el porcentaje de peso freno de un tren, menor será su fuerza de frenado. Por ello, necesitará más longitud para poder frenar. Los administradores de infraestructuras determinan el porcentaje mínimo de peso freno que ha de tener un tren para circular por una determinada línea ferroviaria, en función de las características geométricas de dicha línea, principalmente las pendientes y las velocidades de explotación. Un tren con bajo porcentaje de peso freno en una línea con elevadas pendientes podría requerir una longitud de frenado excesiva, lo que no haría viable la circulación de ese tren concreto en esa línea ferroviaria.

### 2.1.2 Regímenes de frenado

Los trenes pueden tener diversas posiciones en su sistema de frenado, lo que implica que frenarán con más o menos porcentaje de peso freno. No siempre interesa que un tren frene a su máxima capacidad. Un tren de viajeros que frenara con exceso de potencia de frenada causaría gran discomfort en los viajeros



e incluso alguna situación potencialmente peligrosa. Por otra parte, un tren de mercancías que frenara de golpe y de forma excesiva podría provocar movimientos de la carga. Sin embargo, si un tren va a circular a velocidades altas por una línea ferroviaria tendrá que implementarse su régimen de frenado superior para que las longitudes de frenado no sean excesivas. Los regímenes de frenado más habituales son: G/M (mercancías), P/V (viajeros); R (viajeros alta potencia).

### 2.1.3 Modos y distancias de frenado

La norma de frenado considera dos modos de frenado posible en función del nivel de seguridad en la respuesta del freno:

- **Frenado de emergencia (FdE):** es el modo de frenado de mayor nivel de seguridad. Activa la capacidad máxima de frenado del tren hasta su parada.
- **Frenado de servicio (FdS):** es el modo de frenado habitual. Permite al maquinista disminuir la velocidad del tren hasta hasta otra velocidad inferior o hasta parada. Este tipo de modo de frenado permite su regulación mientras se está aplicando.

Estos dos modos de frenado dan lugar a tres tipos de distancias de frenado con longitudes diferentes.

- La **distancia de frenado de emergencia en condiciones nominales:** es la distancia que necesita un tren para detenerse por completo en condiciones *óptimas y controladas*, tras activar el freno de emergencia.
- La **distancia de frenado de emergencia en condiciones degradadas:** es la distancia requerida para detener el tren en condiciones *reales menos favorables*, donde pueden influir factores como el desgaste de los frenos, fallos en el sistema, o condiciones ambientales adversas. La principal diferencia entre ambas distancias radica en el **factor de corrección** que se aplica para ajustar la distancia nominal a las condiciones degradadas, considerando estos posibles inconvenientes.
- La **distancia de frenado de servicio:** es la distancia necesaria para la detención de un tren con unas determinadas prestaciones de frenado usando el freno de servicio.

### 2.1.4 Trenes tipo Lambda y trenes tipo Gamma

Esta denominación se refiere a la manera de expresar las prestaciones de frenado de un tren. En los trenes tipo Lambda las prestaciones se expresan mediante su porcentaje de peso freno. En los trenes tipo Gamma las prestaciones se expresan mediante las deceleraciones. Los trenes de composición variable se suelen tratar como trenes tipo Lambda. Así:

- **Trenes Lambda:** Las prestaciones de frenado de estos trenes se expresan mediante un porcentaje de peso freno ( $\lambda$ ), definido conforme a la [Ref. 11], y varía en función del régimen de frenado (P o G) y de la longitud de la composición. Esta categoría incluye trenes de composición variable, trenes autopropulsados y otros trenes indeformables con velocidad máxima nominal ( $V_{max}$ ) igual o inferior a 200 km/h.
- **Trenes Gamma:** Las prestaciones de frenado de estos trenes se definen exclusivamente mediante perfiles de deceleración ( $a_e$ ) y tiempos de respuesta equivalente ( $t_e$ ) de la FdE. No presentan restricciones genéricas en cuanto a su  $V_{max}$ , longitud, tipo de carga o régimen de frenado. Sin embargo, para velocidades menores o iguales a 200 km/h, será necesario calcular un " $\lambda$  estimado" para el cálculo de las distancias de FdE en condiciones degradadas y de FdS, lo que implica que eventualmente puedan ser tratados como trenes Lambda

## 2.2 Capítulo 1: Antecedentes y Justificación

El primer capítulo del documento profundiza en la justificación de la especificación técnica mediante una revisión exhaustiva de la literatura existente. Se analizan diversos estudios que abordan el tema de las distancias de frenado en el ámbito ferroviario, destacando las deficiencias de los métodos actuales. Esta revisión incluye investigaciones académicas, informes de accidentes y estudios de caso que ilustran los problemas asociados a la falta de estandarización.

En dicho Capítulo, se presentan varios casos históricos de accidentes ferroviarios donde la distancia de frenado jugó un papel crucial. Estos casos se analizan en detalle para identificar las causas subyacentes y cómo una especificación técnica unificada podría haber mitigado o prevenido estos incidentes. Se discuten ejemplos específicos, como colisiones y descarrilamientos, proporcionando una perspectiva clara de los riesgos asociados a la falta de una normativa estandarizada.

A partir de los estudios y análisis presentados, se concluye la necesidad imperiosa de un método estandarizado para el cálculo de distancias de frenado. Este método no solo mejora la seguridad operativa, sino que también optimiza la eficiencia y la confiabilidad del servicio ferroviario. La especificación técnica propuesta en el documento aborda estas necesidades, ofreciendo una solución integral y actualizada.

## 2.3 Capítulo 2: Objeto y Ámbito de Aplicación

El segundo capítulo del documento tiene como objetivo principal establecer un método estandarizado para el cálculo de las distancias de frenado en el sistema ferroviario. Este método está diseñado para ser aplicable a todos los trenes que operan a velocidades superiores a 120 km/h, tanto de pasajeros como de mercancías. La especificación técnica define claramente los procedimientos y criterios que deben seguirse para asegurar una aplicación coherente y uniforme.

El ámbito de aplicación de la especificación es amplio y abarca diversas situaciones operativas. Se detallan las condiciones específicas bajo las cuales la normativa debe ser implementada, incluyendo diferentes tipos de trenes, condiciones de la vía y escenarios operativos. Se presentan ejemplos prácticos y escenarios hipotéticos para ilustrar cómo la especificación puede ser aplicada en diferentes contextos, desde trenes de alta velocidad hasta trenes de carga pesada.

Para asegurar una comprensión clara y práctica del ámbito de aplicación, el documento incluye una serie de escenarios prácticos e hipotéticos. Estos escenarios detallan situaciones operativas comunes y cómo la especificación técnica se aplicaría en cada caso. Por ejemplo, se discuten situaciones de frenado en pendientes pronunciadas, operaciones en condiciones climáticas adversas y la integración de nuevos sistemas de frenado en trenes existentes.

## 2.4 Capítulo 3: Definiciones y Terminología

Este capítulo proporciona un glosario exhaustivo de términos técnicos utilizados en el documento. Cada término es explicado en detalle para asegurar que todos los lectores, independientemente de su nivel de experiencia técnica, comprendan los conceptos clave. Se incluyen definiciones de términos como "frenado de emergencia", "frenado de servicio", "velocidad inicial", "velocidad final" y " $\lambda$  equivalente".

Además de las definiciones, se discuten las implicaciones operativas de cada término. Por ejemplo, se explica cómo el concepto de "frenado de emergencia" se aplica en situaciones críticas y qué protocolos deben seguirse. Se incluyen ejemplos prácticos y gráficos que facilitan la comprensión de estos términos en el contexto del cálculo de distancias de frenado.

Se exploran las relaciones entre los diferentes conceptos y cómo se interrelacionan en el proceso de cálculo de distancias de frenado. Esta sección asegura que los lectores no solo comprendan los términos individualmente, sino también cómo se integran en un marco operativo cohesivo. Se presentan diagramas y esquemas que ilustran estas relaciones y cómo influyen en el cálculo final.

## 2.5 Capítulo 4: Modos y Regímenes de Frenado

En este capítulo se describen en detalle los diferentes modos y regímenes de frenado. Se diferencian claramente entre el frenado de emergencia y el frenado de servicio, explicando las condiciones bajo las cuales cada uno debe ser utilizado. Se presentan diagramas de flujo que ilustran los protocolos de actuación en diversas situaciones operativas.

Se exploran las condiciones operativas específicas para cada modo de frenado. Por ejemplo, se discuten las situaciones en las que el frenado de emergencia es necesario y los procedimientos que deben seguirse para garantizar una parada segura. Se incluyen ejemplos de diseño de sistemas de frenado y su implementación en trenes modernos, destacando las mejores prácticas y tecnologías actuales.

También se analiza la tecnología que hay detrás de los sistemas de frenado. Se describen los componentes clave de los sistemas de frenado modernos, incluyendo los materiales utilizados, los mecanismos de activación y las tecnologías de control. Se discuten los avances recientes en la tecnología de frenado y cómo estos han mejorado la eficiencia y seguridad operativa.

## **2.6 Capítulo 5: Metodología para el Cálculo de Distancias de Frenado**

En este capítulo se presenta en detalle la metodología propuesta para el cálculo de las distancias de frenado. Se proporcionan fórmulas matemáticas específicas que incorporan diversos factores influyentes, como la velocidad inicial y final del tren, las prestaciones del sistema de frenado y las condiciones de la vía. Se discuten estos factores en profundidad y se explican cómo se integran en las fórmulas de cálculo.

Además, se incluyen estudios de casos y simulaciones que ilustran la aplicación práctica de las fórmulas en situaciones reales. Estos ejemplos prácticos muestran paso a paso el proceso de cálculo de distancias de frenado, destacando las variables clave y los resultados esperados. Se presentan diferentes escenarios operativos y cómo la metodología se adapta a cada uno de ellos, desde trenes de alta velocidad hasta trenes de mercancías pesadas.

Además de las fórmulas y ejemplos prácticos, se discuten las herramientas y software disponibles para realizar estos cálculos de manera eficiente y precisa. Se presentan recomendaciones sobre las mejores herramientas del mercado y cómo pueden ser integradas en las operaciones diarias.

En este capítulo también se proporciona una guía práctica para los profesionales del sector, asegurando que puedan implementar la metodología de manera efectiva.

## **2.7 Capítulo 6: Factores Influyentes en el Cálculo**

Este capítulo ofrece un análisis detallado de los diversos factores que influyen en el cálculo de las distancias de frenado. Se incluyen factores como la velocidad inicial y final del tren, las prestaciones del sistema de frenado (deceleración, tiempo de respuesta) y las condiciones de la vía (pendiente, estado de la vía). Cada factor es discutido en profundidad, destacando su impacto en el cálculo de las distancias de frenado.

Se analizan las condiciones climáticas y ambientales que pueden afectar el rendimiento de frenado, como la lluvia, nieve, hielo y altas temperaturas. Se presentan estudios y simulaciones que muestran cómo estas condiciones influyen en la distancia de frenado y qué medidas pueden tomarse para mitigarlas.

También se aborda la confiabilidad de los sistemas de frenado, incluyendo el mantenimiento regular y la inspección de los componentes clave. Se discuten estrategias para mejorar la confiabilidad, como el uso de materiales avanzados y tecnologías de monitoreo en tiempo real.

## **2.8 Capítulo 7: Implementación y Monitoreo**

Este capítulo proporciona una guía para la implementación de la especificación técnica en las operaciones ferroviarias. Se detallan los pasos necesarios para adoptar las nuevas normas, incluyendo la capacitación del personal y la actualización de los procedimientos operativos.

Se discuten los mecanismos para monitorear y evaluar continuamente la eficacia de la especificación técnica. Se presentan indicadores clave de rendimiento (KPI) y métodos para recopilar y analizar datos operativos. Se enfatiza la importancia de la retroalimentación y la mejora continua en el mantenimiento de altos estándares de seguridad y eficiencia.

Finalmente, en este último capítulo, se explora cómo la especificación técnica puede adaptarse a futuras innovaciones tecnológicas. Se discuten las tendencias emergentes en el sector ferroviario y cómo pueden integrarse en el marco normativo existente para mejorar aún más la seguridad y eficiencia.



# 3 IMPLEMENTACIÓN DEL CÁLCULO DE DISTANCIA DE FRENADO MEDIANTE MACROS EN EXCEL.

En esta sección, nos sumergiremos en la implementación de dos métodos automatizados para calcular la distancia de frenado de un tren. Este proceso se llevará a cabo mediante el uso de macros en Microsoft Excel, donde integraremos segmentos de código de programación en VBA (Visual Basic for Applications).

Nos centraremos específicamente en dos modalidades de cálculo: la **distancia de frenado de emergencia nominal** y la **distancia de frenado de emergencia degradada**. Estas dos modalidades representan enfoques cruciales para evaluar la seguridad en el contexto ferroviario, con un enfoque exclusivo en los trenes LAMBDA.

Para una mejor comprensión y visualización de estas metodologías, se presentarán imágenes de la interfaz de usuario en Excel, ilustrando los pasos y procesos involucrados en el cálculo de ambas distancias de frenado. Una imagen estará dedicada a la distancia de frenado de emergencia nominal, mientras que la otra mostrará el proceso correspondiente a la distancia de frenado de emergencia degradada.

Estas representaciones visuales complementarán la explicación teórica y práctica, brindando una perspectiva más completa y detallada de nuestro enfoque de análisis y desarrollo en este trabajo de fin de grado. Todo este proceso se ha implementado en un libro de Excel, asegurando la accesibilidad y la facilidad de uso para futuros análisis y aplicaciones prácticas.

## 3.1 ¿Qué contiene el libro de Excel en el que se ha implementado el cálculo de la distancia de frenado automatizado?

El libro de Excel que alberga los cálculos de la distancia de frenado se compone de las siguientes pestañas:

- **Pestaña "Distancia de Frenado Nominales"**: Aquí, se presenta una interfaz intuitiva (**Figura 12**) que conduce a través del proceso de cálculo de la distancia de frenado en condiciones nominales. Desde la introducción de parámetros hasta la visualización de resultados detallados, esta sección proporciona una comprensión exhaustiva de los aspectos fundamentales relacionados con la seguridad ferroviaria.

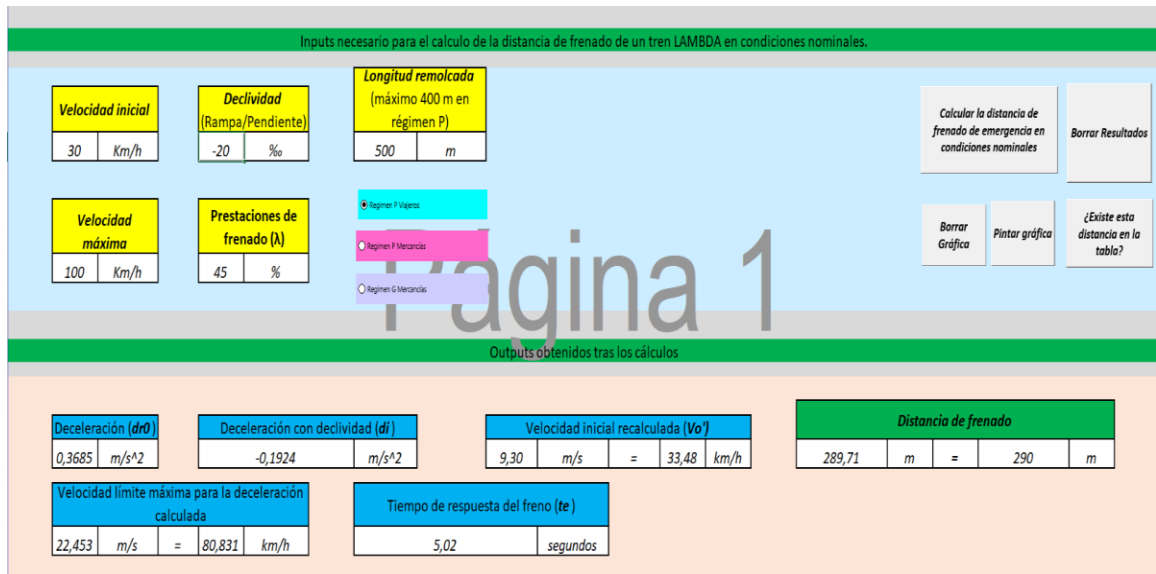
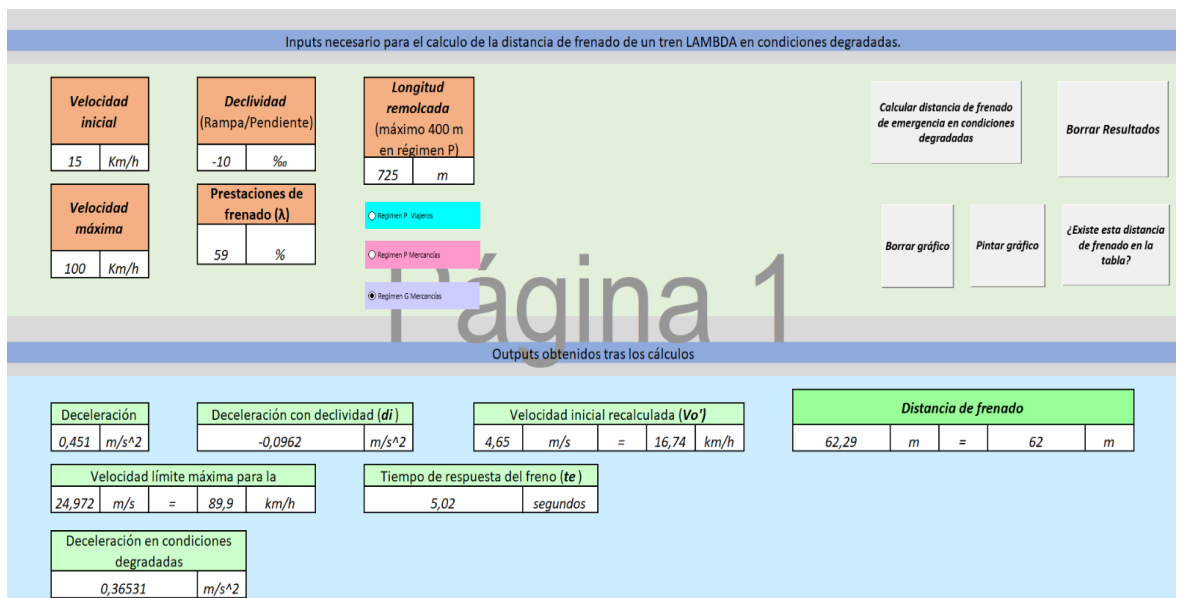


Figura 12. Interfaz Usuario-Excel para el cálculo de distancias de frenado en condiciones nominales.

- Pestaña "Distancia de Frenado Degradadas":** Siguiendo un diseño y funcionalidad similares a la pestaña anterior, esta sección se centra en calcular con precisión la distancia de frenado en condiciones degradadas. Aquí, se pueden introducir parámetros relevantes (Figura 13) y obtener resultados precisos incluso en situaciones menos ideales.





**Figura 13.** Interfaz Usuario-Excel para calculo de distancias de frenado en condiciones nominales.

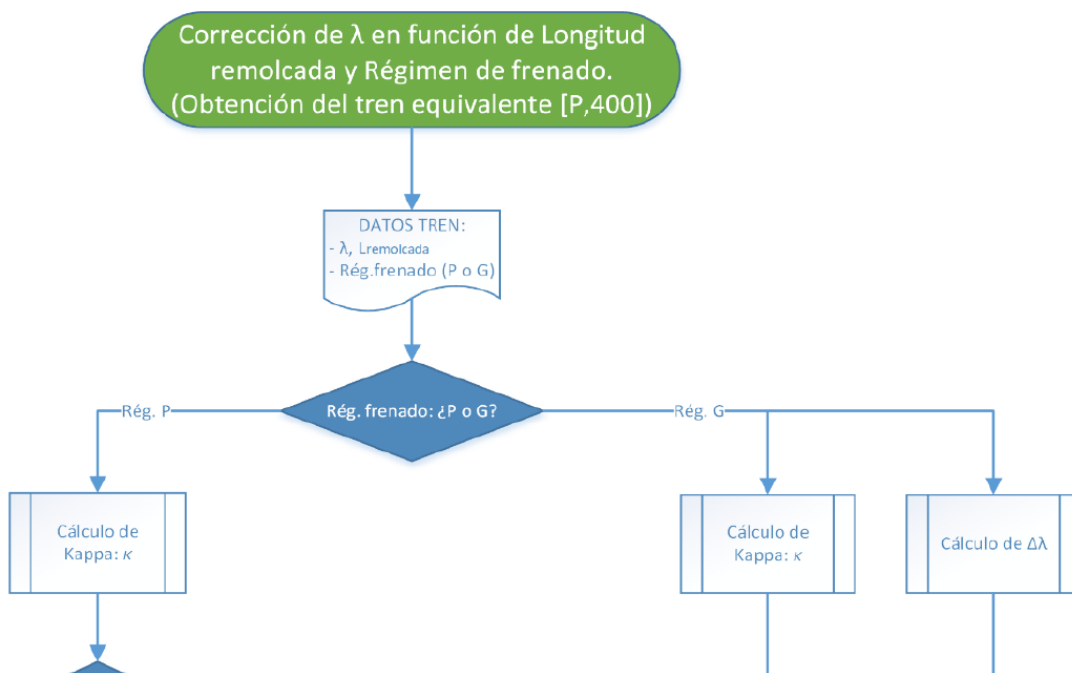
Además de estas pestañas principales, se encuentran una serie de recursos adicionales que complementan la experiencia de análisis:

- **Factor Kappa:** Explora la influencia del factor Kappa en los cálculos, junto con esquemas de corrección  $\lambda$  por longitud y régimen de frenado (**Figura 14a, Figura 14b, Figura 14c y Figura 14d**).

Pero ¿qué es realmente el factor Kappa?

El factor Kappa ( $\kappa$ ) es un coeficiente que se utiliza para ajustar las prestaciones de frenado de un tren en función de la longitud de su composición. Cuando la longitud del tren supera un cierto umbral, el factor Kappa reduce las prestaciones de frenado para asegurar que el tren tenga un comportamiento de frenado equivalente a un tren más corto. Por ejemplo, si un tren de mercancías en régimen de frenado P tiene una longitud mayor a 500 metros, se aplica un factor Kappa para ajustar su capacidad de frenado como si fuera un tren de 500 metros.

Este ajuste es crucial para mantener la seguridad y eficiencia en los cálculos de frenado de trenes de diferentes longitudes



**Figura 14a.** Esquema de la corrección  $\lambda$  (Parte 1)

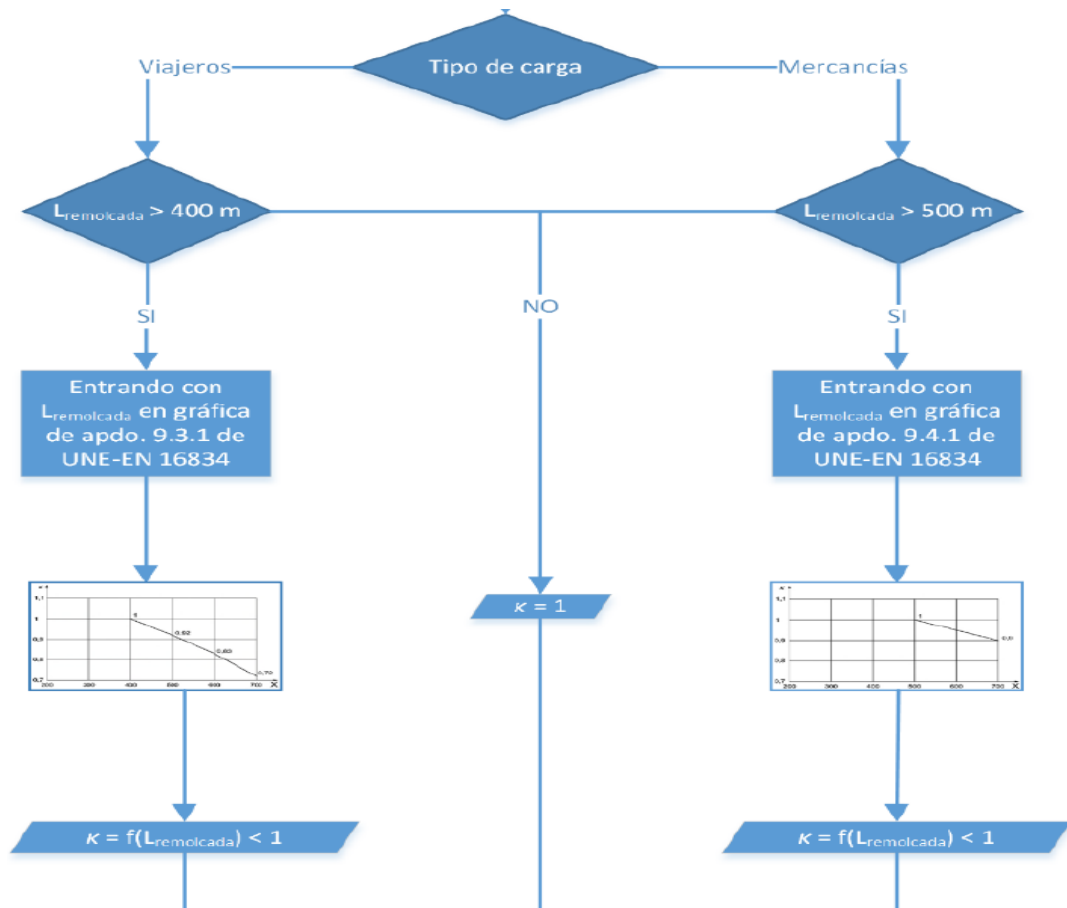


Figura 14b. Esquema de la corrección  $\lambda$  (Parte 2)

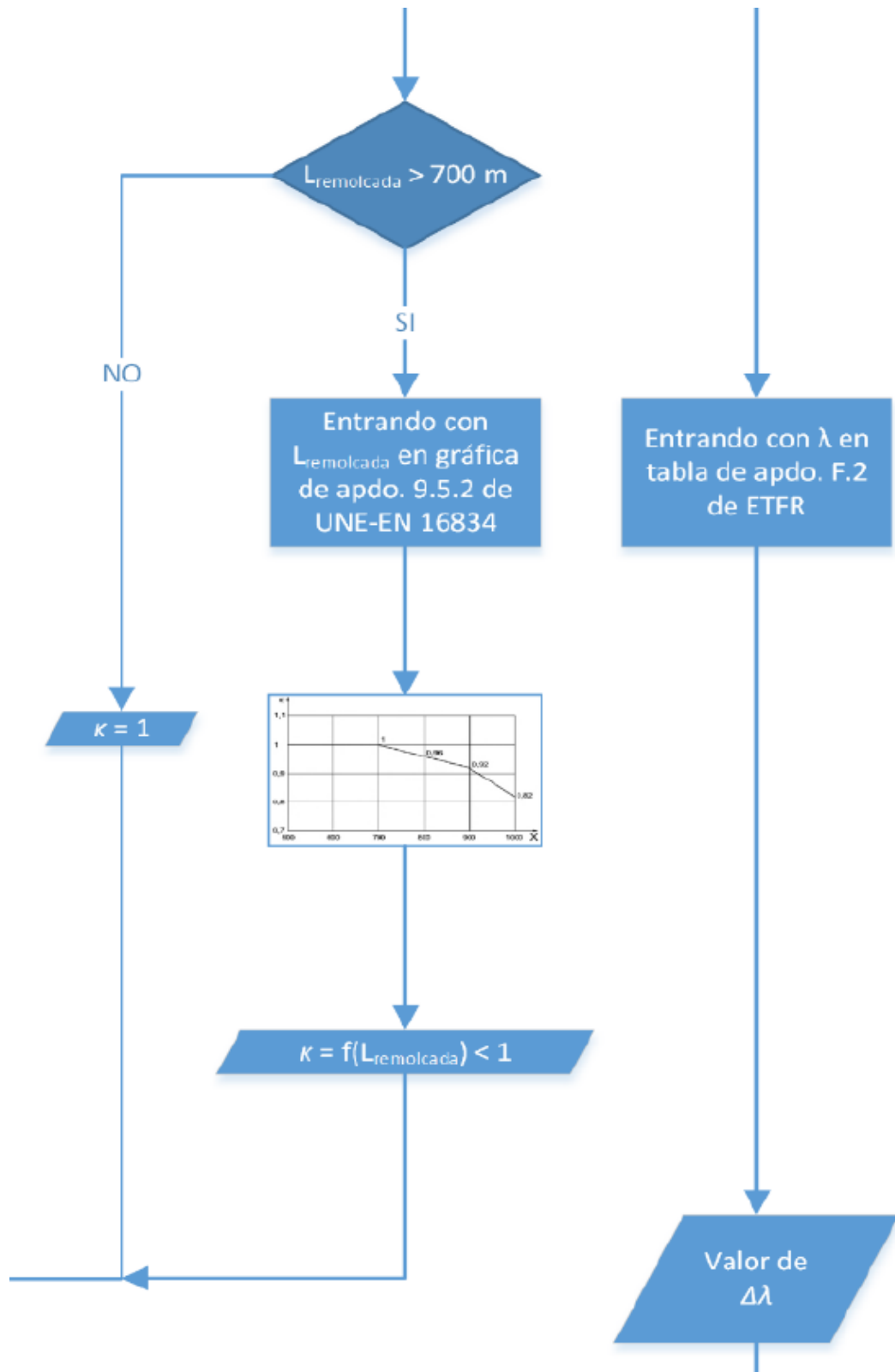


Figura 14c. Esquema de la corrección  $\lambda$  (Parte 3)

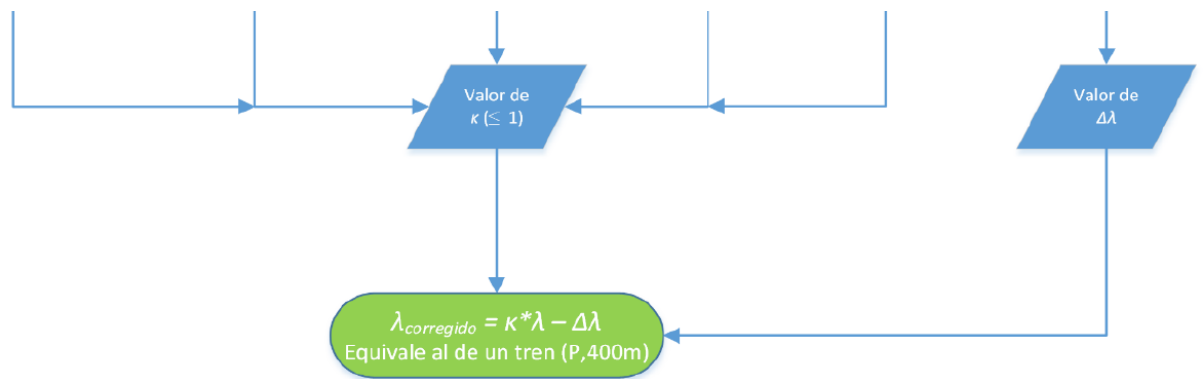


Figura 14d. Esquema de la corrección λ (Parte 4)

- **Factor de Corrección:** Detalla el factor de corrección aplicado en los cálculos para obtener una comprensión completa del proceso (Figura 15).

**Factor de corrección en condiciones nominales**

Para los dos tipos de trenes considerados, Lambda y Gamma las distancias de FdE en condiciones nominales se obtienen **sin aplicar ningún factor de corrección**, ni a las deceleraciones (ae), ni al tiempo de respuesta equivalente del freno (te).

**Factor de corrección en condiciones degradadas**

Para los dos tipos de trenes considerados, las distancias de FdE en condiciones degradadas se obtienen aplicando a las deceleraciones y al tiempo de respuesta equivalente del FdE, los siguientes factores de corrección:

Velocidad instantánea (km/h)	$K_{t\_int}$	$K_{r\_int} * K_{v\_int}$
≤ 160	1	0,81
> 160	1	0,7

Esto significa que para los trenes que inicien frenada desde una velocidad superior a 160 km/h, las deceleraciones aplicables por encima de dicha velocidad se multiplicarán por 0,70, mientras que las que apliquen desde 160 km/h para abajo, se multiplicarán por 0,81

Figura 15. Detalle del factor de corrección aplicado.

- **Tablas de Distancia de Frenado Nominales (Figura 16) /Degradadas:** Accede a valores normalizados de distancia de frenado para diferentes parámetros, proporcionando una referencia clara y concisa.

C.1. TABLA 1. DISTANCIAS DE FRENO DE EMERGENCIA EN CONDICIONES NOMINALES: TRENES DE TIPO LAMBDA (P,400)

VELOCIDAD (km/h)	80	80	80	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
35	71	117	174	241	309	381	457	536	607	685	766	854	954	1048	1139	1227	1310	1401
40	82	129	196	273	350	428	506	584	654	733	816	904	1006	1102	1195	1287	1379	1482
45	94	142	219	306	393	471	550	628	707	791	874	966	1070	1171	1271	1371	1474	1587
50	107	157	244	341	438	535	632	730	828	930	1030	1130	1240	1348	1456	1564	1674	1788
55	121	173	269	376	483	590	697	805	914	1020	1130	1240	1360	1478	1596	1714	1834	1956
60	136	190	296	413	530	647	764	882	1000	1120	1240	1370	1500	1630	1760	1890	2020	2150
65	152	208	324	451	578	705	832	960	1088	1220	1360	1500	1650	1800	1950	2100	2250	2400
70	169	227	353	490	627	764	901	1038	1180	1330	1480	1640	1800	1960	2120	2280	2440	2600
75	187	247	383	530	677	824	971	1118	1270	1430	1600	1770	1950	2130	2310	2490	2670	2860
80	206	268	413	576	740	904	1068	1240	1420	1610	1800	2000	2200	2400	2610	2820	3030	3250
85	226	290	444	627	800	974	1148	1330	1520	1720	1930	2150	2380	2620	2860	3100	3350	3600
90	247	313	486	679	862	1046	1230	1420	1620	1830	2050	2280	2520	2770	3020	3270	3530	3790
95	269	337	520	730	924	1118	1312	1520	1730	1950	2180	2420	2670	2930	3190	3450	3720	3990
100	293	363	564	786	1000	1214	1438	1670	1910	2160	2420	2690	2970	3250	3540	3830	4130	4430
105	318	390	618	852	1086	1320	1560	1810	2070	2340	2620	2910	3210	3520	3830	4140	4460	4780
110	344	418	681	936	1190	1450	1700	1970	2240	2530	2830	3140	3460	3790	4120	4460	4810	5160
115	371	447	745	1014	1300	1580	1840	2120	2410	2720	3040	3370	3710	4060	4410	4770	5130	5500
120	400	478	816	1116	1430	1740	2020	2320	2630	2960	3310	3670	4040	4420	4810	5200	5600	6000
125	430	510	882	1212	1550	1880	2180	2500	2830	3180	3550	3930	4320	4720	5130	5550	5980	6420
130	461	543	963	1326	1700	2060	2380	2730	3080	3460	3850	4260	4680	5110	5550	6000	6460	6930
135	494	578	1050	1458	1860	2240	2580	2950	3310	3710	4120	4550	5000	5460	5930	6410	6900	7400
140	529	615	1153	1614	2040	2440	2800	3200	3610	4030	4480	4950	5440	5950	6480	7030	7590	8160
145	566	654	1236	1722	2170	2580	2960	3380	3820	4270	4740	5230	5740	6270	6820	7390	7970	8560
150	605	695	1340	1866	2340	2780	3180	3620	4080	4560	5050	5560	6080	6620	7180	7760	8350	8950
155	646	738	1467	2046	2560	3020	3440	3920	4400	4900	5420	5960	6520	7090	7680	8280	8890	9510
160	689	783	1618	2268	2800	3280	3720	4220	4720	5240	5780	6340	6920	7510	8110	8720	9340	9970
165	735	831	1795	2526	3100	3600	4060	4580	5120	5680	6260	6860	7480	8110	8750	9400	10060	10730
170	784	882	1998	2814	3450	4000	4480	4980	5500	6040	6600	7180	7780	8390	9010	9640	10280	10930
175	836	936	2229	3156	3850	4450	4960	5480	6020	6580	7160	7760	8380	8990	9620	10260	10910	11570
180	892	994	2490	3570	4350	5000	5540	6100	6680	7280	7900	8540	9190	9850	10520	11200	11890	12590
185	951	1055	2784	4056	4900	5600	6180	6760	7360	7980	8620	9280	9950	10630	11320	12020	12730	13450
190	1013	1119	3105	4632	5550	6300	6920	7540	8180	8840	9520	10220	10940	11670	12410	13160	13920	14690
195	1079	1187	3465	5310	6300	7100	7760	8420	9100	9800	10520	11260	12020	12790	13570	14360	15160	15970
200	1149	1259	3867	6126	7150	8000	8700	9420	10160	10920	11700	12500	13310	14130	14960	15800	16650	17510

Figura 16. Valores normalizados para una distancia de FdE en condiciones nominales.

- **Tabla % Peso Freno:** Valores de prestaciones de frenado normalizados para evaluar exhaustivamente los resultados (**Figura 17**).

Pero ¿qué es realmente la tabla de porcentaje de peso freno?

La tabla de porcentaje de peso freno es una herramienta que proporciona valores normalizados de las prestaciones de frenado en función del peso del tren. Estos valores son esenciales para evaluar la capacidad de frenado de un tren bajo diversas condiciones operativas.

Por ejemplo, esta tabla ayuda a determinar el rendimiento de frenado necesario para un tren según su carga y la pendiente de la vía. Al analizar diferentes porcentajes de peso freno ( $\lambda$ ) para distintos tipos de trenes y condiciones de operación, se pueden hacer ajustes precisos para mantener los niveles de seguridad y eficiencia.

En la "Especificación Técnica de Circulación: Cálculo de Distancias de Frenado", se incluyen varias tablas de este tipo para diferentes escenarios y tipos de trenes. Estas tablas son fundamentales para asegurar que, independientemente de la carga y las condiciones de operación, el tren pueda frenar de manera segura y efectiva.

Por ejemplo, si un tren de mercancías tiene un porcentaje de peso freno de 70%, se puede utilizar esta tabla para evaluar si este valor cumple con los requisitos de seguridad en diferentes pendientes y velocidades.

Para vehículos de  $V_{max} \leq 120$  km/h

Página 1

$\lambda_{ed.3} \approx \lambda_{ed.6} \approx \lambda_{UNE-EN-16384}$

Para vehículos de  $V_{max} > 120$  km/h

Tabla de estimación de  $\lambda_{UNE-EN 16834} \approx \lambda_{ed.6}$  y  $\lambda_v$  a partir de  $\lambda_{ed.3}$   
(Esta tabla no puede aplicarse para determinar el  $\lambda$  del material rodante de nueva construcción.)

VALORES ESTIMADOS DE  $\lambda_{ed.6}$  y  $\lambda_v$  A PARTIR DE  $\lambda_{ed.3}$

$\lambda_{ed.3}$	$\lambda_{120} \approx \lambda_{ed.6} \approx \lambda_{UNE-EN 16834}$	$\lambda_{130}$	$\lambda_{140}$	$\lambda_{150}$	$\lambda_{160}$	$\lambda_{170}$	$\lambda_{180}$	$\lambda_{190}$	$\lambda_{200}$
80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
81	81	81	81	81	81	81	81	81	81
82	82	82	82	82	82	82	82	82	82
83	83	83	83	83	83	83	83	83	83
84	83	83	84	84	84	84	84	84	84
85	84	84	85	85	85	85	85	85	85
86	85	85	86	86	86	86	86	86	86
87	85	85	87	87	87	87	87	87	87
88	86	86	88	88	88	88	88	88	88
89	87	87	89	89	89	89	89	89	89
90	88	88	90	90	90	90	90	90	90
91	88	88	91	91	91	91	91	91	91
92	89	89	92	92	92	92	92	92	92
93	90	90	93	93	93	93	93	93	93
94	90	90	94	94	94	94	94	94	94
95	91	91	95	95	95	95	95	95	95
96	92	92	96	96	96	96	96	96	96

Figura 17. Tabla % Peso freno.

### 3.2 Cálculo de la distancia de FdE en condiciones nominales

Para automatizar el cálculo de la distancia de frenado de emergencia en condiciones nominales, se ha desarrollado una solución utilizando macros en VBA (Visual Basic for Applications) para Excel, como se ha comentado a lo largo de este trabajo. Este método permite realizar cálculos de manera rápida y precisa, evitando errores manuales y ahorrando tiempo en el proceso. A lo largo de esta sección, detallaremos cómo se ha implementado esta programación y el significado de cada línea de código.

El objetivo es que cualquier lector, independientemente de su nivel de conocimientos en programación, pueda comprender cómo funciona esta automatización. En esta sección se explica paso a paso cada componente del código, desde la configuración inicial hasta la ejecución final, destacando las funciones clave y cómo interactúan entre sí. De esta manera, incluso aquellos con poca o ninguna experiencia en VBA podrán seguir el proceso y entender la lógica detrás del cálculo automatizado de la distancia de frenado de emergencia.

Esta explicación detallada no solo servirá para aclarar el funcionamiento del código, sino también para demostrar la eficiencia y utilidad de las macros en la resolución de problemas complejos. La estructura del código y su lógica serán presentadas de forma clara y didáctica, asegurando que todos los conceptos sean accesibles y comprensibles.

### 3.2.1 Entorno de programación

Antes de detallar el código, línea por línea, es importante familiarizarse con el entorno de programación VBA en Excel.

VBA, o Visual Basic for Applications, es un lenguaje de programación integrado en las aplicaciones de Microsoft Office que permite la automatización de tareas repetitivas y la creación de funciones personalizadas.

Para acceder al editor de VBA en Excel, se debe presionar `Alt + F11`. Al hacer esto, se abre el **Editor de VBA**, que es donde se escribe y edita el código (**Figura 18**). El Editor de VBA está compuesto principalmente por varias partes clave:

1. **Explorador de Proyectos** (Marca verde en la **Figura 18**): Situado en el lado izquierdo, este panel muestra una lista de todos los proyectos VBA abiertos. Cada proyecto corresponde a un libro de Excel. Dentro de cada proyecto, se pueden ver las diferentes hojas de cálculo y módulos.
2. **Ventana de Código** (Marca roja en la **Figura 18**): Esta es la principal área de trabajo donde se escribe y edita el código VBA. Cada módulo, hoja de cálculo o formulario tiene su propia ventana de código.
3. **Módulos** (Marca azul en la **Figura 18**): Los módulos son contenedores para el código VBA. Se pueden crear varios módulos dentro de un proyecto para organizar el código de manera lógica. Por ejemplo, puedes tener un módulo para funciones relacionadas con cálculos de frenado y otro para funciones de interfaz de usuario.

En este caso, el *Módulo 1* contiene el código de programación de la distancia de frenado de emergencia en condiciones nominales, y el *Módulo 2* contiene el código de programación de la distancia de frenado de emergencia en condiciones degradadas.

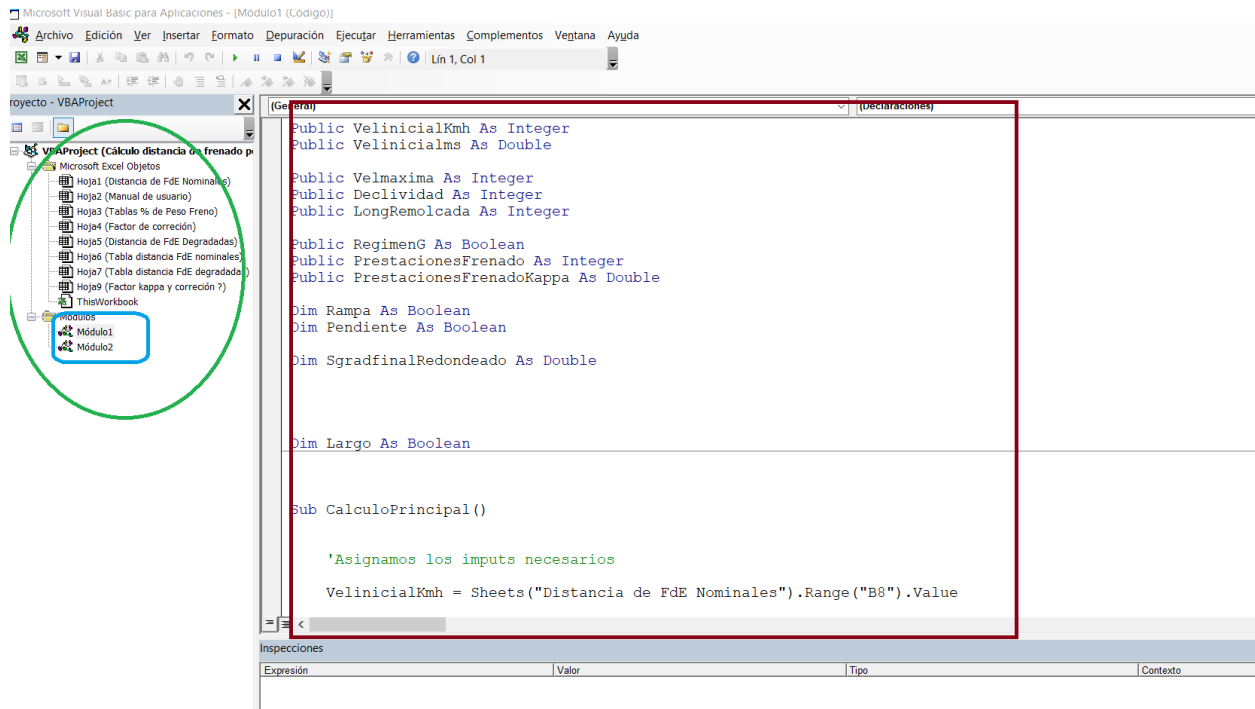


Figura 18. Entorno de programación en Excel.

Posteriormente, nos centraremos en el Módulo 1, el cual contiene la programación para calcular la distancia de frenado de emergencia en condiciones nominales como hemos comentado antes.

### 3.2.2 Lenguaje de programación para distancia de FDE en condiciones nominales.

En primer lugar, se declaran las variables globales (**Figura 19**). Estas variables se declaran como globales para que sean accesibles y utilizables en todas las subrutinas implementadas en el código, tal como sugiere su nombre.

Cada variable global se ha nombrado de manera práctica para asegurar que otros programadores puedan entender fácilmente a qué se refiere cada una.



```
(General)
Public VelinicialKmh As Integer
Public Velinicialms As Double

Public Velmaxima As Integer
Public Declividad As Integer
Public LongRemolcada As Integer

Public RegimenG As Boolean
Public PrestacionesFrenado As Integer
Public PrestacionesFrenadoKappa As Double

Dim Rampa As Boolean
Dim Pendiente As Boolean

Dim SgradfinalRedondeado As Double

Dim Largo As Boolean
```

**Figura 19.** Variables globales.

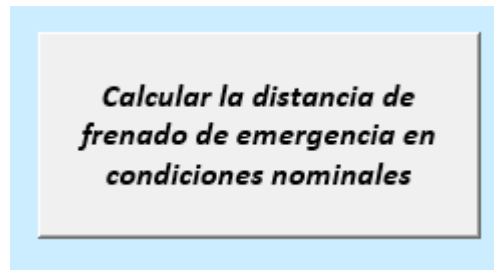
Posteriormente, nos centraremos en nuestra subrutina principal (Sub CalculoPrincipal()) (**Figura 20**). Esta subrutina está asociada al botón principal de nuestra interfaz de usuario del software (**Figura 21**).

En ella se agrupa la gran parte de nuestro código. Debido a su extensión, se explicará paso a paso su contenido para facilitar su comprensión.

```
Sub CalculoPrincipal()

    'Asignamos los imputs necesarios
    VelinicialKmh = Sheets("Distancia de FdE Nominales").Range("B8").Value
    Velmaxima = Sheets("Distancia de FdE Nominales").Range("B14").Value
    Declividad = Sheets("Distancia de FdE Nominales").Range("E8").Value
    PrestacionesFrenado = Sheets("Distancia de FdE Nominales").Range("E14").Value
    LongRemolcada = Sheets("Distancia de FdE Nominales").Range("H8").Value
```

**Figura 20.** Comienzo de la subrutina calculo principal.



**Figura 21.** Boton de la interfaz usuario-software para calcular la distancia.

Como se puede observar, se asignan los inputs (valores de entrada proporcionados por el usuario) introducidos en la interfaz a cada variable para poder trabajar posteriormente con ellas según nuestra conveniencia (**Figura 20**).

Por otro lado, al igual que hicimos con anterioridad al declarar variables globales, ahora se crean variables locales que se utilizarán exclusivamente dentro de nuestra subrutina (**Figura 22**). Cada una de estas variables locales será nombrada de manera práctica para facilitar su comprensión.

```
'Variables locales
Dim Decelerac As Double
Dim DeceleracDeclividad As Double
Dim Vellim As Double
Dim VellimKm As Double
Dim trespuesta As Double
Dim Banderakappa As Boolean

Dim Vincialprimams As Double
Dim VincialprimaKmh As Double
```

**Figura 22.** Variables locales.

Ahora pasamos a abordar la parte central de nuestro código de programación.

Para ello, se divide la solución del problema de cálculo de la distancia de frenado de emergencia en condiciones nominales en 8 pasos detallados. Es importante destacar que texto en el código de color verde entrecomillado, se trata simplemente de un comentario para facilitar al lector su comprensión (no es una instrucción para el software).

### 3.2.2.1 Paso 1.

En este paso, calculamos el porcentaje de peso del freno según el Anexo E, apartados E.3.1 y E.4.3 del documento Resolución 2/2021.

En el libro de Excel, se ha añadido una pestaña comentada previamente que detalla la normativa reducida en una tabla (**Figura 17**). Esta tabla refleja lo siguiente:

- Si la velocidad máxima es menor de 120 km/h, el rendimiento de frenado ( $\lambda$ ) no se modifica, ya que está normalizado según el documento.
- Si la velocidad máxima supera los 120 km/h, se debe ajustar el rendimiento de frenado ( $\lambda$ ).
- Si la velocidad es mayor a 200 km/h, se generará un error, ya que no existen valores normalizados de prestaciones de frenado para velocidades superiores a 200 km/h.

A continuación, se muestra el código implementado para este proceso (**Figura 23a**):

```
'----- PASO 1 -----
'Calculo porcentaje de Peso Freno (Anexo E (Apartados E.3.1 y E.4.3)). Ver Tabla % Freno adjunto en este libro.
'Si la velocidad máxima es menor de 120 Km/h, no habría que modificar la prestaciones de frenado (lambda), al estar normalizado según el documento.
'Si la velocidad máxima es mayor a 120 Km/h, si habría que modificar la prestaciones de frenado (lambda).
If Velmaxima > 120 Or Velmaxima < 200 Then
    Call NormalizaPesodeFreno
End If
If Velmaxima > 200 Then
    MsgBox "Error: No existen valores normalizados de prestaciones de frenado para velocidades superiores a 200 km/h. Por lo cual, no es posible calcular la distancia de frenado con estos imputs.", vbCritical
End If
```

**Figura 23a. Paso 1**

Como se puede observar, cuando la velocidad está entre 120 y 200 km/h, se llama a una subrutina que normaliza el valor de las prestaciones de frenado. A continuación, se presenta dicha subrutina (**Figura 23b**):

```
NormalizaPesodeFreno()
Dim hoja As Worksheet
Dim columnaBusqueda As Range
Dim resultado As Variant 'ya que si da error porque no lo encuentre y lo pongo como entero, daría error

' Definimos la hoja de Excel y la columna donde buscaremos
Set hoja = ThisWorkbook.Sheets("Tablas % de Peso Freno")
Set columnaBusqueda = hoja.Columns("A") ' Columna que quiero buscar

' Buscar el valor en la columna
Set resultado = columnaBusqueda.Find(What:=PrestacionesFrenado, LookIn:=xlValues, LookAt:=xlWhole)

' Comprobar si se encontró el valor
If Not resultado Is Nothing Then
    ' Si se encontro, modificamos el valor de prestaciones de frenado por el correspondiente
    PrestacionesFrenado = hoja.Cells(resultado.Row, columnaBusqueda.Column + 1).Value ' Column + 1 representa la columna siguiente
End If
Sub
```

**Figura 23b. Subrutina Normalizar Peso de Freno.**

La subrutina de la **Figura 23b** está diseñada para actualizar automáticamente el valor de "PrestacionesFrenado" basado en una tabla específica ubicada en la hoja de Excel "Tablas % de Peso Freno".

Esta subrutina funciona primero utilizando la función Find para buscar el valor de PrestacionesFrenado en la columna "A" de dicha hoja. Si encuentra el valor, actualiza PrestacionesFrenado con el valor correspondiente encontrado en la columna siguiente. Esto asegura que los cálculos relacionados con las prestaciones de frenado se basen en datos normalizados y consistentes, optimizando la precisión del software desarrollado.

### 3.2.2.2 Paso 2

En este paso, se modifica el valor de las prestaciones de frenado estando en función del valor del factor Kappa (Apartado 6.1.1 de el documento 2/2021).

Para una mayor comprensión, en el libro de Excel se ha añadido una pestaña llamada "Factor Kappa" (**Figura 14**), en la que se esquematiza de manera visual, los pasos implementados en el siguiente código de programación (**Figura 24**):

```
'Se modifica el valor de las prestaciones de frenado estando en funcion de valor del factor kappa segun el apartado 6.1.1
'Ver Pestaña factor kappa de este libro para más detalle y diagrama k3 al final del documento

Call PViajeros
Call PMercancias
Call GMercancias

PrestacionesFrenadoKappa = PrestacionesFrenado * kappa
Banderakappa = True ' Se ha usado el factor kappa

'Redondeo para que sea un número entero
PrestacionesFrenadoKappa = RedondearConvencional(PrestacionesFrenadoKappa)
'En el caso que haya sido Regimen G habria que hacer la equivalencia a Regimen P
If RegimenG = True Then
    Call EquivalenciaRegimenGaP
End If
```

**Figura 24.** Paso 2

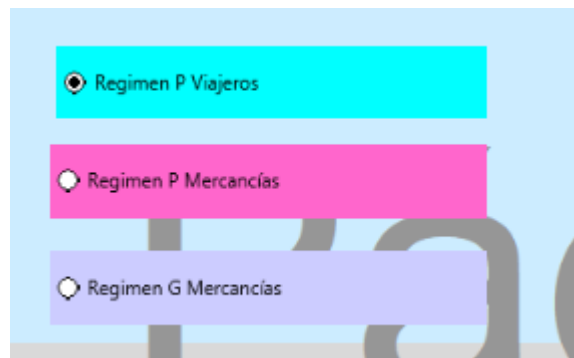
Como se puede observar, primero se llaman a las subrutinas PViajeros, PMercancias y GMercancias, las cuales se activan dependiendo de la opción que el usuario elija en la interfaz (**Figura 25**). Posteriormente, se ajusta el valor de las prestaciones de frenado en función del factor Kappa. Además, se activa una bandera para indicar que dicha prestación de frenado ha sido modificada, ya que este ajuste puede variar según las necesidades específicas del cálculo.

**Finalmente, si se ha utilizado el Régimen G de Mercancías, se llama a la rutina EquivalenciaRegimenGaP (Figura 26).**

Los diferentes regímenes de frenado se utilizan para adaptar la capacidad de frenado del tren según su tipo y carga:

- Régimen P (Viajeros): Optimizado para trenes de pasajeros, permite una mayor capacidad de frenado, asegurando paradas más rápidas.
- Régimen P (Mercancías): Utilizado para trenes de mercancías ligeros o medianos, proporciona una capacidad de frenado equilibrada que es adecuada para cargas que no son extremadamente pesadas.
- Régimen G (Mercancías): Utilizado para trenes de mercancías pesados, donde el frenado se realiza de manera más gradual para evitar daños a la carga y la infraestructura ferroviaria.

Esto se debe a que los cálculos principales están normalizados según el documento oficial con Régimen P, asegurando la coherencia de los resultados según el marco establecido, similar a introducir valores de tiempo en horas en lugar de segundos en una ecuación física.



**Figura 25.** Interfaz tipo de Régimen.

```
Sub EquivalenciaRegimenGaP()  
  
' Verifico primero si el valor está dentro del rango  
If PrestacionesFrenadoKappa < 44 Or PrestacionesFrenadoKappa > 114 Then  
    MsgBox "Porcentaje de peso de freno fuera de rango", vbExclamation, "Error"  
Else  
'Segun los diferentes casos devuelvo una prestacion de frenado en Regimen P (Hago un Select case para las distintas opciones)  
    Select Case PrestacionesFrenadoKappa  
    Case 44  
        PrestacionesFrenadoKappa = PrestacionesFrenadoKappa - 4  
    Case 45 To 54  
        PrestacionesFrenadoKappa = PrestacionesFrenadoKappa - 5  
    Case 55 To 57  
        PrestacionesFrenadoKappa = PrestacionesFrenadoKappa - 6
```

**Figura 26.** Equivalencia Régimen G a Régimen P.

En la **Figura 26**, se puede observar que en primer lugar verificamos que el valor está dentro del rango, si no es así, daría Error. A posteriori, hacemos la equivalencia según el apartado F.2 del documento resolución 2/2021 (**Figura 27**).

**F.2. EQUIVALENCIA ENTRE PORCENTAJES DE PESO FRENO CIRCULANDO EN G Y P**

Tal y como se ha indicado en el apartado anterior, la distancia que necesita un tren para detenerse cuando circula en régimen G es superior a la que necesita, en idénticas condiciones, si circula en régimen P, debido al mayor tiempo de llenado de sus cilindros de freno. De lo anterior se deduce que:

- Un tren con un determinado  $\lambda$ , al circular en régimen G, es como si lo hiciera en régimen P con un  $\lambda$  inferior:  $\lambda_{P \text{ equivalente}} = \lambda_G - \Delta\lambda$
- Para que dos trenes, uno en régimen G y otro en P se detengan en la misma distancia, el primero necesita contar con un  $\lambda$  mayor que el segundo (en igualdad de condiciones):

$$\text{Dist. frenado tren } (G, \lambda_G) \equiv \text{Dist. frenado tren equivalente } (P, \lambda_{P \text{ equivalente}} = \lambda_G - \Delta\lambda)$$

Para estimar el  $\Delta\lambda$ , y a partir de las indicaciones de la [Ref. 01], se ha realizado lo siguiente:

- 1) Se calculan las distancias de FdE en condiciones nominales, en régimen P, desde 30 km/h hasta 100 km/h (máxima velocidad para circular en régimen G por la RFIG, según la [Ref. 04]), para declividades de -20 ‰, -10 ‰, horizontal, +10 ‰ y +20 ‰.
- 2) Con las distancias y velocidades anteriores se entra en las gráficas del apéndice L de la [Ref. 01], que son válidas hasta 700 m de longitud remolcada (máxima permitida en la RFIG), que se asumen válidas para cualquier tipo de zapata. De esta forma se determina el valor de  $\lambda_P$  que necesitaría un tren en régimen G de longitud hasta 700 m para no superar dichas distancias de parada. Dicho valor sería el  $\lambda_{P \text{ equivalente}}$  equivalente a efectos de distancia de frenado al  $\lambda_P$  en cuestión.

A continuación, se muestran las tablas con el  $\Delta\lambda$  que es necesario aplicar a un tren circulando en régimen G, para compensar el mayor tiempo requerido para la actuación plena del freno, de forma que puedan aplicarse las fórmulas de distancias de frenado establecidas en esta ETC para el régimen P.

$\lambda_G$	44%	46%	47%	48%	49%	50%	51%	52%	53%	54%
$\lambda_{P \text{ equivalente}}$	40%	41%	42%	43%	44%	45%	46%	47%	48%	49%
$\Delta\lambda$	+4	+5	+5	+5	+5	+5	+5	+5	+5	+5

$\lambda_G$	56%	57%	59%	60%	62%	63%	65%	66%	68%	69%
$\lambda_{P \text{ equivalente}}$	50%	51%	52%	53%	54%	55%	56%	57%	58%	59%
$\Delta\lambda$	+6	+6	+7	+7	+8	+8	+9	+9	+10	+10

$\lambda_G$	71%	73%	74%	76%	77%	78%	80%	81%	83%	84%
-------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

**Figura 27.** Apartado F2 del documento resolución 2/2021.

Como se puede observar, marcado en rojo, vemos un ejemplo de su equivalencia de régimen G a P.

Para finalizar este paso, explicamos con detalles el contenido de la subrutina cuando marcamos alguna de las opciones contempladas en la **Figura 25**.

- **Subrutina PViajeros**

```
Sub PViajeros()  
  If ActiveSheet.Shapes("Botón de opción 20").ControlFormat.Value = xlOn Then  
    ' Cuando el botón de opción está activado  
  
    If LongRemolcada <= 400 Then  
      kappa = 1  
      RegimenG = False  
    Else  
      kappa = 1 - ((LongRemolcada - 400) / 700) 'Decremento lineal  
      RegimenG = False  
    End If  
  End If
```

**Figura 28.** Subrutina PViajeros.

Cuando seleccionamos la opción *Regimen P Viajeros* activamos la subrutina PViajeros, si la longitud remolcada por el tren (input en nuestra interfaz) es menor que 400 metros, el valor de Kappa es 1, no afectando al valor final de prestación de frenado. Sin embargo, si la longitud remolcada del tren es mayor de 400 metros, el valor Kappa experimenta aproximadamente un decremento lineal.

Para una comprensión más detallada, se amplía el esquema en la **Figura 14b** y se presenta en la siguiente Figura (**Figura 29a**) lo descrito en los párrafos anteriores.

Por último, hay que añadir que la longitud máxima soportada es de 700 metros como se puede apreciar en la grafica de la **Figura 29b**.

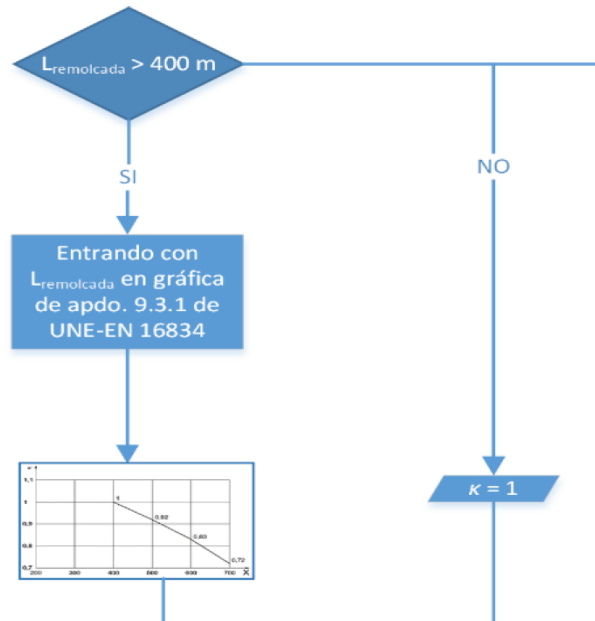


Figura 29a. Esquema cálculo Régimen PViajeros.

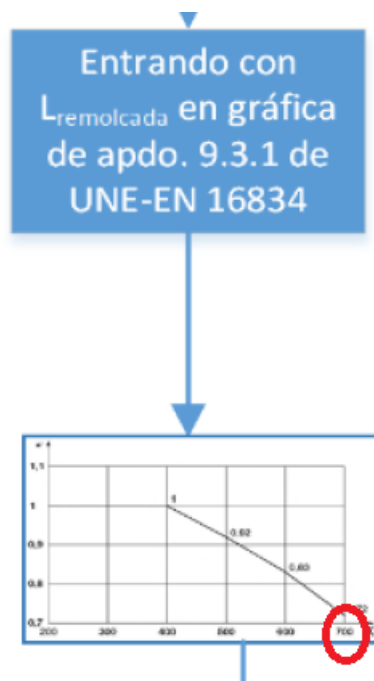


Figura 29b. Gráfica Régimen PViajeros.

- Subrutinas PMercancías



---

```
Sub PMercancias()  
  If ActiveSheet.Shapes("Botón de opción 21").ControlFormat.Value = xlOn Then  
    ' Cuando el botón de opción está activado  
  
    If LongRemolcada <= 500 Then  
      kappa = 1  
      RegimenG = False  
    Else  
      kappa = 1 - ((LongRemolcada - 400) / 700) 'Decremento lineal  
      RegimenG = False  
    End If  
  
  End If  
End Sub
```

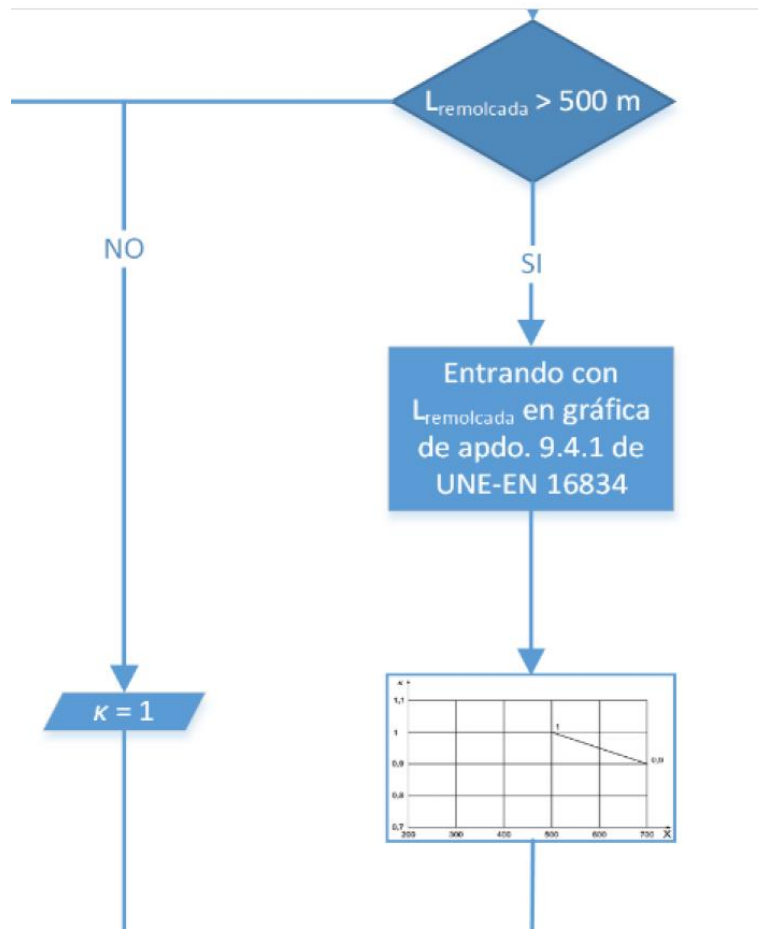
---

**Figura 30.** Subrutina PMercancias.

Continuando con el esquema de la figura 14b. Cuando seleccionamos esta opción (Regimen P Mercancias), si la longitud remolcada por el tren (input en nuestra interfaz) es menor que 500 metros, el valor de Kappa es 1, no afectando al valor final de prestación de frenado. Sin embargo, si la longitud remolcada del tren es mayor de 500 metros, el valor Kappa experimenta aproximadamente un decrecimiento lineal.

Por último, hay que añadir que la longitud máxima soportada es de 700 metros (Como se puede observar en el límite de la gráfica de la **Figura 31**).

Para una comprensión más detallada, se amplía el esquema de la **Figura 14b** y se presenta en la siguiente Figura (**Figura 31**) lo descrito en los párrafos anteriores.



**Figura 31.** Esquema cálculo régimen P Mercancías.

- Subrutina GMercancias

```

Sub GMercancias()
  If ActiveSheet.Shapes("Botón de opción 22").ControlFormat.Value = xlOn Then

    ' Cuando el botón de opción está activado

    If LongRemolcada <= 700 Then
      kappa = 1
      RegimenG = True
    Else
      kappa = 1 - ((LongRemolcada - 700) / 1000) 'Decremento lineal
      RegimenG = True
    End If

  End If
End Sub

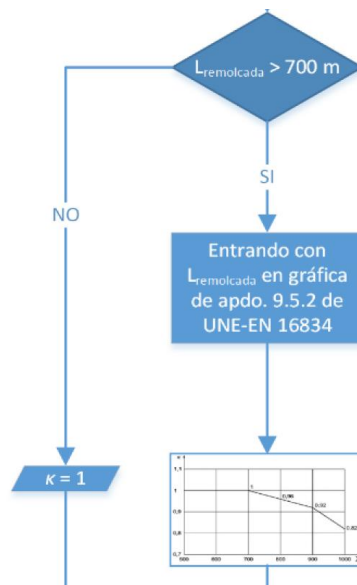
```

**Figura 32.** Subrutina GMercancias.

Continuando con el esquema de la **Figura 14b**, cuando seleccionamos la opción Regimen G Mercancias, si la longitud remolcada por el tren (input en nuestra interfaz) es menor que 700 metros, el valor de Kappa es 1, no afectando al valor final de prestación de frenado. Sin embargo, si la longitud remolcada del tren es mayor de 700 metros, el valor Kappa experimenta aproximadamente un decrecimiento lineal.

Por último, hay que añadir que la longitud máxima soportada es de 1000 metros (Como se puede observar en el límite de la gráfica de la **figura 33**).

Para una comprensión más detallada, se amplía el esquema en la **Figura 14** y se presenta en la siguiente Figura (**Figura 33**) lo descrito en los párrafos anteriores.



**Figura 33.** Esquema cálculo régimen G.**3.2.2.3 Paso 3**

En este paso, calcularemos la *deceleración* y la *velocidad límite* indicada como outputs en nuestro software.

La manera de calcular estas variables ha sido extraída del Anexo A3 del documento Resolución 2/2021 (**Figura 34**).

### A.3. MODELO DE CONVERSIÓN PARA TRENES LAMBDA. DECELERACIONES EN FUNCIÓN DEL $\lambda$

El cálculo de las deceleraciones de un tren a partir de su  $\lambda$  se realiza conforme a lo indicado en el apartado F.4.4 de la [Ref. 11].

La fórmula (F.12), junto con los parámetros de la tabla F.8, permiten determinar la deceleración ( $d_{r,0}$ ) en el escalón más bajo de velocidad. Dicha deceleración es de aplicación desde 0 km/h hasta la velocidad límite  $v_L$  (definida en la fórmula F.13, con los parámetros de la tabla F.8).

F.4.4 - Se calculan las deceleraciones básicas  $d_{r,n}$

Para  $0 \leq v \leq v_L$  se debe utilizar la deceleración  $d_{r,n}(\lambda_0)$  con  $\lambda_0$  de la fórmula (F.14):

$$d_{r,0} = A \cdot \lambda_0 + B \tag{F.12}$$

$$v_L = x \cdot \lambda_0^y \tag{F.13}$$

Valores de coeficientes (consulte la Tabla F.8):

Tabla F.8

Símbolo	Tipo	Valor	Unidad
A	real	0,0075	$\frac{m}{s^2} \cdot \%$
B	real	0,076	$m/s^2$



x	real	$\frac{16,85}{3,6}$	$m/s^2$
y	real	0,428	número

Figura 34. Anexo A3 del documento Resolución 2/2021.

La manera de implementar dicho cálculo en nuestro entorno de programación ha sido la que se visualiza en la Figura 35.

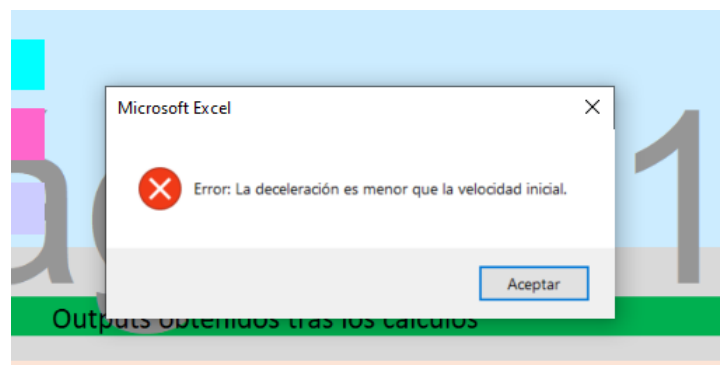
```
'----- Paso 3 -----  
'Calculo de la DECELERACION Y VELOCIDAD LIMITE en funcion de Lambda, segun el modelo de conversion para trenes Lambda (Anexo A3)  
  
'Deceleración  
Decelerac = (0.0075 * PrestacionesFrenadoKappa) + 0.076  
Range("B25").Value = Decelerac  
  
'Velocidad límite en m/s  
Vellim = (16.85 / 3.6) * (PrestacionesFrenadoKappa) ^ 0.428  
Range("B29").Value = Vellim  
  
'Velocidad límite en km/h  
VellimKm = Vellim * (3600 / 1000)  
Range("E29") = VellimKm  
  
'Pendiente = True  
  
'Si la velocidad limite es menor que la velocidad inicial no sería válido, ya que el tren no reduciría su velocidad a cero.  
If VellimKm < VelocidadInicialKm Then  
MsgBox "Error: La deceleración es menor que la velocidad inicial.", vbCritical  
End If
```

**Figura 35.** Paso 3

Como puede observarse en el código implementado, una vez calculadas la deceleración y la velocidad límite (tanto en m/s como en km/h), se añade la siguiente indicación crucial (marcada en rojo en la figura 35).

Si la velocidad límite es menor que la velocidad inicial, este cálculo no sería válido, ya que el tren no podría reducir su velocidad a cero.

La velocidad límite marca el tope para el cual las condiciones iniciales serían válidas. En este caso, el software nos mostraría un error en pantalla, indicando que el cálculo no es correcto bajo esas condiciones (**Figura 36**).



**Figura 36.** Error por Velocidad limite > Velocidad inicial.

### 3.2.2.4 Paso 4

Como indica la **Figura 15**, en este cálculo, al ser condiciones nominales, el factor de corrección es uno, lo cual no afecta al resultado anterior de la deceleración, ya que como sabemos, cualquier número multiplicado por uno no cambia su valor.

Por lo tanto, este paso no es relevante aquí y es uno de los cambios que sí afectaría en el cálculo de la distancia de frenado de emergencia en condiciones degradadas, del cual hablaremos más adelante.

### 3.2.2.5 Paso 5

Un factor muy importante en el cálculo de la distancia de frenado de un tren es la **declividad**, que básicamente se refiere a la inclinación de la superficie. La declividad afecta de manera considerable a la deceleración calculada anteriormente, ya que una pendiente puede incrementar o reducir significativamente la distancia necesaria para detener el tren.

Para ello, consideramos el siguiente código (**Figura 37**) en el que podemos observar que, dependiendo de una subrutina, la cual que llamaremos y estudiaremos más adelante, si estamos en una pendiente o en una rampa. Esto nos permitirá ajustar correctamente la deceleración y, por consiguiente, la distancia de frenado del tren.

```
'----- PASO 5 -----'  
  
'Cálculo de la deceleración debido a la declividad de la vía (Apartado A.6 normativa)  
'¿Rampa o pendiente?  
  
Call inclinacion  
  
'Deceleración en rampa (Negativa)  
  
If Rampa = True Then  
DeceleracDeclividad = (9.81 * (Declividad / 1000)) / 1.15  
Range("E25").NumberFormat = "0.0000;-0.0000" ' Formato para mostrar números negativos con signo - y elegir cifras decimales  
Range("E25") = DeceleracDeclividad  
End If  
  
'Deceleración en pendiente (Positiva)  
  
If Pendiente = True Then  
DeceleracDeclividad = (9.81 * (Declividad / 1000)) / 1.02  
Range("E25").NumberFormat = "0.0000;-0.0000" ' Formato para mostrar números negativos con signo - y elegir cifras decimales  
Range("E25") = DeceleracDeclividad  
  
End If
```

**Figura 37.** Paso 5

Como podemos observar en la **Figura 38**, el código llama a la subrutina `inclinación`. Esta función, dependiendo de si la declividad (input en nuestro software) es positiva o negativa, devuelve diferentes valores para pendiente y rampa.

```
Sub inclinacion()  
If Declividad < 0 Then  
    Pendiente = True  
    Rampa = False  
End If  
If Declividad > 0 Then  
    Rampa = True  
    Pendiente = False  
End If
```

**Figura 38.** Subrutina de inclinación

Volviendo a la **Figura 37**, una vez que sabemos si estamos en una pendiente o una rampa, procedemos según lo establecido en el documento A6 de la normativa (**Figura 39**). Observamos que el valor de la fórmula cambia dependiendo de si estamos en una pendiente o en una rampa.

Por ello, es crucial, al revisar el código de programación, distinguir nuestra situación para aplicar la constante correcta.

Una vez calculado el valor de la deceleración con la declividad, este se obtiene como salida en nuestro software.



## A.6. DECELERACIONES DEBIDAS A LA DECLIVIDAD DE LA VÍA

El modelo ETCS tiene en cuenta la influencia de la gravedad en las rampas y pendientes. La deceleración debida a la declividad de vía se calcula mediante la fórmula:

$$d_i = \frac{g \cdot i}{\rho}$$

donde:

- $g$ : aceleración de la gravedad. Se toma  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ .
- $i$ : declividad de la vía, expresada en tanto por uno (positiva en rampas, negativa en pendientes).
- $\rho$  ( $= m_{\text{dyn}}/m_{\text{st}}$ ): coeficiente de inercia de masas rotativas. Representa el efecto inercial de las masas en rotación existentes en el tren. Dicho efecto se traduce en una menor influencia de la gravedad sobre la deceleración del tren al frenar en rampa o pendiente. El modelo ETCS fija unos valores a emplear en caso de no disponer de los valores específicos del vehículo:
  - a) En rampas:  $\rho = 1,15$ .
  - b) En pendientes:  $\rho = 1,02$ .

**Figura 39.** Anexo A.6 del documento resolución 2/2021.

### 3.2.2.6 Paso 6

En este paso, calcularemos el tiempo de respuesta equivalente del freno indicado como salida en este software, como se indica en el apartado A2 de esta normativa (Figura 40).

1) Trenes en régimen P:



$$t''_{fo} = a_v + b_v \cdot \frac{L'}{100} + c_v \cdot \left(\frac{L'}{100}\right)^2 \quad (F.2)$$

$$L' = \max(400m; \text{Longitud real}) \quad (F.3)$$

2) Valores de los coeficientes empleados:

Coefficiente	Para $L \leq 900 \text{ m}$	Para $L > 900 \text{ m}$ (trenes mercancías)
$a_v$	2,3	- 0,4
$b_v$	0	1,6
$c_v$	0,17	0,03

**Ejemplo de aplicación:**

Tren Lambda de 400 m de longitud total, circulando en régimen P. Particularizando en la fórmula (2) con los valores de  $a_v$ ,  $b_v$ ,  $c_v$  y  $L'$  adecuados, resulta un tiempo de respuesta equivalente del FdE en condiciones nominales:

$$t''_{fo} = 2,3 + 0 \cdot \frac{400}{100} + 0,17 \cdot \left(\frac{400}{100}\right)^2 = 5,02 \text{ segundos}$$

Tipo de tren (Régimen de frenado, Longitud tren)	$t''_{fo}$ (s)
(P, 400)	5,02

**Figura 40.** Anexo A2 del documento resolución 2/2021.

Es decir, observando lo marcado en rojo en la Figura 40, se tiene que el tiempo de respuesta para una longitud será 5,02 que es el resultado de la fórmula anterior.

No obstante, más abajo en el mismo anexo (**Figura 41**), se comenta que, para el tiempo de respuesta equivalente del freno, al haber tenido en cuenta el efecto de la longitud del tren a través del factor kappa (k) (Paso 2), hay que considerar que el tiempo de respuesta es (P,400), es decir 5,02 segundos, independientemente de la longitud remolcada.

Tipo de tren (Régimen de frenado, Longitud tren)	$t''_{fo}$ (s)
(P, 400)	5,02

En los equipos embarcados de ETCS que utilizan el modelo, el maquinista, antes de iniciar la marcha, debe introducir el  $\lambda$  nominal y la longitud real del tren sin aplicar ningún factor kappa ( $\kappa$ ) (el apartado G.4.4 de la UIC 544-1 indica que en ETCS no se usa el factor  $\kappa$ ).

Por ello, a efectos del cálculo de las distancias de frenado para sistemas no embarcados, es necesario fijar una longitud y referir todas las distancias de frenado a esa longitud (400 m en esta ET). A través del factor  $\kappa$ , un tren de una longitud cualquiera se puede asimilar a uno de 400 m, y a partir de ahí calcular las distancias de frenado.

Dado que el **tren Lambda** empleado en esta ET para el cálculo de las distancias de frenado es un tren circulando en régimen P de 400 m de longitud total (independientemente de cuál sea su longitud real, ya que siempre se tiene que asimilar a ésta mediante la aplicación del factor  $\kappa$ ), el valor de tiempo de respuesta equivalente del FdE obtenido en el ejemplo anterior (**5,02 s**) será utilizado a lo largo de la presente ET cuando se aplique el modelo de conversión de lambda ( $\lambda$ ) en deceleraciones ( $a_e$ ) y tiempo de respuesta equivalente ( $t_e$ ).

Según el modelo ETCS, para el cálculo del tiempo de respuesta equivalente del freno, en el caso de frenados que no llegan hasta la parada, los tiempos  $t''_{fo}$  deben ser corregidos. Para ello se aplican las fórmulas (F.5) y (F.6) del apartado F.4.2 de la [Ref. 11], empleando el factor  $k_{to}$ , definido en función del valor  $c_i$ :

$$t'_{fo} = t''_{fo} \cdot k_{to} \tag{F.5}$$

**Figura 41.** Anexo A2 del documento resolución 2/2021.

Dicho esto, en este ejemplo, el tiempo de respuesta no varía y siempre obtenemos el mismo resultado. Sin embargo, en el código implementado (**Figura 42**), a pesar de que el código siempre entra en el primer IF (**marcado en azul en la Figura 42**) debido a que en el **Paso 2** activamos la "banderakappa" (variable de tipo booleana que actúa como una señal o indicador dentro del programa, permitiendo tomar decisiones o realizar acciones específicas en función de si está activada o desactivada) con un valor positivo, indicando que el factor kappa ha sido modificado, se ha añadido una consideración adicional.

Para contemplar todos los ejemplos y posibles ampliaciones futuras, se ha incluido lo indicado en el apartado 2 de la Figura 40 (**marcado en amarillo en la Figura 42**). Esto nos permite manejar diferentes valores para las constantes " $a_v$ ,  $b_v$  y  $c_v$ ", cuando su longitud supera los 900 metros.

```

'----- PASO 6 -----
'..... Importante .....
'Como en el Paso 2 , se ha tenido en cuenta el efecto de la longitud del tren a través del factor kappa hay que considerar
'siempre el te del tren (P,400), es decir:

If Banderakappa = True Then
    trespuesta = 2.3 + 0 * (400 / 100) + 0.17 * (400 / 100) ^ 2
    Range("H29").NumberFormat = "0.00;-0.00" ' Formato para mostrar números negativos con signo - y elegir cifras decimales
    Range("H29") = trespuesta
Else
    'Calculo del tiempo de respuesta del freno (influye la longitud remolcada)
    '(Apartado A.2 normativa)

    Call Calculolongitud

    If Largo = True Then

        trespuesta = -0.4 + 1.6 * (LongRemolcada / 100) + 0.03 * (LongRemolcada / 100) ^ 2
        Range("H29").NumberFormat = "0.00;-0.00" ' Formato para mostrar números negativos con signo - y elegir cifras decimales
        Range("H29") = trespuesta

    End If

    If Largo = False Then

        trespuesta = 2.3 + 0 * (LongRemolcada / 100) + 0.17 * (LongRemolcada / 100) ^ 2
        Range("H29").NumberFormat = "0.00;-0.00" ' Formato para mostrar números negativos con signo - y elegir cifras decimales
        Range("H29") = trespuesta

    End If

End If
    
```

**Figura 42.** Paso 6, código implementado.

Como se observa, en la parte marcada en amarillo, para saber si el tren es largo (mayor que 900 metros) llama a la subrutina “Calculolongitud” (**Figura 43**), la cual devolverá valores de true o false para la variable “Largo” según si la longitud es mayor de 900 metros o menor.

```
Sub Calculolongitud()

If LongRemolcada <= 900 Then

Largo = False

End If
```

**Figura 43.** Subrutina Calculolongitud

**3.2.2.7 Paso 7**

Nos acercamos al final del cálculo de la distancia de frenado de emergencia en condiciones nominales. En este paso, veremos cómo, al circular el tren en pendiente o rampa (según sus condiciones iniciales), la velocidad aumentará o disminuirá durante el tiempo de respuesta del sistema de frenado equivalente.

En el ejemplo del código implementado (**Figura 44**), al circular en pendiente, la velocidad aumenta durante el tiempo de respuesta.

```
'----- PASO 7 -----
'Se recalcula su velocidad inicial debido a que puede variar dependiendo si circula en rampa/pendiente
'Paso la velocidad inicial de km/h a m/s (Operar siempre en m/s)

Velinicialms = VelinicialKmh * (1000 / 3600)

'Calculo en m/s

Vincialprimams = Velinicialms - (DeceleracDeclividad * trespuesta)
Range("J25").NumberFormat = "0.00;-0.00" ' Formato para mostrar números negativos con signo - y elegir cifras decimales
Range("J25") = Vincialprimams

'Calculo en Km/h

VincialprimaKmh = Vincialprimams * (3600 / 1000)
Range("M25").NumberFormat = "0.00;-0.00" ' Formato para mostrar números negativos con signo - y elegir cifras decimales
Range("M25") = VincialprimaKmh
```

**Figura 44.** Paso 7, código implementado.

Observamos que la velocidad inicial recalculada (outputs de salida de nuestro software) (**Figura 45**) se obtiene tanto en m/s como en km/h.

Velocidad inicial recalculada (Vo)				
9,30	m/s	=	33,48	km/h

**Figura 45.** Velocidad inicial recalculada**3.2.2.8 Paso 8**

Para finalizar, se calcula la distancia de frenado utilizando las variables calculadas previamente en los pasos anteriores (tiempo de respuesta, deceleración con declividad durante el tiempo de respuesta, deceleración, etc.).

La formula implementada ha sido la que aparece en la **Figura 46**.

$$s_{grad} = v_0 \cdot t_e - \frac{1}{2} \cdot \frac{m_{st}}{m_{dyn}} \cdot g_n \cdot i \cdot t_e^2 + \frac{\left(v_0 - \frac{m_{st}}{m_{dyn}} \cdot g_n \cdot i \cdot t_e\right)^2 - v_{fin}^2}{2 \cdot a_e}$$

**Figura 46.** Formula de distancia de frenado.

Donde:

- $s_{grad}$  : distancia de frenado (m).
- $v_0$  : velocidad inicial (m/s).
- $t_e$  : tiempo de respuesta equivalente del freno (s).
- $m_{st}/m_{dyn}$ : inverso del coeficiente de inercia de masas rotativas.
- $g_n$  : aceleración de la gravedad (m/s<sup>2</sup>).
- $i$  : declividad de la vía (en tanto por uno). Positiva en rampas, negativa en pendientes.
- $v_{fin}$  : velocidad objetivo o final (m/s).
- $a_e$  : deceleración de frenado (m/s<sup>2</sup>). Se considera con signo positivo.

A continuación, mostramos el código implementado para este paso (**Figura 47**).

```

'----- PASO 8 -----
.....
..... Cálculo de la distancia de FdE .....
.....
Dim Sgrad As Double
Dim Sgradfinal As Double
'Dim SgradfinalRedondeado As Double

'Superficie = velocidad inicial * trespuesta - 1/2 * deceleracion con declividad por tiempo de respuesta * trespuesta^2
'+ (velocidad inicial - deceleracion con declividad por tiempo de respuesta )^2 / 2 * (deceleracion + deceleracion con declividad)

Sgrad = (Velinicialms * trespuesta) - (0.5 * DeceleracDeclividad * (trespuesta ^ 2))

Sgradfinal = Sgrad + (((Velinicialms - (DeceleracDeclividad * trespuesta)) ^ 2) / (2 * (Decelerac + DeceleracDeclividad)))

Range("P25") = Sgradfinal

'Redondeamos de manera convencional

SgradfinalRedondeado = RedondearConvencional(Sgradfinal)

Range("T25").NumberFormat = "0;-0"

Range("T25") = SgradfinalRedondeado

```

**Figura 47.** Paso 8, código implementado

### 3.3 Cálculo de distancia de FdE en condiciones degradadas

Dado que el cálculo de la distancia de frenado de emergencia (FdE) en condiciones degradadas es en gran medida similares al cálculo de la distancia de frenado en condiciones nominales, y que tanto la estructura y la lógica del código permanecen casi idénticas, con diferencias menores, no volveremos a explicar en detalle la programación.

Por tanto, en este apartado nos vamos a centrar exclusivamente en las partes del código que difieren respecto al cálculo en condiciones nominales, anteriormente explicado. Estos ajustes y modificaciones permiten adaptar el modelo a las nuevas condiciones, asegurando que el cálculo de la distancia de frenado sea preciso y fiable incluso cuando el sistema no opera en condiciones óptimas.

A continuación, se detallan los cambios específicos implementados en el código para manejar estas condiciones degradadas.

#### 3.3.1 Diferencia principal entre la distancia de frenado de emergencia en condiciones nominales y degradadas.

La diferencia principal entre las FdE en condiciones nominales y degradadas viene detallada en el apartado 9.2 del documento resolución 2/2021 (**Figura 48**), así mismo comentado en la Figura 15 es decir, las condiciones nominales no requieren ajustes en deceleraciones ni tiempos de respuesta.

En contraste, en condiciones degradadas, se aplican factores de corrección a las deceleraciones y al tiempo de respuesta equivalente del freno, dependiendo de la velocidad inicial del tren: para velocidades superiores a 160 km/h, las deceleraciones se reducen multiplicándolas por 0,70, mientras que para velocidades iguales o inferiores a 160 km/h se aplica un factor de multiplicación de 0,81.

Estos ajustes consideran variaciones en la adherencia rueda-carril, el mantenimiento del material rodante, efectos de sistemas antideslizamiento, imprecisiones en la medición de velocidad y otros factores operativos críticos.

Por otro lado, según el apartado H.4 de las Especificaciones Técnicas de Interoperabilidad (ETIs) de material rodante de 2002 y 2008, conforme a la resolución 2/2021, en condiciones degradadas —que son el foco de nuestro cálculo actual—, es crucial asegurar que la deceleración no supere el límite máximo permitido por la adherencia, fijado en **0,9m/s<sup>2</sup>**. Este límite garantiza que, incluso bajo condiciones adversas como reducción de la adherencia rueda-carril o variaciones en el estado del material rodante, las deceleraciones aplicadas durante el frenado no comprometan la seguridad operativa del tren ni la infraestructura ferroviaria.

Este enfoque normativo subraya la importancia de ajustar y verificar las deceleraciones calculadas, utilizando factores de corrección según sea necesario para mantenerse dentro de los límites establecidos. De esta manera, se asegura que el sistema de frenado opere de manera segura y eficiente, adaptándose a condiciones variables sin poner en riesgo la integridad del servicio ferroviario

## 9 Factores de corrección

### 9.1 Para FdE en condiciones nominales

Para los dos tipos de trenes considerados, Lambda y Gamma las distancias de FdE en condiciones nominales se obtienen sin aplicar ningún factor de corrección, ni a las deceleraciones ( $a_e$ ), ni al tiempo de respuesta equivalente del freno ( $t_e$ ).

### 9.2 Para FdE en condiciones degradadas

Para los dos tipos de trenes considerados, las distancias de FdE en condiciones degradadas se obtienen aplicando a las deceleraciones y al tiempo de respuesta equivalente del FdE, los siguientes factores de corrección:

Velocidad instantánea (km/h)	$K_{t\_int}$	$K_{r\_int} * K_{v\_int}$
≤ 160	1	0,81
> 160	1	0,70

Esto significa que para los trenes que inicien frenada desde una velocidad superior a 160 km/h, las deceleraciones aplicables por encima de dicha velocidad se multiplicarán por 0,70, mientras que las que apliquen desde 160 km/h para abajo, se multiplicarán por 0,81 (ver apartado A.4).

Figura 48. Apartado 9.2 del documento resolución 2/2021 (Origen de lo resumido en la figura 15).

*Nota: en la EN-15734-1 también se define el "FdS normal" como 2/3 del "FdS máximo".*

A continuación, se exponen diferentes escenarios donde se contrasta la coherencia de estos valores de "FdS normal" y "FdS máximo":

- 1) El apartado 4.2.5 de la ETI de infraestructura [Ref. 15], permite el diseño de líneas de AV con pendientes de hasta 35%. La circulación por estas pendientes a velocidades superiores a 230 km/h exige una utilización del FdS superior al normal, es decir, se necesitan deceleraciones mayores de (0,30 - 0,35 m/s<sup>2</sup>) para mantener o reducir la velocidad del tren.
- 2) Para una velocidad de 160 km/h,  $\lambda = 120\%$  y una pendiente del -25%, la distancia de FdS, según la tabla 2 de la NTC 020.95, es 2.620 m. Para que el tren frenara en esta distancia sería necesario un  $t_e = 2$  s y una  $a_e = 0,65$  m/s<sup>2</sup>. Estas prestaciones se encuentran en el rango entre el "FdS normal" y el "FdS máximo".
- 3) Según la [Ref. 12] de ASFA - AV digital, el control de Anuncio de Parada (frecuencia L1) impone una Velocidad de Control (VC) al pasar de 200 a 100 km/h, utilizando un FdS con un  $t_e = 7,5$  s y una  $a_e = 0,55$  m/s<sup>2</sup>. Estas prestaciones se traducen en la necesidad de pasar de 200 a 100 km/h con FdS en una distancia de 2.521,04 m, independientemente de la declividad. Esto equivale a  $t_e = 2$  s y una  $a_e = 0,79$  m/s<sup>2</sup> para no llegar a la VC.

Por otro lado, la curva de intervención de FdE (IF) está establecida por el ASFA - AV en un  $t_e = 9$  s y una  $a_e = 0,5$  m/s<sup>2</sup>. Estas prestaciones se traducen en la necesidad de pasar de 200 a 100 km/h con FdS en una distancia de 2.814,81 m, independientemente de la declividad. Esto equivale a  $t_e = 2$  s y una  $a_e = 0,73$  m/s<sup>2</sup> para no llegar a la IF.

Para los tres ejemplos presentados, las deceleraciones de FdS requeridas se encuentran en el rango proporcionado por un tren que cumpla las [Ref. 13] y [Ref. 14], es decir, entre 0,6 m/s<sup>2</sup> (FdS normal) y 0,9 m/s<sup>2</sup> (FdS máximo).

Figura 49. Apartado H.4 del documento resolución 2/2021



### 3.3.1.1 Implementacion de este cambio en nuestro Código

De la macro implementada del cálculo en condiciones degradadas, hemos capturado los cambios significativos (**Figura 50**), en la que se puede observar, en el Paso 5, en base a la Figura 15, si la velocidad es menor/igual que 160 km/h tendrá un factor de corrección u otro.

Por otro lado, lo comentado en la Figura 49, se inplementa en el paso 6, dando un mensaje de error si la deceleración supera el limite máximo por adherencia.

```
'----- PASO 5 -----
' Conversion de la deceleracion al ser condiciones degradadas definidas en el apartado 9.2
Dim DeceleracDegrada As Double

If Velmaxima <= 160 Then
    DeceleracDegrada = Decelerac * 0.81
Else
    DeceleracDegrada = Decelerac * 0.7
End If

Range("B35").Value = DeceleracDegrada

'----- PASO 6 -----
' ----- ¿La deceleración supera el limimte máximo por adherencia? -----
If DeceleracDegrada > 0.9 Then
    MsgBox "Error: La deceleración supera el límite máximo por adherencia.", vbCritical

End If
```

**Figura 50.** Código nuevo en en condiciones degradadas

Esto afectaría al cálculo de la distancia de frenado el cual ahora sería así:

$$Distancia\ de\ frenado = (V_o * te) - \left(\frac{1}{2} * di * te^2\right) + \left(\frac{(V_o - di)^2}{2 * (dg + di)}\right)$$

Donde:

- $te$  = Tiempo de respuesta del freno
- $di$  = Deceleración con declividad
- $V_o$  = Velocidad inicial
- $dg$  = Deceleración degradada

Como se puede observar, la deceleración ya no entra en juego en el cálculo final, sino que es sustituida por la deceleración degradada (**Figura 51**).

```

..... Paso 10 .....
..... Cálculo de la distancia de FDE' .....
.....

Dim Sgrad As Double
Dim Sgradfinal As Double

'Superficie = velocidad inicial * trespuesta - 1/2 * deceleracion con declividad * trespuesta^2
'+ (velocidad inicial - deceleracion con declividad )^2 / 2 * (deceleracion degradada + deceleracion con declividad)

Sgrad = (Velinicialms * trespuesta) - (0.5 * DeceleracDeclividad * (trespuesta ^ 2))
Sgradfinal = Sgrad + (((Velinicialms - (DeceleracDeclividad * trespuesta) ) ^ 2) / (2 * (DeceleracDegrada + DeceleracDeclividad)))

Range("P25") = Sgradfinal

'Redondemos de manera convencional
SgradfinalRedondeado = RedondearConvencional(Sgradfinal)

Range("T25").NumberFormat = "0;-0"
Range("T25") = SgradfinalRedondeado
    
```

**Figura 51.** Cálculo final distancia degradada

**3.3.1.2 Salidas nuevas obtenidas en condiciones degradadas.**

En la **Figura 52** se observa lo comentado anteriormente, se genera una nueva salida que también es visible en nuestra interfaz:

Outputs obtenidos tras los cálculos

Deceleración 0,451 m/s <sup>2</sup>	Deceleración con declividad (d <sub>f</sub> ) -0,0962 m/s <sup>2</sup>	Velocidad inicial recalculada (V <sub>0'</sub> ) 4,65 m/s = 16,74 km/h	Distancia de frenado 62,29 m = 62 m
Velocidad límite máxima para la 24,97 m/s = 89,9 km/h		Tiempo de respuesta del freno (t <sub>e</sub> ) 5,02 segundos	
Deceleración en condiciones degradadas 0,36531 m/s <sup>2</sup>			

**Figura 52.** Salida de deceleración en condiciones degradadas.

## 4 CONCLUSIONES

---

El cálculo preciso de la distancia de frenado es fundamental en el ámbito ferroviario por varias razones clave. En primer lugar, garantiza la seguridad operativa al proporcionar una estimación exacta de la distancia requerida para detener un tren en caso de emergencia. Esto no solo protege la integridad de los pasajeros y la carga, sino que también minimiza el riesgo de colisiones y descarrilamientos, asegurando un entorno de transporte seguro y eficiente.

Además, comprender y dominar el cálculo exacto de la distancia de frenado es esencial para el cumplimiento normativo. La normativa actual, como la 2/2021 mencionada en este trabajo, establece estándares estrictos para la seguridad ferroviaria, incluyendo requisitos precisos para el diseño y operación de sistemas de frenado.

Un conocimiento detallado y aplicado de estos cálculos permite a los ingenieros y operadores cumplir con estas normativas, asegurando que las operaciones ferroviarias se realicen dentro de los límites legales y técnicos establecidos.

La automatización de estos procesos mediante herramientas avanzadas como Excel y VBA no solo mejora la eficiencia en la gestión y operación ferroviaria, sino que también minimiza errores potenciales derivados de la intervención humana. Esta automatización, como se ha demostrado en este trabajo, proporciona una plataforma confiable para la realización de cálculos precisos y la toma de decisiones fundamentadas en datos exactos, lo cual es crucial para mantener la seguridad y la operatividad continuas del sistema ferroviario.

Además de la mejora en la eficiencia y la reducción de errores, la implementación de herramientas automatizadas como Excel y VBA tiene un impacto significativo en la escalabilidad y la consistencia de los procesos de cálculo de distancia de frenado. Al automatizar estas tareas complejas, las empresas ferroviarias pueden manejar grandes volúmenes de datos con mayor facilidad y precisión, adaptándose rápidamente a cambios en las condiciones operativas y requisitos normativos. Esto no solo optimiza los recursos y el tiempo empleado en la planificación y operación, sino que también fortalece la capacidad de respuesta del sistema ferroviario frente a situaciones imprevistas o emergencias.

Por lo tanto, la adopción de soluciones automatizadas no solo representa un avance tecnológico en la gestión ferroviaria, sino que también es una estrategia clave para mejorar la seguridad y la eficiencia a largo plazo.

Al minimizar la dependencia de procesos manuales susceptibles a errores, se establece una base sólida para la confiabilidad del sistema, asegurando así operaciones continuas y seguras que cumplen con las normativas más estrictas. Esta combinación de precisión técnica y adaptabilidad operativa posiciona al sector ferroviario en un camino hacia la innovación y la excelencia en el transporte público y de mercancías a nivel global.

En resumen, el conocimiento y la capacidad de calcular con precisión la distancia de frenado son elementos esenciales para garantizar la seguridad, cumplir con las normativas vigentes y mejorar la eficiencia en el sector ferroviario.

La precisión en estos cálculos no solo protege la integridad de pasajeros y carga, sino que también asegura un funcionamiento óptimo del sistema ferroviario al reducir el riesgo de incidentes. Este enfoque no solo se traduce en un transporte más seguro y eficiente, sino que también refuerza el cumplimiento normativo al aplicar estándares estrictos de seguridad ferroviaria, como los establecidos por la normativa 2/2021 mencionada en este trabajo.

## 5 REFERENCIAS

---

- [Ref. 01]** Ficha UIC 544-1 “Brakes – Braking performance”. 6ª edición. Octubre 2014.
- [Ref. 02]** Ficha UIC 541-05 “Brakes – Manufacturing specifications for various brake parts – WheelSlide Protection device (WSP)”. 3ª edición. Marzo 2016.
- [Ref. 03]** Especificación Técnica de Interoperabilidad del Subsistema “Material Rodante. Locomotoras y Material Rodante de Viajeros”. Reglamento UE nº 1302/2014 de la Comisión de 18/11/14.
- [Ref. 04]** Reglamento de Circulación Ferroviaria. Real Decreto 664/2015 de 17/07/15, incluyendo el Real Decreto 1011/2017 de 01/12/17, por el que se modifica el anterior.
- [Ref. 05]** Norma Técnica de Circulación de RENFE NTC 020.95 “Distancias de frenado y Señales”. Edición 2. Noviembre 1995.
- [Ref. 06]** “System Requirements Specification” del sistema ERTMS/ETCS, Subset 026-3. Versión 3.4.0. 12/05/14.
- [Ref. 07]** “System Requirements Specification” del sistema ERTMS/ETCS, Subset 026-7. Versión 3.4.0. 12/05/14.
- [Ref. 08]** Norma UNE-EN 14531-1 “Aplicaciones Ferroviarias. Métodos para el cálculo de las distancias de frenado de parada y desaceleración e inmovilización. Parte 1: Algoritmos generales que utilizan el cálculo del valor medio de composiciones de trenes o vehículos aislados”. Noviembre de 2016.
- [Ref. 09]** Documento de la UIC: “Braking Questions. Calculation model for the conversion

of the  $\lambda$  value into a speed-dependent function of deceleration". UIC B126/RP  
35. Agosto 2009.

- [Ref. 10]** Norma UNE-EN 14198 "Aplicaciones Ferroviarias. Frenado. Requisitos para el sistema de frenado de trenes remolcados por locomotoras". Febrero 2018.
- [Ref. 11]** Norma UNE-EN 16834 "Aplicaciones ferroviarias. Frenado. Prestaciones del freno". Enero de 2020.
- [Ref. 12]** ET 03.365.008.6 Especificación Técnica ASFA DIGITAL EMBARCADO. ADIF.  
Revisión 04/01/2020.
- [Ref. 13]** Especificación Técnica de Interoperabilidad del Subsistema "Material Rodante" del subsistema ferroviario transeuropeo de alta velocidad. Decisión CE nº 735/2002 de la Comisión de 30/05/2002.
- [Ref. 14]** Especificación Técnica de Interoperabilidad del Subsistema "Material Rodante" del subsistema ferroviario transeuropeo de alta velocidad. Decisión CE nº 232/2008 de la Comisión de 21/02/2008.
- [Ref. 15]** Especificación Técnica de Interoperabilidad del Subsistema de infraestructura del sistema ferroviario transeuropeo de alta velocidad Decisión CE nº 217/2008 de la Comisión de 20/12/2007.
- [Ref. 16]** <https://civiltracks.com/index.php/frenado-de-tren/>